

# 太陽光発電を利用した宇宙線実験 電源供給システム

山梨大学 本田研究室

g06mm031

富田孝幸

第1章	序論	1
1-1	宇宙線	1
1-2	空気シャワー	2
1-3	宇宙線観測	3
1-4	宇宙線望遠鏡計画 (Telescope Array Project)	4
1-5	地表検出器 (Surface Detector)	5
1-6	地表検出器の電力使用および供給	7
1-7	研究目的	8
第2章	太陽光発電パネル	10
2-1	KC120J-KC125TJ	10
2-2	ND-L3ELJE	12
2-3	実験システム	14
2-3-1	発電データ取得装置	14
2-3-2	気象観測機	15
2-4	取得データ	16
2-5	仰角 60° 設置パネルの解析法	18
2-5-1	太陽位置と垂直面積の算出	19
2-5-1	計算値の精度	20
2-6	パネル表面汚れの影響	24
2-7	遮光の影響	26
2-6-1	遮光試験	26
2-6-2	DELTA での積雪の変化	27
2-8	太陽光パネルの温度変化	28
第3章	チャージコントローラー	29
3-1	SD チャージコントローラー	29
3-2	SS-10L-1V	30
3-3	実験システム	32
3-4	チャージコントローラー性能評価	34
3-4-1	SD-チャージコントローラー評価	34
3-4-2	SS-10-1V 評価	36

第4章	バッテリー	38
4-1	DYNASTY 製 DCS-100L	38
4-2	実験システム	39
4-2-1	充電器 (OKADA 製 Vertex)	39
4-2-2	デジタル入出力ボード	41
4-2-3	分圧器	41
4-2-4	分流器	42
4-2-5	消費電球	42
4-2-6	保冷用冷凍庫	42
4-2-7	リレー回路	43
4-3	取得データ	43
4-4	温度特性と劣化	45
4-4-1	健全バッテリー	45
4-4-2	劣化バッテリー	48
4-5	通常放電試験からのバッテリー劣化の評価	51
4-6	充放電間での電力量損失	52
4-6-1	充電時の電流の推定	52
4-6-2	充放電の電力量の比較	55
第5章	クーラーボックス	56
5-1	GXU-1600	56
5-2	実験システム	56
5-2-1	保冷用冷蔵庫 (GE Appliances 社 FHJ3SF[WW])	57
5-2-2	温度計 (KN ラボラトリーズ製 ThermoManager)	57
5-3	クーラーボックス性能	58
5-3-1	外部温度一定時の特性	58
5-3-2	外部温度変化時の特性	60
第6章	ヒーター	64
6-1	フィルム型ヒーター	64
6-2	放熱板	64
6-3	実験システム	65
6-4	ヒーター性能	65
6-4-1	フィルムヒーター性能	65
6-4-2	放熱板性能	67
6-5	SD 小型エレクトロニクス温度センサー性能	69

第7章	シミュレーション	71
7-1	シミュレーション概要	71
7-2	シミュレーション精度	76
7-3	地表検出器の年間稼働日数	79
7-3-1	健全バッテリー	79
7-3-2	劣化バッテリー	80
7-3-3	最劣化バッテリー	81
7-4	ヒーター使用の効果推定	82
第8章	まとめ	85

参考文献  
謝辞



# 第 1 章 序論

## 1-1 宇宙線

宇宙線とは、宇宙空間を飛び交う高いエネルギーを持った放射線のことであり、地球にも常時飛来している。1912年にオーストリアの物理学者であるビクター・フランツ・ヘスは気球を用いた放射線の計測実験を繰り返し、当時は地表が起源と考えられていた放射線が地球外から飛来することを発見した[1]。現在までに様々な実験が繰り返され  $10^7\text{eV}$  から  $10^{20}\text{eV}$  のエネルギーを持つことが知られている。宇宙線のエネルギーが  $10^9\text{eV}$  以下であり太陽を起源とするものを太陽宇宙線と呼ぶ。また、宇宙線のほとんどは銀河内を起源とし、超新星残骸などで加速されていると考えられている。地球大気内に高エネルギーの宇宙線が入射すると、大気中の原子核に衝突し原子核を粉砕し多くの放射線となり、生成された放射線が新たな原子核と衝突しカスケード状に粒子増加させる減少が起きる。この現象を空気シャワー現象と呼び、宇宙空間を伝播し大気中に入射する宇宙線を一次宇宙線、そこから相互作用によって発生した粒子を二次宇宙線と呼ぶ。一次宇宙線が大気に一次宇宙線の多くは陽子（90%）はじめとする荷電粒子、他にガンマ線やヘリウムの原子核や鉄の原子核などもある。二次宇宙線は大気中の原子核などとの相互作用の結果、地上高度では大半が  $\mu$  粒子となっている[2]。

宇宙線は地球大気に突入する前には宇宙空間を伝播してくるわけであるが、真空と言われる宇宙空間にも、ビッグバンの名残とも言われる 2.7K 宇宙背景放射 (CMBR) が存在している。宇宙線は大気中同様に相互作用の閾値を越えたエネルギーを持っていれば、CMBR と反応しエネルギーを損失する。ほかにも高エネルギーの電子であれば、宇宙空間磁場によるシンクロトロン放射など様々な要因でエネルギーの損失がある。このため宇宙線のエネルギーが高くなると宇宙線の到来頻度は極端に低くなり、そのエネルギースペクトルは観測からその多くは判明しており  $dI/dE \propto E^{-\alpha} (\alpha \sim 3)$  で近似できる。また従来から宇宙線には限界エネルギーがあるとされており、この限界エネルギーを閾値としたカットオフを提唱者 3 人の名前から GZK カットオフと呼ばれる。観測された宇宙線のエネルギースペクトルを図 1-1 に示す。

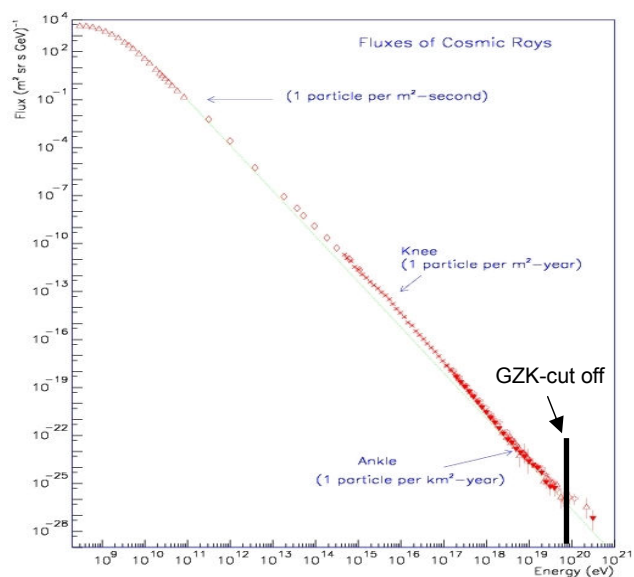


図 1-1 宇宙線スペクトル

10<sup>15</sup>eV 付近と 10<sup>19</sup>eV 付近に存在する折れ曲がりとはそれぞれ **knee** と **ankle** と名づけられている。**Knee** と **ankle** は共に銀河磁場による荷電粒子のラーモア半径に影響を受けるためである。ラーモア半径は粒子質量  $m$ 、磁場に対する粒子の垂直方向の速度  $v$ 、粒子原子番号  $Z$ 、素電化  $e$ 、銀河磁場強度  $B$  とすると

$$r_L = \frac{mv}{ZeB}$$

で表される。宇宙線エネルギーが **knee** 以下であれば銀河系の円盤厚さよりラーモア半径が十分に小さいため宇宙線は銀河系内に閉じ込められる。宇宙線エネルギーが **knee** を越える辺りからラーモア半径が銀河系厚みを越えるために銀河系内に留まる宇宙線が減少するために折れ曲がりが見られ、さらに **ankle** 以上になるとラーモア半径は銀河系半径を超え、銀河系内に留めることができなくなり、このため **ankle** 付近にも折れ曲がりが存在すると考えられる。つまり **ankle** 以上のエネルギーを持つ宇宙線の多くは銀河系外から飛来すると考えられ、その起源も銀河系外と考えられる。

**Ankle** を超えてすぐに G Z K カットオフが存在するのだが、図 1-2 ようにカットオフを超えても宇宙線は観測され続けており、これらの宇宙線は最高エネルギー宇宙線や超高エネルギー宇宙線と呼ばれる。

超高エネルギー宇宙線の起源には大きく

分けて 2 つ説がある。1 つはブラックホール、ガンマ線バースト、衝突銀河などの天体による宇宙線加速であり、もう 1 つが超重粒子やビッグバン初期の宇宙の相転移により発生した宇宙ひもやモノポールなどの移送欠陥の崩壊である [3]。

## 1-2 空気シャワー現象

宇宙線が地球大気に突入し進行する際、大気中の原子核と反応を繰り返し多くのエネルギーの低い放射線に変化する現象を空気シャワー (図 1-3) と呼ぶ。一次宇宙線は大気中の原子核との衝突し、原子核を多くの陽子や中性子、 $\pi$  中間子、K 中間子に粉碎する。こうしてできた二次宇宙線がさらに大気中の原子と反応してハドロンが増殖される。生じた二次宇宙線もエネルギーが高いために粒子を生成する。このような反応が連鎖的に生じ、大気中で大量の 2 次粒子が発生する現象をハドロンシャワーと呼ぶ。大気を進むにつれて

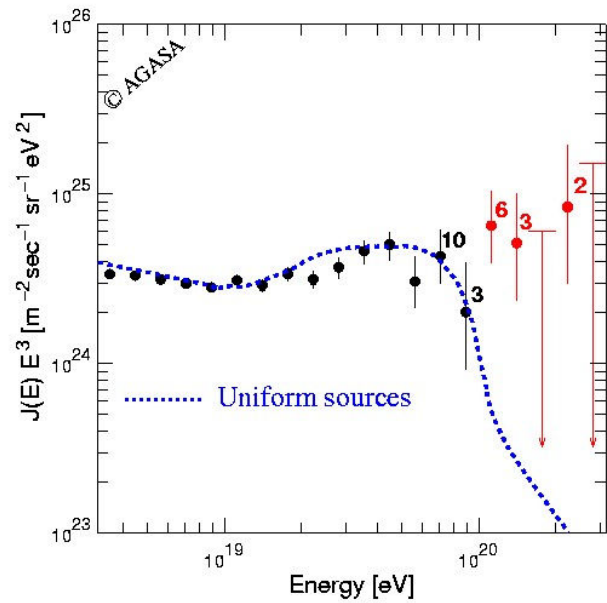


図 1-2 高エネルギー宇宙線スペクトル

空気シャワーは発達し、シャワー中の粒子数が増加するが、それに伴って、1粒子当たりのエネルギーは低くなっていき、やがて、エネルギーの低くなった粒子は新たに粒子を生成出来なくなり、空気シャワーは減衰する。生成された粒子は寿命の短いものは崩壊し、残ったガンマ線、電子、 $\mu$ 粒子、核子などの粒子が地表に複数同時に到来する。空気シャワー中では原子核の相互作用で生じた中性 $\pi$ 粒子の崩壊などによってガンマ線が生じる。このガンマ線から、によって一組の電子・陽電子が生じ、これらの電子対が大気中の原子核によって何度か制動放射を起こすことで、複数のガンマ線を放出する。この過程を繰り返すことで粒子数が増加する。このような現象を電磁カスケードと呼ぶ。ガンマ線と電子は、空気シャワーの主要な成分であるため、電磁カスケードは空気シャワーの主要な現象である。

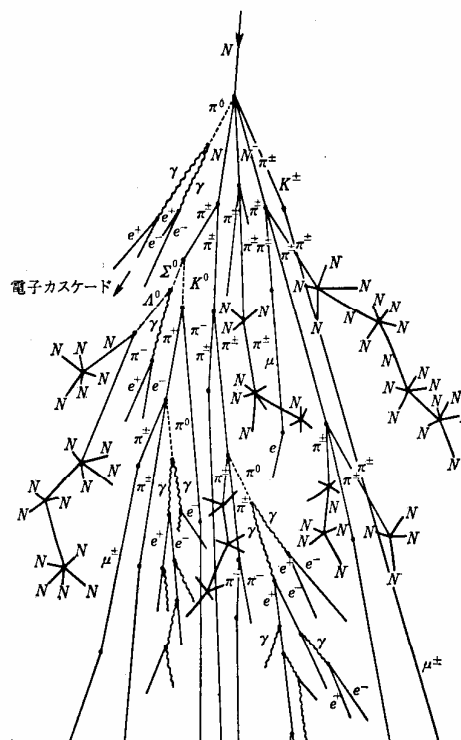


図1-3 空気シャワーの様子

### 1-3 宇宙線観測

宇宙線の到来頻度はエネルギーが高くなるにつれて極端に小さくなり、観測には大きな検出面積や長時間の観測が必要になる。このため、 $10^{15}$  eV 以上の高エネルギー宇宙線を人工衛星や気球などを用いて直接観測することは難しくなる。そのため高エネルギー宇宙線を観測する際は、地表で高エネルギー宇宙線から発生する空気シャワーを観測することで、間接的に観測する。

空気シャワーの観測方法は大きく分けて、地表に到達した粒子を観測、空気シャワー中の荷電粒子が大気中を通過した際に生じるチェレンコフ光やシンチレーション光といった微小な光の観測、空気シャワーから生じる電波を観測があげられる。地表に到達した粒子を観測の場合、地表に複数の検出器を配置して、そこを通過した粒子を記録する。

空気シャワーから発生する微小な光を観測する際は、望遠鏡の視野を大気に向け、月の無い、暗い夜に観測を行う。電波を用いた観測は、電波の検出には成功しているが、実用的な空気シャワーの観測手段としては確立されていない。

地表に到達した粒子を観測の中で極めて高いエネルギーを持った宇宙線を対象とした実験に AGASA (Akeno Giant Air Shower Array・明野広域空気シャワー観測装置) 計画というも

のがあった。AGASA 計画では GZK カットオフを超える  $10^{20}\text{eV}$  (16J) 以上の超高エネルギーの宇宙線を理論値以上となる 13 例も観測した。地球の近くには超高エネルギーに粒子を加速できる天体が見当たらず、銀河系内からの伝播ではないと思われる。また超高エネルギー宇宙線の到来方向を、他の望遠鏡などで観測してみても特異な天体はみつからない。すなわち AGASA で観測された 13 例は、カットオフを否定しており、これまでに知られていない物理あるいは、全く新しい天体现象によって生まれそして伝播して来たとも考えられる。しかしながら、空気シャワーから発生する微小な光を観測を用い、同じく超高エネルギーを対象とした実験 HiRes ではカットオフが観測されている。エネルギー決定の系統誤差が AGASA、HiRes でそれぞれ 18%と 21%である上、どちらの実験も統計数が十分でないため、結論付けられない状況であった。そこで宇宙線望遠鏡実験が計画された。

#### 1-4 宇宙線望遠鏡実験 (Telescope Array Project)

Telescope Array (TA) 実験は、AGASA 同様に空気シャワー中の粒子の測定と HiRes の手法である望遠鏡による大気蛍光の観測を同時に行う実験である。AGASA の 9 倍の感度を持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用いて非常に精度の高いデータを集め、得られたデータを使ってこれらの超高エネルギー宇宙線にまつわる様々な謎を解明することを目標としている。

地面に置いた粒子検出器(プラスチックシンチレータ検出器)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。(図 1-4)

大気蛍光望遠鏡を用いた観測は月ので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測定できる。

一方、地上粒子検出器による観測はエネルギー・到来方向の決定精度は若干落ちるが、観測効率がよく、より多くの超高エネルギー宇宙線(感度は AGASA の 9 倍)を捕まえることができる[4]。

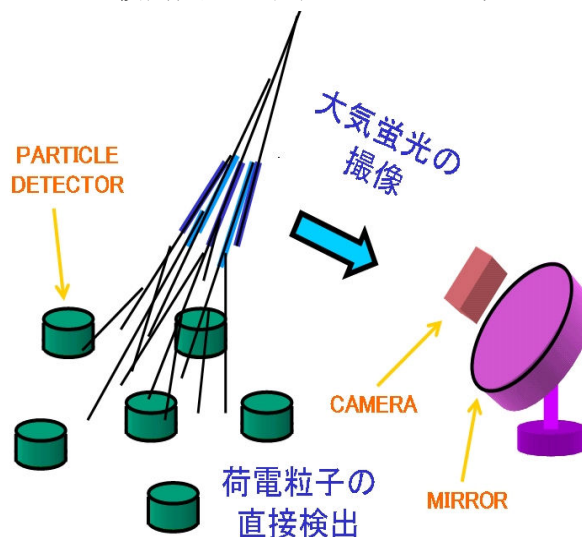


図 1-4 地表検出器と大気蛍光望遠鏡

観測装置は図 1-5 にあるようにアメリカのユタ州ミラード郡の標高 1400メートルの西部砂漠地帯に設置する。この地帯の気候は乾燥して透明度及び晴天率が高く観測に適している。30 km×30 kmの四角い領域内に荷電粒子を検出するプラスチックシンチ



レータ検出器576台を1.2 km ずつ離して、24×24の碁盤の目のように配置する（緑色の点が地表検出器の設置予定箇所）。大気蛍光観測のための反射望遠鏡ステーションは、図1-5の紫色の部分に設置する。

TA（宇宙線望遠鏡）計画において、問題となるのが、荷電粒子検出器の電源である。30 km×30 kmの範囲内に576台の検出器を置くので、1箇所が発電を行い各検出器まで電力を供給するのは、コスト等の面から不向きであり、各検出器それぞれに独立型の発電装置を取り付けることが望ましい。

また長期間連続して稼動するために、途中で燃料の供給が必要になるものや、整備が必要になる電力供給装置では作業等の面から効率が悪い。そこで、独立型の電源として太陽光発電を使用する。

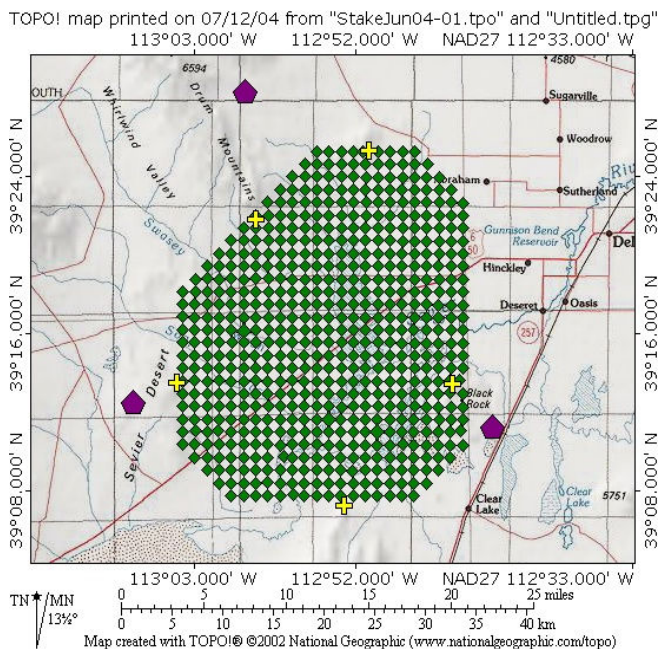


図1-5 TA実験検出器配置図

### 1-5 地表検出器(Surface Detector)

図1-6が地表検出器(SD)の1台である。ステンレスで覆われた平たい箱の中(以後シンチボックスと呼ぶ)には、宇宙線を光に変換するためのプラスチックシンチレータ、シンチレータにより得られた光を伝達するための光ファイバー、光ファイバーにより運ばれた光信号を電気信号に変換するための光電子増倍管などが入っている(図1-7, 図1-8)。

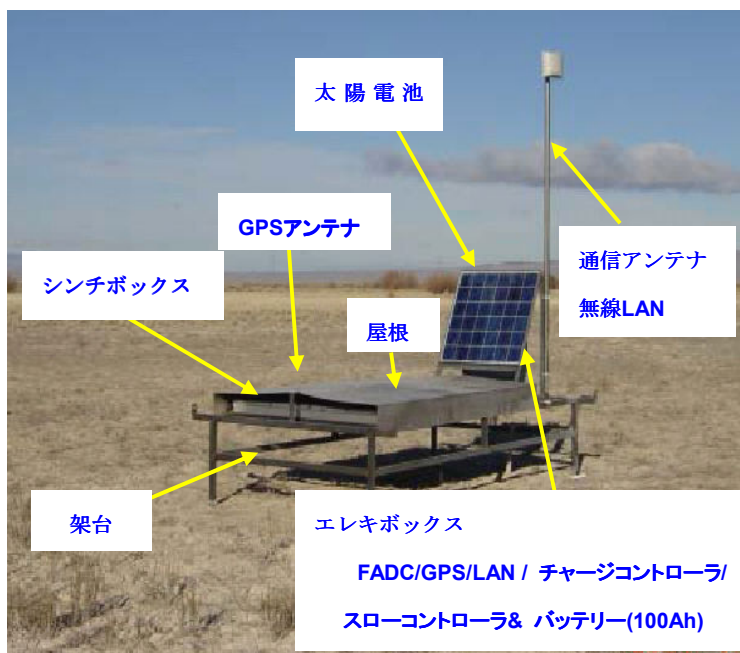


図1-6 地表検出器外観

またソーラー電池パネルの下にエレキボックスがあり、電源供給のためのバッテリー、システム制御用の電気部品や回路が収納されている。

空気シャワー観測の大まかな流れは次の様である。

- 1 シンチ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し、光に変換される。
- 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により伝搬されて集約された光を、光電子増倍管により電気信号に変換する。
- 4 3によって得られた電気信号をデジタルデータに変換して無線により集計基地まで飛ばす。

ここでシンチ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。

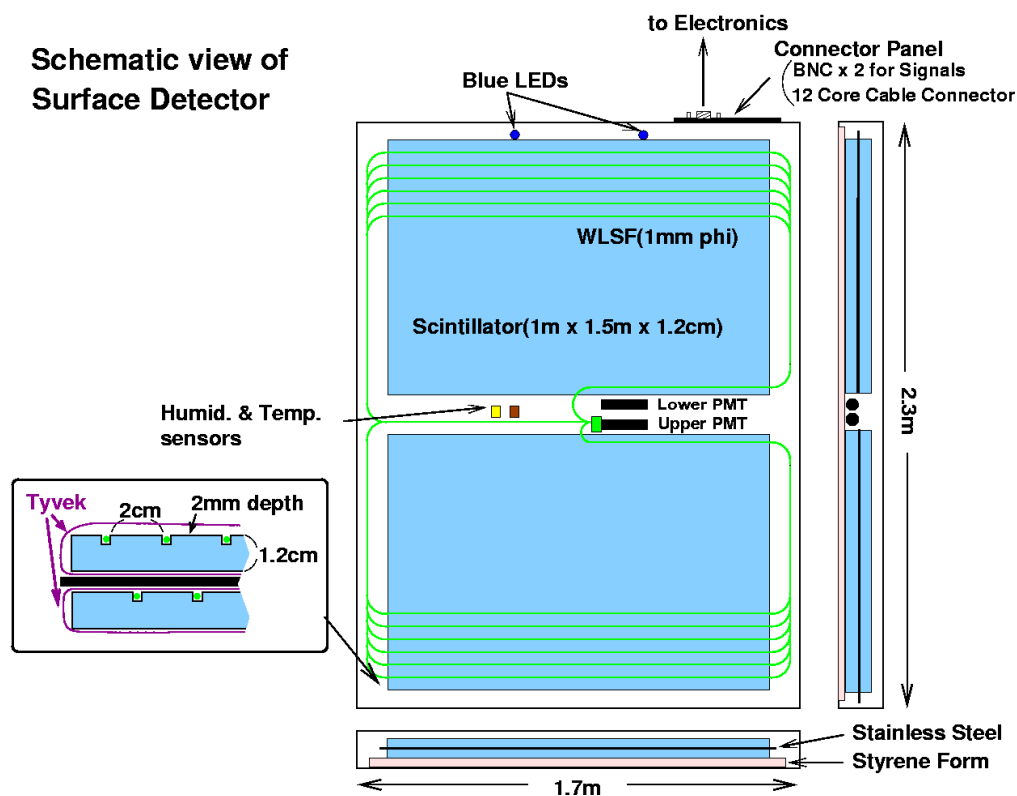


図 1 - 7 地表検出器の検出部概略



図 1-8 地表検出器の検出部写真

図 1-8 のブルーの半透明板がプラスチックシンチレーターである。プラスチックの中に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。また図 1-6 はシンチボックスの内部構造を示した図である。プラスチックシンチレーターの一枚につき 13 本の溝が作られており、その溝に光ファイバーを張る。プラスチックシンチレーター 4 枚で上の図のような 1 面を構成する。この面が左右上下に作られるので、SD 一台は 4 面で構成されることになる。そして上段 (upper) の左右 2 面、下段 (lower) の左右 2 面の光信号は、それぞれ一つの光電子増倍管に伝達される。つまり upper 用の光電子増倍管、lower 用の光電子増倍管の二つで一台の SD を構成する。

### 1-6 地表検出器の電力使用および供給

まず、電力消費の内訳の想定値を表 1-1 に示す。

よって多く見積もって 5 W の電力が必要になる。宇宙線望遠鏡計画では地表検出器を常時稼働させる必要があり、5 W を実験期間中昼夜問わず継続的に供給しなければならない。ここで問題になるのがその方法である計画実験地は米国の国立公園であり、広大な荒野で実験地を網羅するほどの電力線も無いからである。そこで考案されたのが太陽光発電による独立型電力供給システムである。その流れを図 1-8 に示す。

表 1 - 1 電力消費の内訳想定値

名称	用途	電力消費
光電子増倍管 (PMT)	光を電気信号に変える	0.48W
FADC(LAN を含む)	PMT のアナログ信号をデジタル信号に変換する	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
チャージコントローラ	バッテリーへの過充電や夜間の電流逆流、過放電を防ぐ	0.1W
合計		5.18W

図 1 - 9 について電力の流れを追って説明する。まず太陽光発電パネルで発電された電力はパネル裏のステンレス製のエレクトロニクスボックス内にある SD エレクトロニクスのチャージコントローラによってバッテリーに負担無く充電できる電圧へと調整される。ステンレス製のエレクトロニクスボックス内にはバッテリー保温用クーラーボックスが入っているのだが、調整された電力はこのクーラーボックス内にある小型エレクトロニクスを介してバッテリーに充電される。また任意でバッテリー保温用のヒーターを使用することができる。

## 1 - 7 研究目的

独立型電力供給システムにおいて使用される機器の性能の調査を行い、電力供給のシミュレーションを作成する。そのシミュレーションを用いて、電力消費の効率化を図り地表検出器を長時間連続稼働させるための条件を検討する。



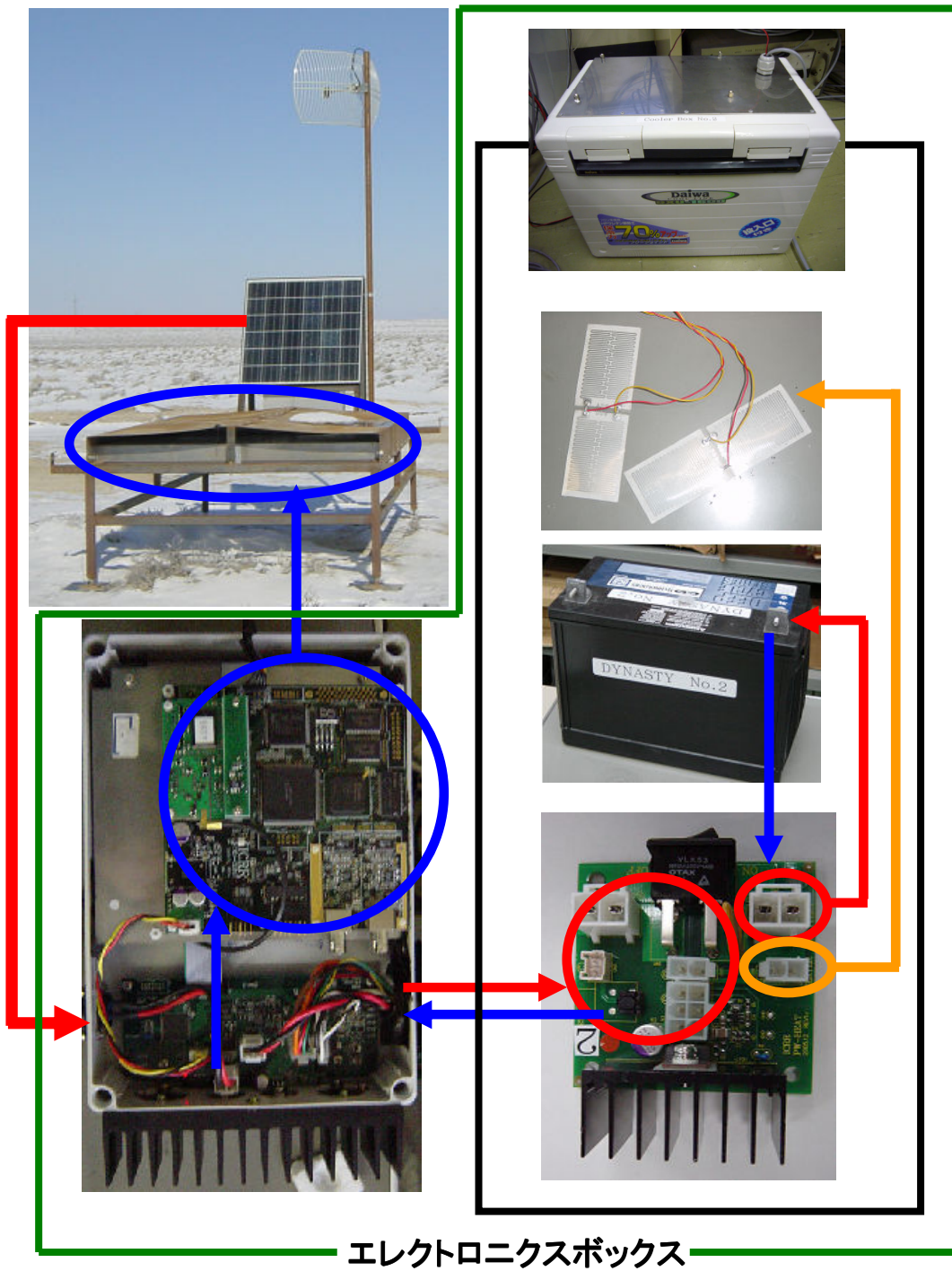


図 1 - 9 独立型電力供給システム

## 第2章 太陽光発電パネル

地表検出器（SD）では KC120J、KC125TJ の二種類の太陽電池を使用しており、共に KYOCERA 社製である。またエンジニアリングの一部 SD では、米国の SHARP 社製の ND-L3EJE も使用している。ここでは SD の電源をすべて賄っている太陽光発電パネルについてまとめる。

### 2-1 KC120J-KC125TJ

はじめに SD 全体の半数ずつに使用されている KC120J と KC125TJ について比較してみる。KC120J に比べ KC125TJ の方が出力は大きくなっている。ここで図 2-1 に 2 種のパネルの写真を載せておく。



図 2-1 KC120J (左) と KC125TJ (右)

左の KC120J の方が光沢が強く、鮮明な青色である。Kyocera に問い合わせたところこれは KC125TJ が表面にプラズマと反応性ガスによってミクロン単位の微細な凹凸をつくり、太陽光の反射を少なくし、より多くの太陽光を吸収することで発電効率を高めたためだそう。これらの仕様を表 2-1 に示す。

表 2-1 KYOCERA 社製太陽光発電パネルの使用

	KYOCERA 社製	KYOCERA 社製
型式	KC120J	KC125TJ
最大出力	120 W	121 W
開放電圧	21.5 V	21.7 V
短絡電流	7.45 A	8.00 A
最大出力動作電圧	16.9 V	17.4 V
最大出力動作電流	7.1 A	7.2 A
質量	11.9 kg	11.9 kg

表 2-1 の項目について説明する。

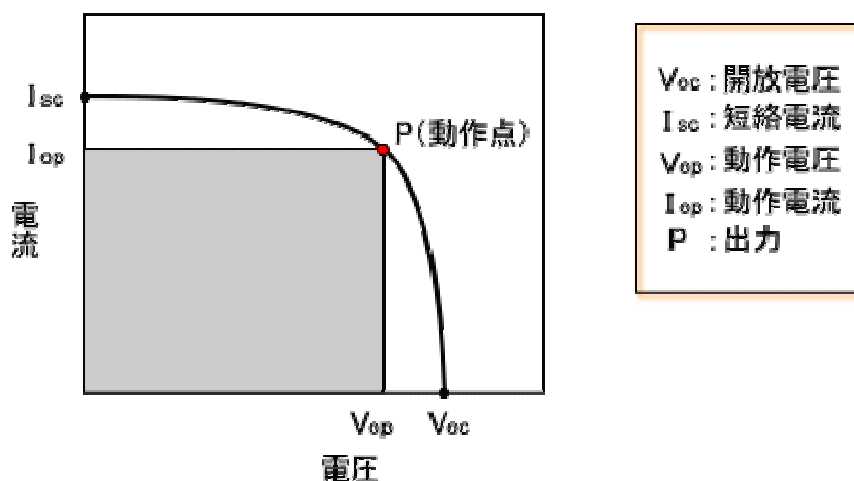


図 2-2 太陽電池出力特性

一般に太陽電池の出力は、図 2-2 に示すように、発生する電圧と電流の相関関係曲線で表される。太陽電池の出力は  $I_{op}$  と  $V_{op}$  と原点を結ぶ面積（上図のグレー部分）で示される。太陽電池を効率よく使うということは、グレー部分の面積を最大にする  $I_{op}$  と  $V_{op}$  を設定する必要がある。

開放電圧 ( $V_{oc}$ ) とは太陽電池に何もつながらない状態で、太陽電池の両端に発生する電圧を示す。短絡電流 ( $I_{sc}$ ) とは太陽電池の両端をショートさせた状態で流れる電流を示す。また、太陽電池の出力が最高となる動作点を最大出力動作点と言う。このときの出力を最大出力 ( $P_{max}$ )、電圧を最大出力動作電圧、電流を最大出力動作電流と呼ぶ。また仕様に表示されている値は、次のような一定の基準により測定した値で表されている。基準状態：モジュール温度  $25^{\circ}\text{C}$ 、分光分布：AM1.5、放射照度  $1000\text{W}/\text{m}^2$

モジュール温度とは、太陽電池モジュールは温度が上昇すると発電電圧が下がる特性がある。また、冷えると発電電圧が上がるといった特性を持っている。そのため、太陽電池の仕様を決めるにあたって、一定の温度で測定しないと比較にならない。そこで、25℃を基準状態としている。

分光分布とは、どのような波長分布の光を当てるかを規定したものである。太陽光は大気圏を通過することにより大気中のオゾンや水蒸気などにより、光の一部が吸収される。

AM (Air Mass : エアマス) とは大気通過量のことで AM1.0 とは光の入射角が 90 度 (真上) から入射した光を意味し、AM1.5 はその通過量が 1.5 倍 (入射角 41.8 度) での到達光を表している。

放射照度とは、1m<sup>2</sup> 当りに到達した太陽光エネルギーの強さを表し、単位は (W/m<sup>2</sup>) を用いる。大気圏外ではおおよそ 1400W/m<sup>2</sup> ある太陽光エネルギーも大気を通過して地表に到達すると 1000W/m<sup>2</sup> 程度になり、この 1000W/m<sup>2</sup> という値を、放射照度の基準状態としている。

## 2-2 ND-L3ELJE

次に本実験では使用しないが、エンジニアリングの一部で使用されている ND-L3ELJE についてまとめる。図 2-3 に ND-L3ELJE の写真、表 2-2 に使用を示す。

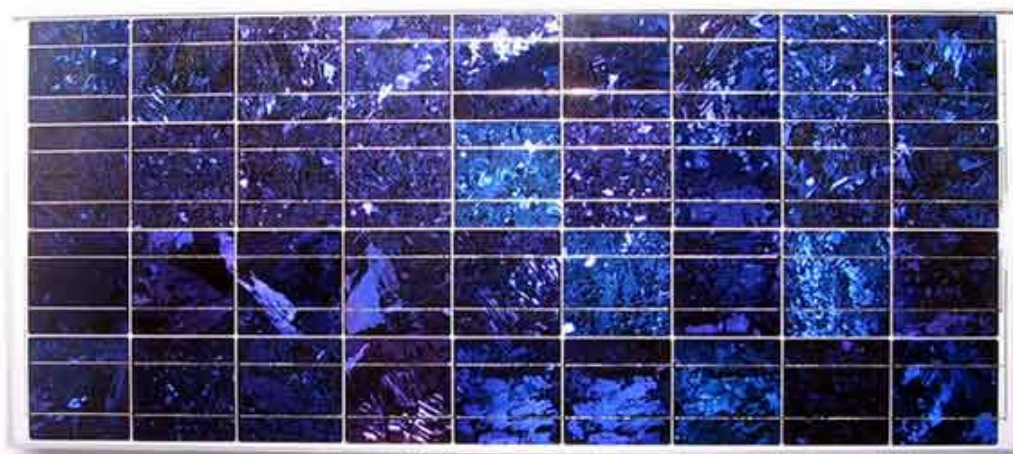


図 2-3 ND-L3EJE



表 2 - 2 ND-L3EJE の性能

型 式	ND-L3EJE
最大出力	123.0W
最大出力動作電圧	17.2 V
最大出力動作電流	7.16 A
開放電圧	21.3 V
短絡電流	7.90 A
外形寸法	1499 × 662 × 46 mm

これは本実験には使用されないが約 2 年のエンジニアリングを終え回収したモノの中に図 2 - 4、図 2 - 5 の写真のようにパネル裏に穴の開いたような破損が見られたことを報告しておく。



図 2 - 4 パネル裏面の破損 1 (ND-L3EJE)



図 2 - 5 パネル裏面の破損 2 (ND-L3EJE)

## 2-3 実験システム

### 2-3-1 発電データ取得装置

実験は山梨大学A-1号館屋上で行った。太陽光発電パネル(KC120J)を屋上にSD設置時と同様に仰角0°Cと60°で設置し、チャージコントローラSS-10L-12Vを介してバッテリー(日本電池社製SEB-100)に充電し、その充電量を記録するものである。また、太陽光発電パネルの発電量は日射強度の大きさによるので、同時に気象観測機(米国DAVIS社製「バンテージプロ」)使用し日射強度も記録している。

※バッテリー(日本電池社製SEB-100)は地表検出器で使用するものとは異なっているが、実際に使用するDYNASTY製DCS-100Lと同じ容量のものを使用している。図2-6に実験システムの概略を示す。

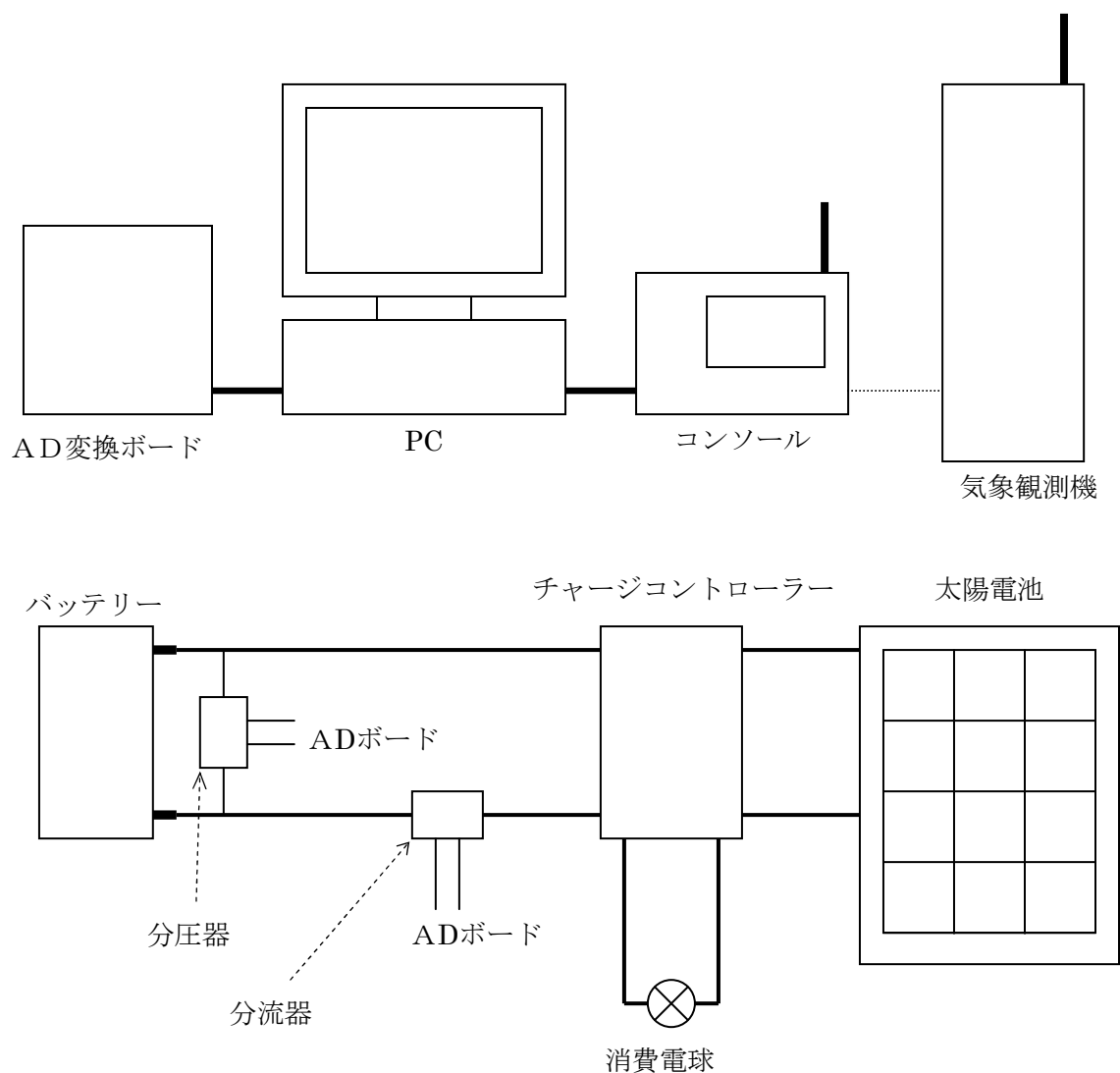


図2-6 発電試験と気象試験

### 2-3-2 気象観測機

気象観測装置は、米国 DAVIS 社製の気象観測セット「バンテージプロ」を使用した。

セット内容は気象観測装置、コンソール、気象情報管理ソフトの三点で構成される。

図2-7に示すのが気象観測装置の本体である。この観測装置で測定できる気象条件は風速、風向、雨量、気温、湿度、気圧、日射である。観測によって得られた気象データは無線で図2-8に示すコンソールへ送られる。また、図2-9は本体につけられている日射計である。

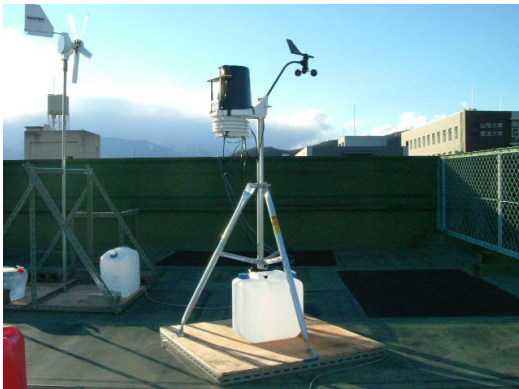


図2-7 気象観測装置



図2-8 コンソール

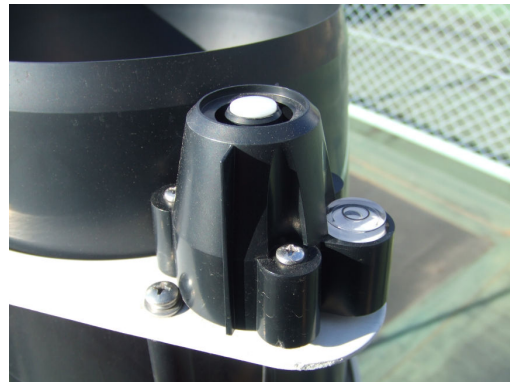


図2-9 日射計

無線で送ることができる距離は、45m～150mほどであるが、この距離は、障害物次第で大きく変わる。1回の研究室までは送信できないので、屋上から4階CAD室までデータを送信している。無線電波を発信するための電源は、昼間は付属の（10cm四方の）太陽電池で発電した電力、夜間は内蔵のリチウム電池を使用する。コンソールは、データ送受信の他に、ディスプレイにリアルタイムの気象状況の表示が可能である。また、気象観測装置からの気象データを暫定的に保存できるが、容量が限られている。一分毎の観測で、容量はおよそ一週間分のデータの保存が可能である。実際には一日に二回決められた時刻に

PC がコンソール内のデータを取り込んでいるので、この容量がいっぱいになることはない。コンソールから PC に取り込まれたデータはウェザーリンクという専用のソフトで管理される。このソフトは、リアルタイムの気象状況の表示、気象データの保存、編集、気象データのグラフの表示等が可能である

## 2-4 取得データ

上記の実験装置で得られるデータについて解説しておく。  
 まず、以下に取得したデータの例 (2006/4/22~25) をプロットする。また、この例はパネル角度を0℃としたものを使用している。

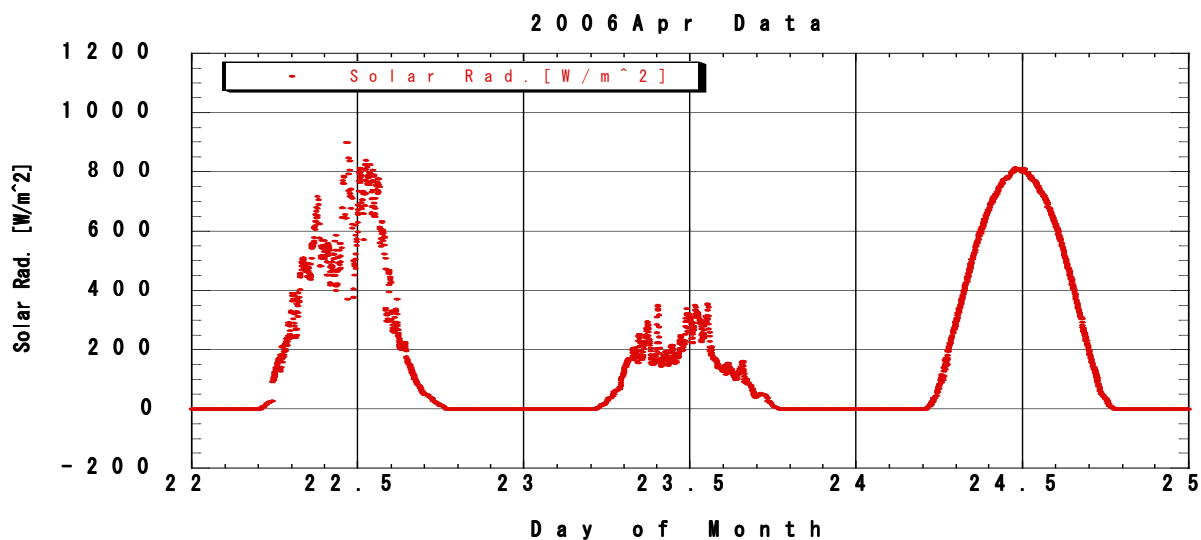


図2-10 日射強度

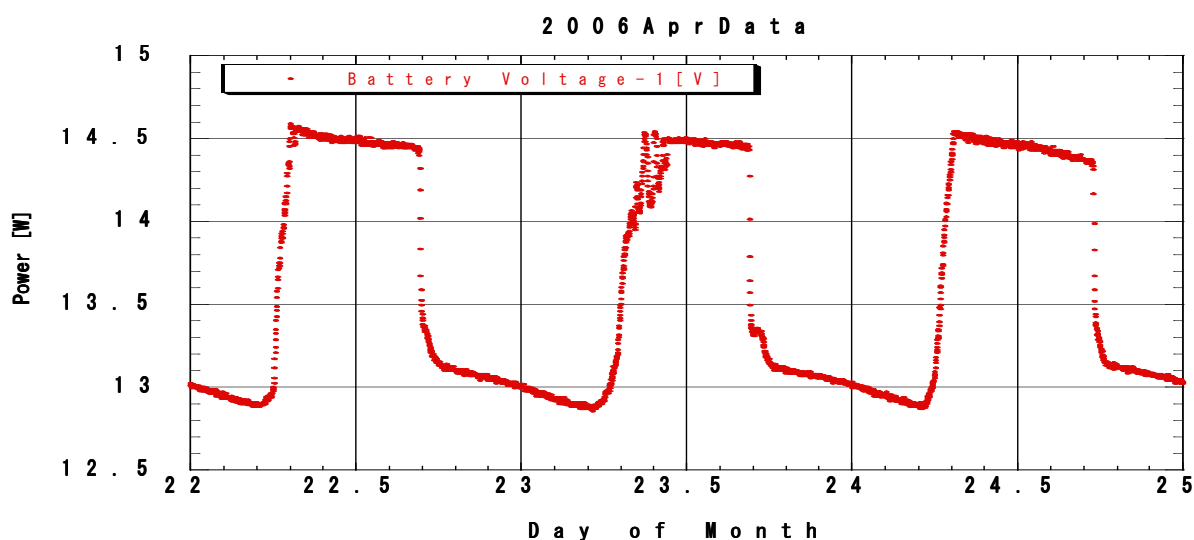


図2-11 Battery 電圧



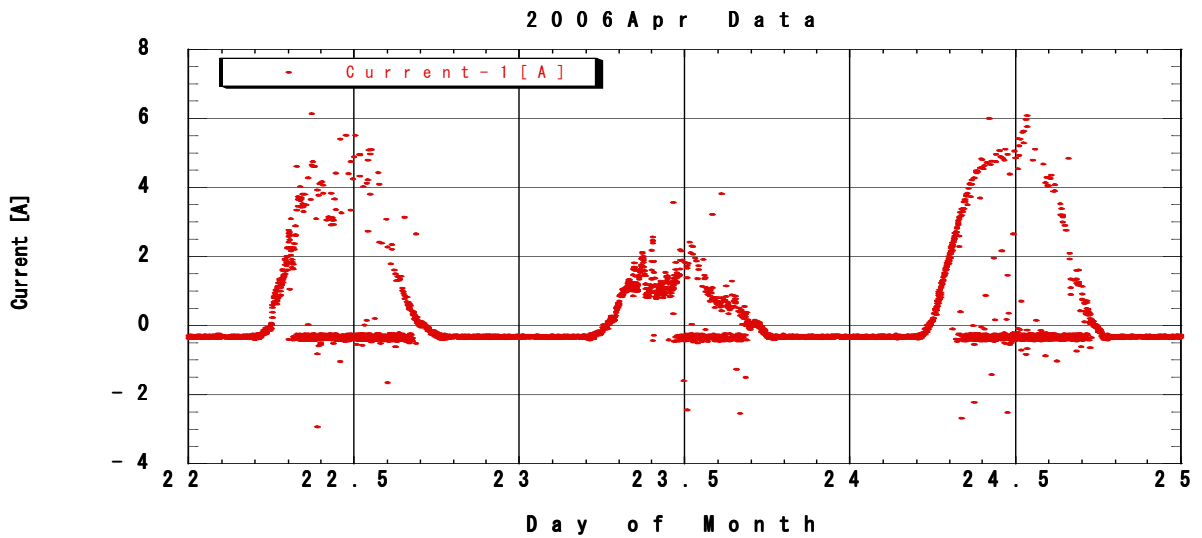


図 2-12 発電電流

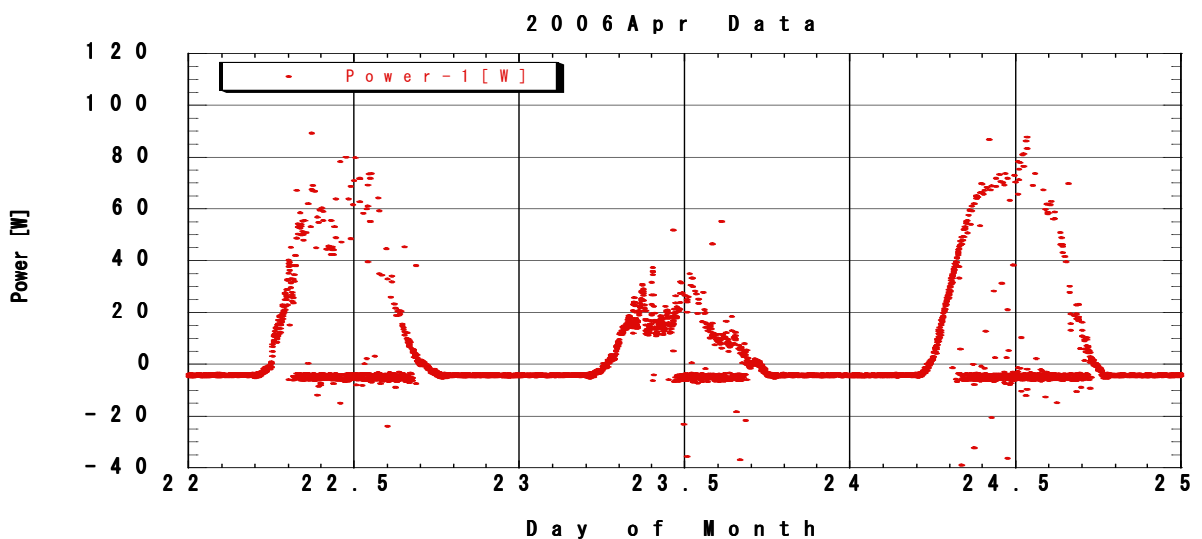


図 2-13 発電電力

日射強度とは  $1 \text{ m}^2$  に入射する太陽光エネルギー量である。これより 2006/4/22 と 4/23 は共に晴天でなく、特に 23 日は天候が非常に悪かったことが窺える。その影響は発電データにも出ているのだが、電圧値には実験でも使用しているチャージコントローラによって上限があるために 22 日にはあまり見ることができない。チャージコントローラとは不安定な電力を調整するなどして、バッテリーの充放電を制御するものである。これについては次章に記す。ここで日射強度と発電電力の間に相関がある点に注目する (図 2-10)。ベースラインが負を示しているのはバッテリーを消費するために 5 W の電球に接続しているためであり、日射強度が十分にあるにも関わらずその値を示しているのはバッテリーが満充電になったことでチャージコントローラの機能によって充電を停止しているためである。

また日射強度が  $600\text{W/m}^2$  以上になると発電の効率が低下してくる、これもチャージコントローラによるものである。その部分を取り除き線形変化している部分をまで延長すると  $1000\text{W/m}^2$  で  $113\text{W}$  の発電がある。今回使用している太陽光発電パネル (KC120J) は基準状態 (モジュール温度  $25^\circ\text{C}$ 、分光分布 : AM1.5、放射照度  $1000\text{W/m}^2$ ) で  $120\text{W}$  発電するので、若干その値よりも小さい。これもまたチャージコントローラの影響であり、その稼動のために消費されているためである。ともあれ、チャージコントローラを介しても日射強度と発電電力の相関がはっきりと見られることが判明したので実験解析にはこの線形変化の部分のデータを用いることとする。

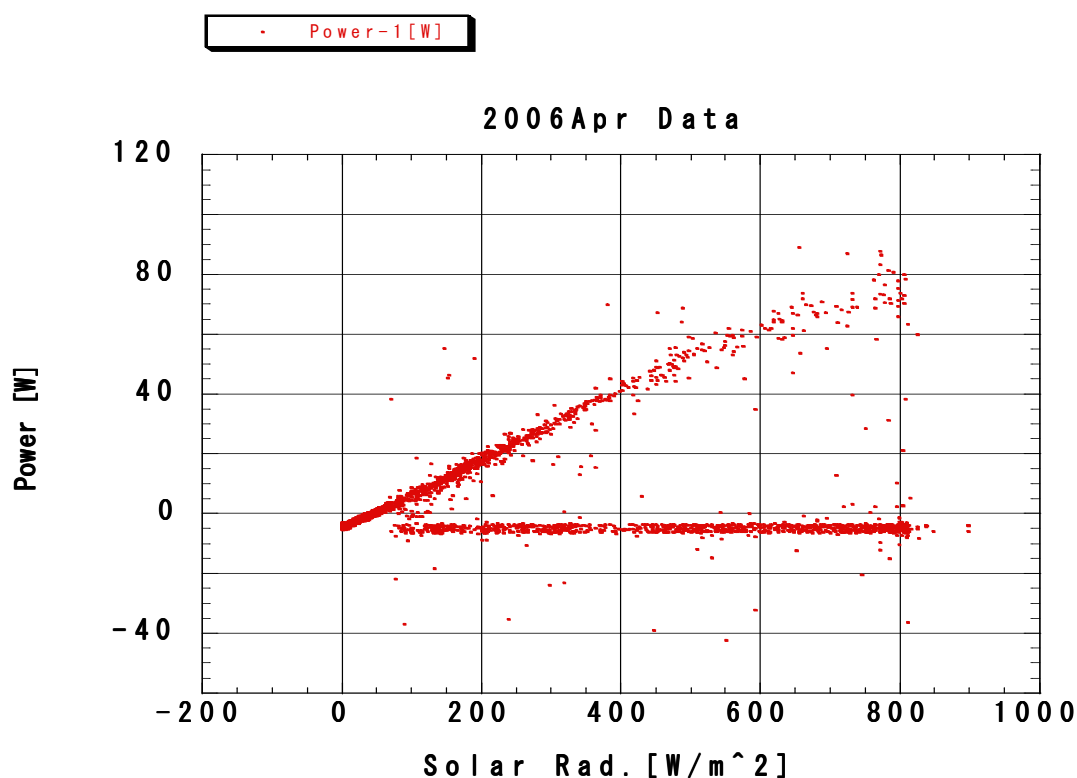


図 2-14 日射強度-発電電力

## 2-5 仰角 $60^\circ$ 設置パネルの解析法

前項では仰角  $0^\circ$  に設置したデータを例としたが、地表検出器には仰角  $60^\circ$  で設置されており、本実験でも同様に設置したデータも採取している。しかし、仰角  $60^\circ$  に設置したパネルの発電電力と日射強度の相関をとる上で大きな問題が1つある。それは図 2-5 の通り日射強度のデータは仰角  $0^\circ$  に設置した水平な面で計測しているため、仰角  $60^\circ$  のパネルの受ける日射強度とは異なっている点である。そのため日射強度を  $60^\circ$  相当に換算するか、発電電力  $0^\circ$  相当に換算する必要がある。具体的には太陽位置と仰角  $0^\circ$  と  $60^\circ$  の単位面積に対する垂直面積を求め、その比を利用し換算する。

### 2-5-1 太陽位置と垂直面積の算出

任意の日付、時間、観測地における太陽方向に対する垂直面積を計算によって求める方法についてまとめる。

- ・北緯 ( $\phi$ )
- ・東経 ( $L$ )
- ・中央標準時 ( $T_s$ )
- ・中央標準時子午線 ( $L_s$ )
- ・太陽赤緯 ( $\delta$ )

$$\delta = 0.33281 - 22.984\cos(\omega J) - 0.34990\cos(2\omega J) - 0.13980\cos(3\omega J) \\ + 3.7872\sin(\omega J) + 0.0325\sin(2\omega J) + 0.07187\sin(3\omega J)$$

$$\ast \omega = 2\pi/365 \quad \text{閏年は} \quad \omega = 2\pi/366 \quad J = \text{元日からの通算日数} + 0.5$$

- ・均時差 ( $e$ )

$$e = 0.0072\cos(\omega J) - 0.0528\cos(2\omega J) - 0.0012\cos(3\omega J) \\ - 0.1229\sin(\omega J) - 0.1565\sin(2\omega J) - 0.0041\sin(3\omega J)$$

$$\ast \omega = 2\pi/365 \quad \text{閏年は} \quad \omega = 2\pi/366 \quad J = \text{元日からの通算日数} + 0.5$$

- ・真太陽時 ( $T$ )

$$T = T_s - (L - L_s) / 15 - e$$

- ・時角 ( $t$ )

$$t = 15 \cdot T - 180$$

- ・太陽高度 ( $h$ )

$$\sin h = \sin \phi \cdot \sin \delta + \cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \cos t$$

- ・太陽方位角 ( $A$ )

$$\cos A = (\sin h \cdot \sin \phi - \sin \delta) / (\cos h \cdot \cos \phi)$$

この時、太陽の座標は次のようになる。

- ・有効面積率  $R_A$
- ・面積の仰角  $\theta$
- ・面積の真南からの方位角のズレ  $\phi$
- ・パネルの単位法線ベクトル

$$\begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos A \cdot \cos h \\ \sin A \cdot \cos h \\ \sin h \end{bmatrix}$$

パネルの有効面積率は太陽の位置座標とパネルの単位法線ベクトルの内積なので

$$R_A = \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_v \\ y_v \\ z_v \end{bmatrix} = -\sin \theta \cdot \sin \phi \cdot \cos A \cdot \cosh \\ - \sin \theta \cdot \cos \phi \cdot \sin A \cdot \cosh + \sinh \cdot \cos \theta$$

となり

- ・ パネルの受ける日射強度  $SR_R$
  - ・ Delta 実測の日射強度  $SR_D$
  - ・ 水平時の有効面積  $RA_0$
  - ・ パネル角の有効面積  $RA_X$
- とすると

$$SR_R = (RA_X / RA_0) \times RS_D$$

となる。

### 2-5-2 計算値の精度

ここでは太陽位置、日射強度換算の比の決定精度について、日射強度の挙動などの実測値より検証する。

まず太陽位置についてだが、これは早朝の日射強度の変化と実験地である山梨大学東部の地形より検証する。図 2-15 に早朝に頻繁に見られる日射強度の変化の例を示す。

この変化は時間帯に関しては時期によるが日射強度はほぼ一定の値に達した際に発生する事が確認されていた。日射強度の急激な上昇、このような現象は他には悪天候の際に降下と共に見られる。しかし、例のような晴天の際には雲も無いために他にはほとんど見られない。これは日光が雲により遮られるために起こっていると考えられる。つまり早朝の変化も同様に遮られていた直射日光の障害物を取り除かれたためであると推測される。晴天時の早朝に障害物として考えられるのは山梨大学 A-1 号館東部にある愛宕山のみである。そこで、愛宕山の測量を行い、その値と日射強度の変化の時間の太陽位置を前記の計算で求め比較した。測量には電子デジタルオセライド DT4A / DT4AS を用い  $0.5^\circ$  毎に行った。

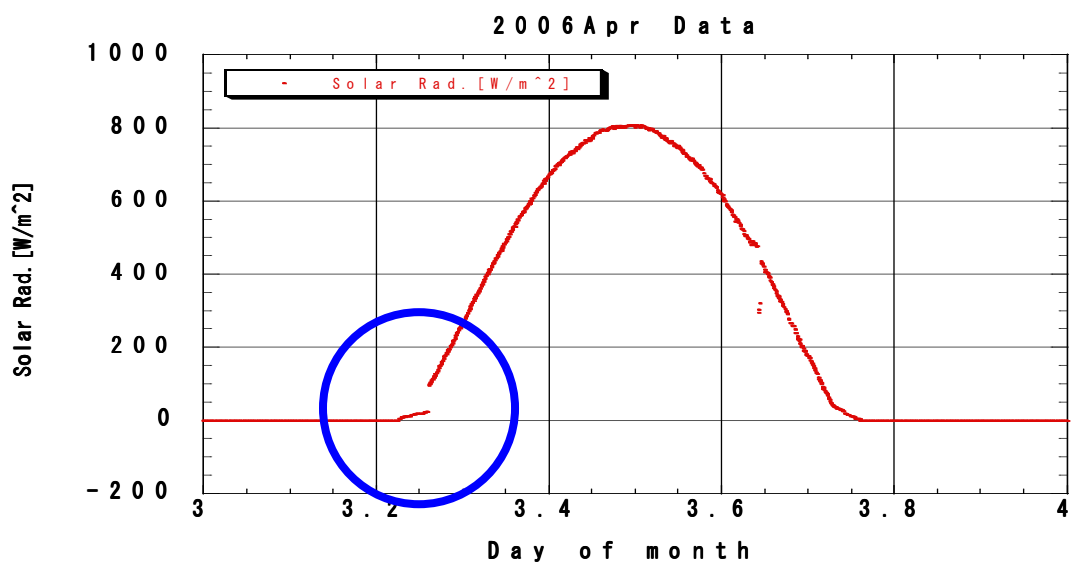
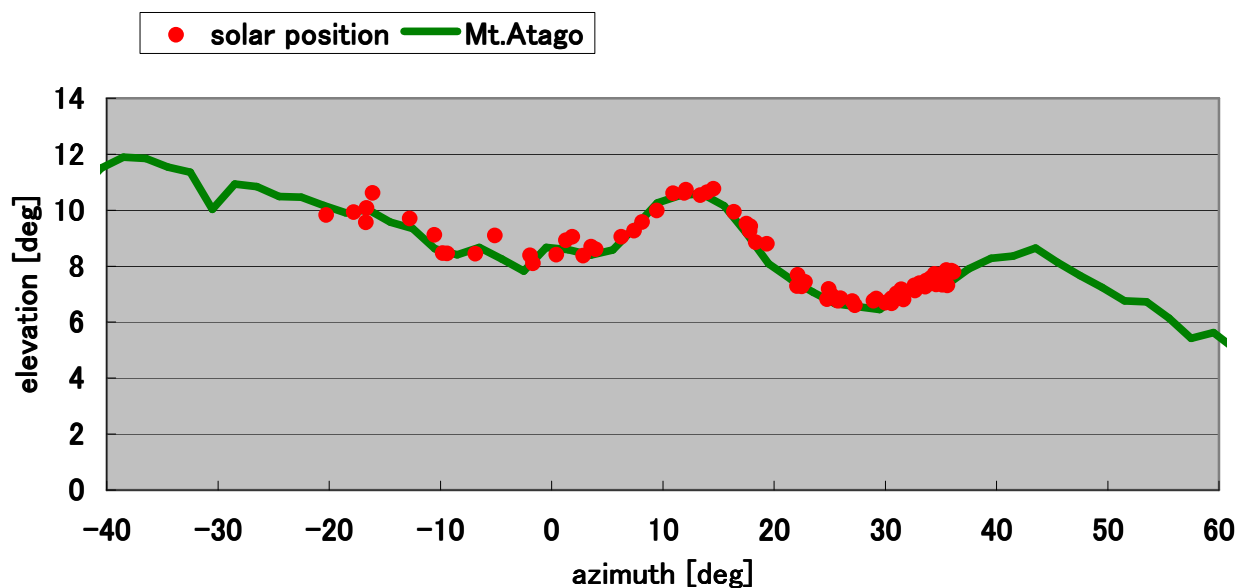


図 2-15 日射強度の挙動サンプル

双方を比較した結果が図 2-16 である。



※方位角(azimuth)は真東=0とし南を正とする。

図 2-16 愛宕山と太陽位置

このように愛宕山外形と日射強度急変時の太陽位置はほぼ一致しており、誤差は最大でも  $0.5^\circ$  以内、時間にして2分という精度で求められる事が判った。

表 2-3 電子デジタルオセライド DT4A / DT4AS 仕様

望遠鏡	
全長	165mm
有効径	45mm
倍率	30 倍
像	正像
分解力	3"
水平角測定	
方式	インクリメンタル方式(光電検出) 0 インデックス付き
最小表示	5"
高度角測定	
方式	インクリメンタル方式(光電検出) 0 インデックス付き
最小表示	5"
精度	水平 : 5"
	垂直 : 5"

次に日射強度換算の比についてだが、これは仰角  $60^\circ / 0^\circ$  の垂直面積の比と実測値である発電電力の比で検証してみる図 2-17。検証には前項の通り日射強度と発電電力が線形的に変化しており、かつ日射強度が  $600\text{W/m}^2$  以下の時のデータを用いている。

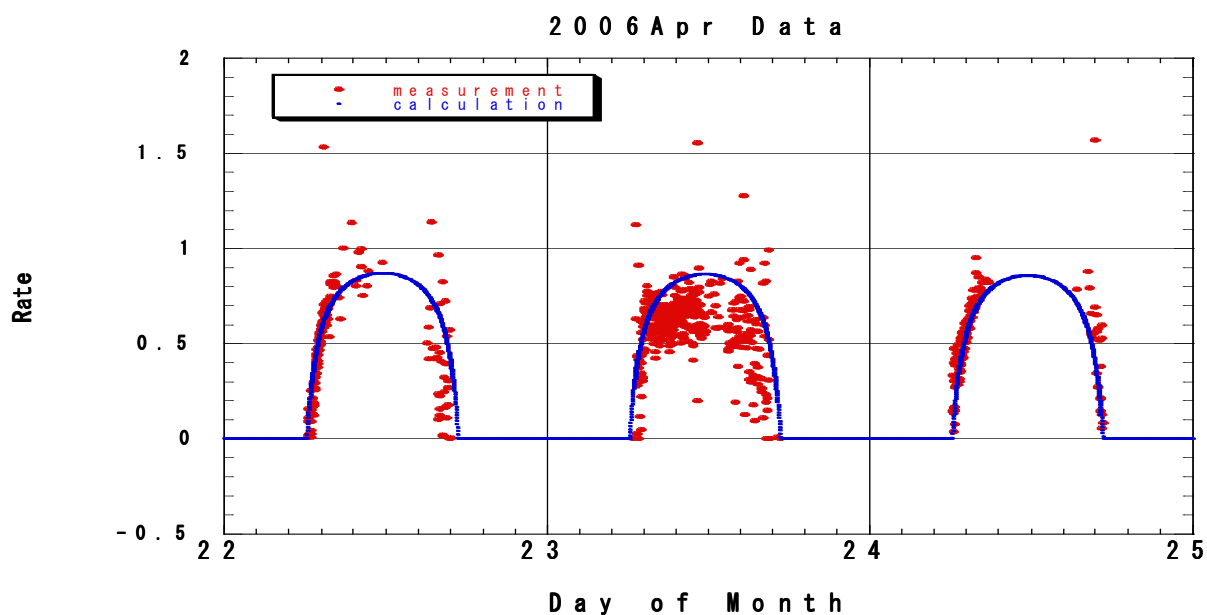


図 2-17 垂直面積の比と実測値の比

結果は非常に悪天候であった4/23は大きくばらつくものの、その他では理想的なものとなった。また悪天候も含めた中央地の誤差で、2006年5月で4%、同年8月で2%、同年12月で16%となった。12月の誤差が非常に大きい、これはパネルの仰角が大きく関わっている。冬期は日の出と共に仰角60°のパネルには大きい角度を持って日光が照射される、対して仰角0°のパネルには同時刻に小さい角度から照射されるここに、発電能力を超えた値が出てしまうために誤差が大きくなってしまっているのである。そこで、日の出、日の入りより20分のデータを取り除くと誤差は3%まで改善された。また比を逆に0°/60°とした場合も影響を受けなくなるので1%の誤差となった。

以上2つ検証より、仰角60°のパネルの解析も誤差5%以内で行えることが判った。そして換算を行った結果の例が図2-18である。

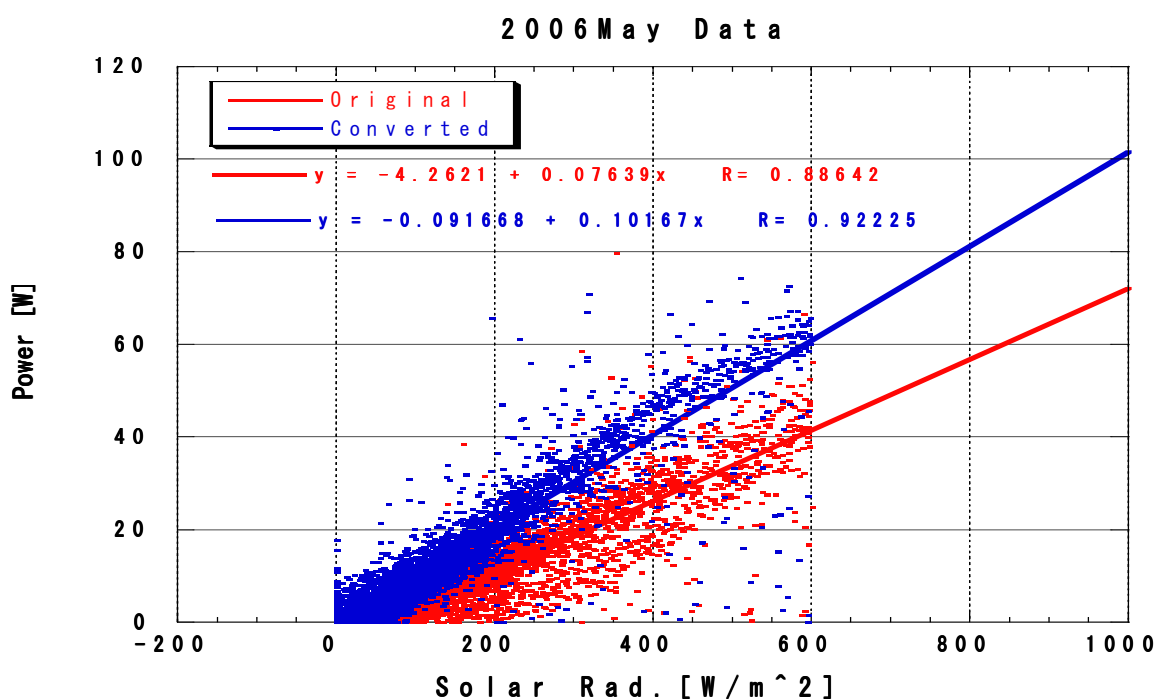


図2-18 日射強度換算の効果①

換算後には発電効率がKC120Jのスペックに近い値に改善されている。さらに換算後のプロットと同月の仰角0°の発電電力を並べたものが図2-19である。こちらを見てもプロット位置、回帰直線共に非常に近くなっており、換算の正確さが窺える。

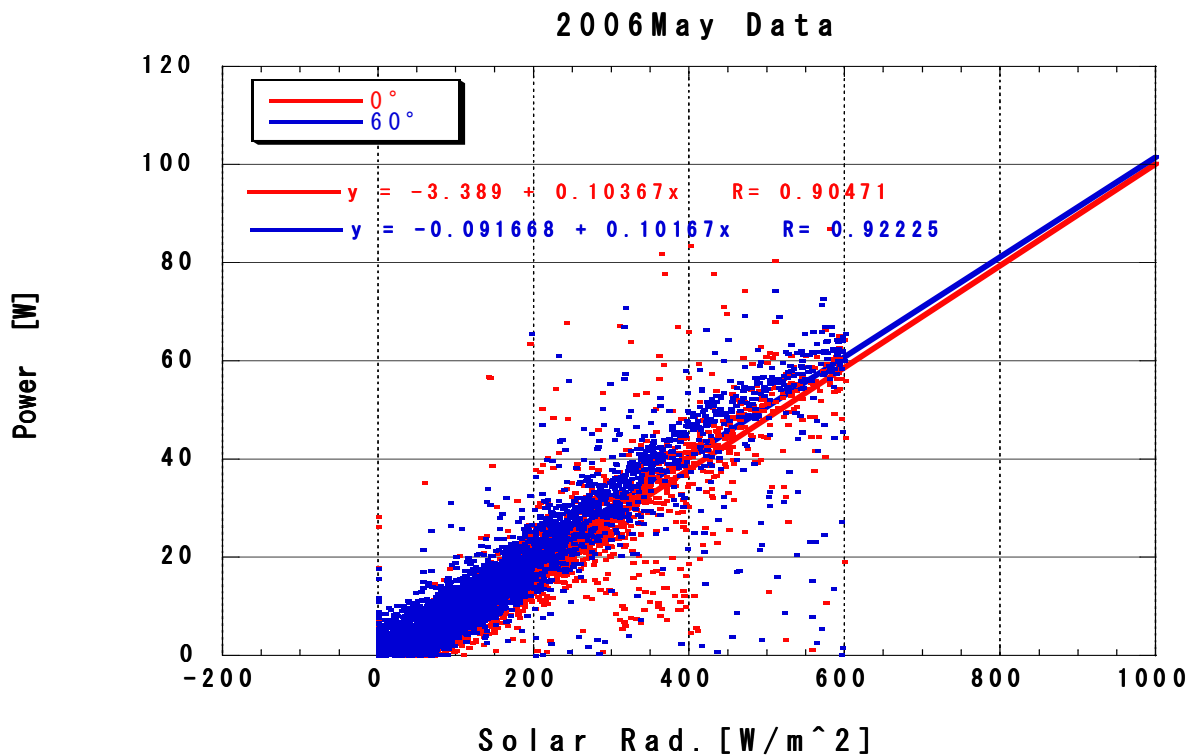


図 2-19 日射強度換算の効果②

## 2-6 パネル表面汚れの影響

本実験は非常に長期に亘って行われるため、徐々にパネル表面に砂などの汚れが蓄積することが考えられる。これが蓄積するとすれば発電量への影響も大きくなると予想される。以前、山梨大学では仰角 $0^\circ$ に設置したパネル（ND-L3EJE）で2005/4/20に黄砂の降り、翌日から発電電力が低下する現象が確認されている（図2-20）。宇宙線望遠鏡計画の実験地のものとは砂質に違いはあるが、その影響による日射強度に対する発電量に変化があるか地表検出器に設置する際と同じく仰角 $60^\circ$ に設置したパネル（KC120J）での発電を長期間継続して行い、その変化を追うことで調べた（図2-21）。実験期間は2005/6/1から2006/12/15である。結果は1年6ヶ月の間に月毎にばらつきはあるものの汚れの蓄積による発電量の大きな低下は見られなかった。これは仰角 $60^\circ$ に設置したことにより、雨天時に表面に付着した汚れが洗い流されるためのものである。



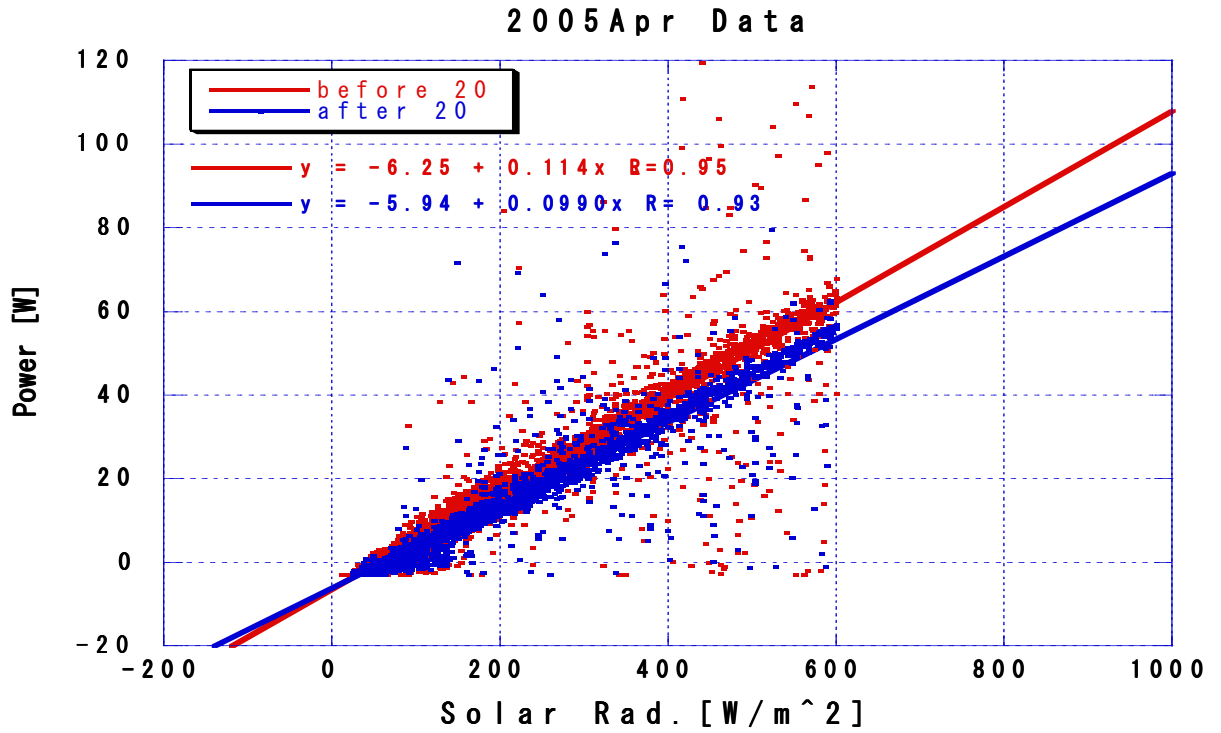


図 2 - 2 0 黄砂の影響

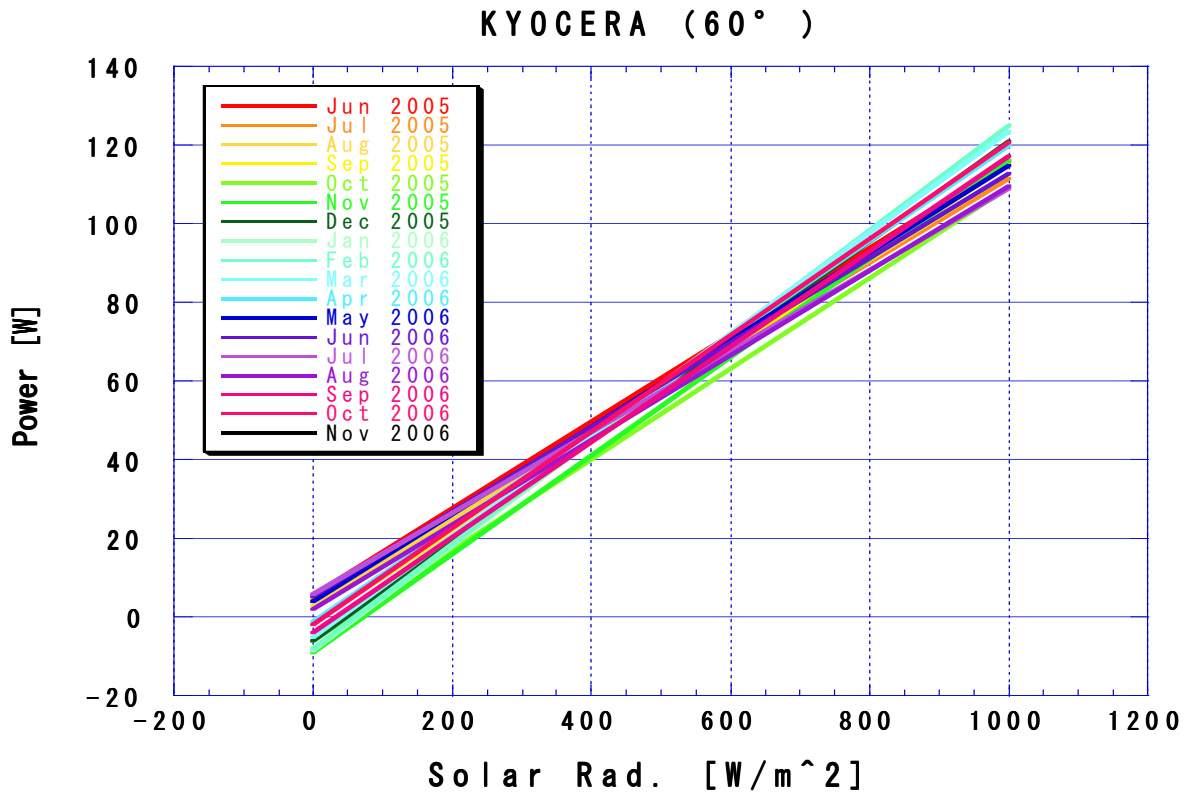
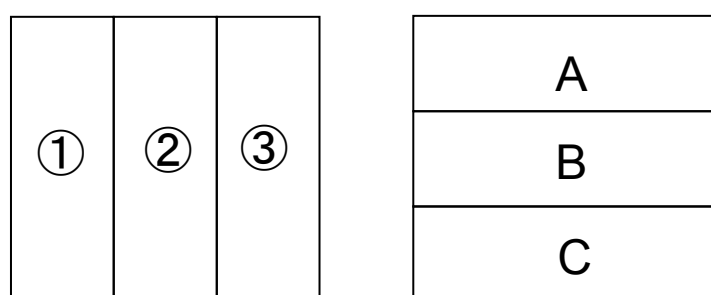


図 2 - 2 1 発電量の変化

## 2-7 遮蔽の影響

### 2-7-1 遮光試験

冬期になると積雪による Panel 表面の遮蔽が考えられる。また、図 2-5 のように何らかの原因で破損し一部のセルが機能しないことも考えられる。そこで発電面を遮蔽物で被い発電への影響について KC120J で調査を行った。実施日は 2007/3/9 である。遮蔽した面積を分かりやすくするため、36 枚 (6×6) の太陽電池で構成されているパネルを 2 列毎に組分けし縦横それぞれ 3 つの組とし以下のように番号とアルファベットを割り振った。結果を表 2-4 にまとめた。



※ 裏面にある接続端子のある部分を上辺とする

図 2-22 パネルの区分け

表 2-4 遮蔽による発電効率の低下

Time	遮蔽部分	発電電力[W]	発電効率 [%]
9:01~9:09	①	12.222	19.3
9:11~9:19	①, ②	-0.75	0
9:21~9:29	close	-0.55	0
9:31~9:39	A	-0.44	0
9:41~9:49	A, B	-0.42	0
9:51~9:59	close	-0.5	0
10:51~10:59	close	-1.67	0
11:01~11:09	B, C	-1.15	0
11:11~11:19	C	-1.3	0
11:22~11:29	open	73.15	100
11:31~11:39	close	-1.62	0
11:41~11:49	②, ③	-0.93	0
11:51~11:59	③	9.7	13.2

遮蔽面積率と発電電力には相関は見られず、遮蔽された時点で発電は皆無となってしまいうようである。発電が唯一見られたのは縦方向に 33%（2 列分）遮蔽された状態であったが、それも本来の 20%未満であり通常の発電に遠く及ばなかった。この件について後日、岩本氏（本田研究室）が Kyocera に問い合わせたところ、やはり接続はセル 12 個（縦 2 列）が直列で繋がれており、1 枚の太陽電池が発電しなくなれば 12 個のセルが発電せず、残りのセル 24 個で発電はするものの充電するほどの高電圧は得られないとの回答であった。これより、一定以上の積雪の影響は非常に大きくなることが予想され、またパネルに損傷があった際には即時交換を必要とする事を示している。

### 2-7-2 DELTA での積雪の変化

遮蔽は直接、発電量に影響してくる事が判ったので、宇宙線望遠鏡計画の実験地（UTAH 州 DELTA、Cosmic Ray Center）で 2007/1/21 の積雪の残量の変化を追った写真を参考までに添付しておく（図 2-23）。この日は晴天ではあったが気温は終日氷点下であり 8、9、10 時台の平均気温はそれぞれ -10.0、-9.3、-8.6℃であったことや屋根などの他の場所の雪が融けていなかったことを考えると、少々融けるのが早いように感じられる。また、翌日以降はパネル下部には残雪があったものの表面からは 10cm ほど融けて離れており翌日以降は全面に日射が得られ十分な発電があったと推測される。

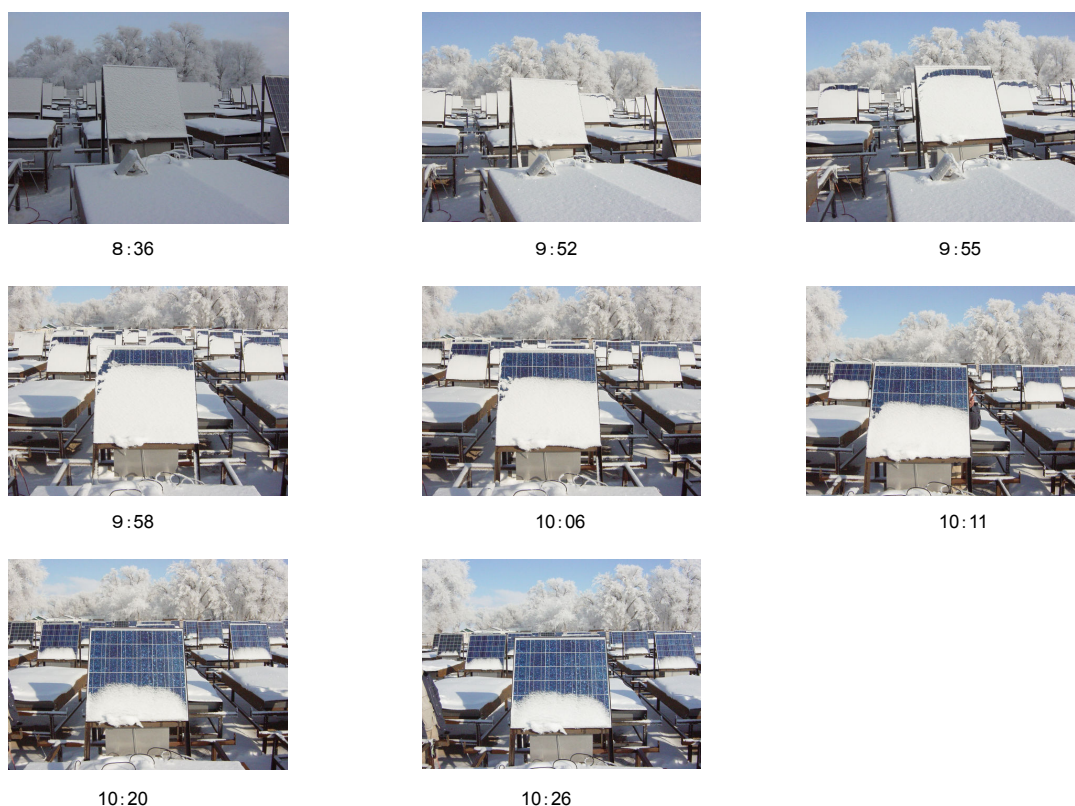


図 2-23 時間経過と残雪

## 2-8 太陽光発電パネルの温度変化

前述の通り日射が得られた際には、パネル表面は他の部分に比べ雪が早く融けるようである。これは太陽電池が日射によって熱を持つためである。図2-24はパネル裏面の温度の計測結果である。図中の色の違いはある KC120J と KC125TJ の結果である。宇宙線望遠鏡計画の実験地（UTAH 州 DELTA、Cosmic Ray Center）で2007/1/23より行った。温度計測はパネル裏面の上端下端それぞれから 10 cm に温度計（KNラボラトリーズ製 ThermoManager）設置して行った。温度は、夜間は外気温と全く同じであるが日射が得られると大きく上昇する。また KC120J と KC125TJ では KC125TJ の方が太陽電池の色が濃いのだがその違いは温度の差にはならないようである。

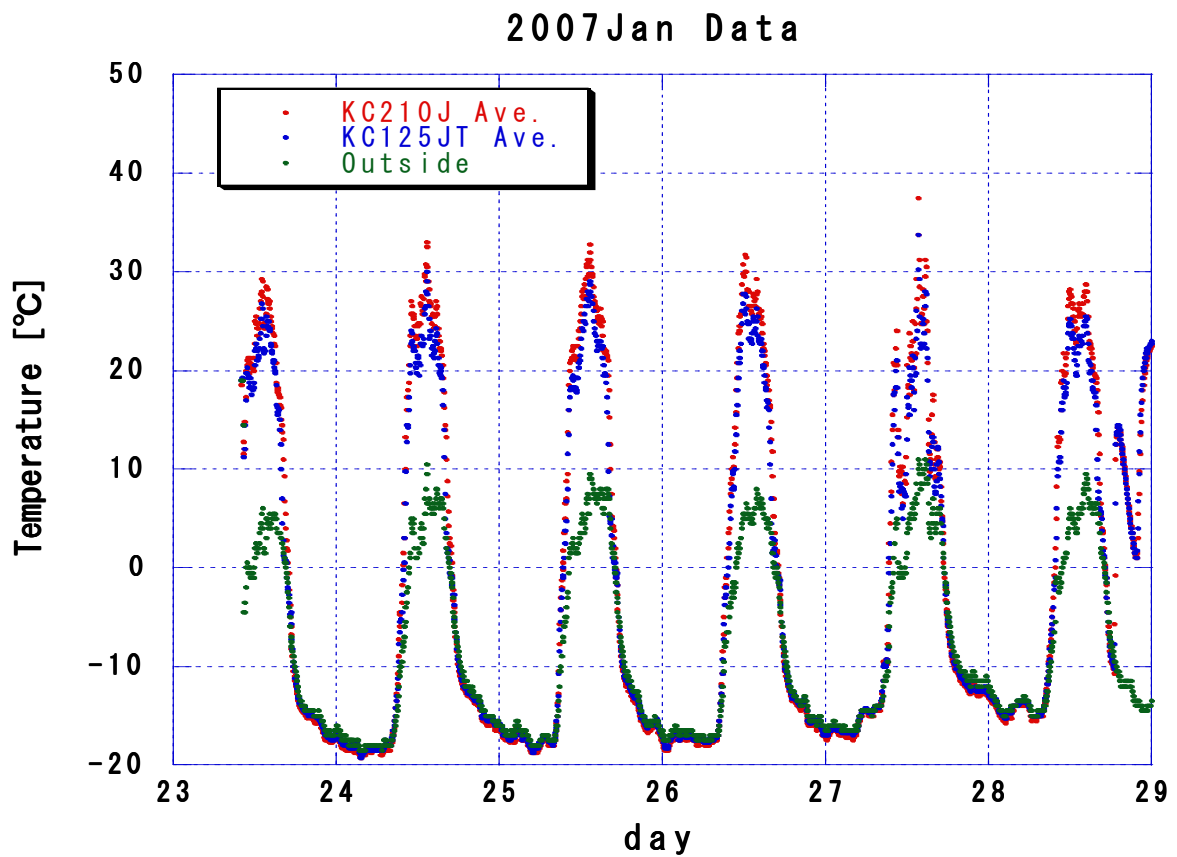


図2-24 パネルの温度変化

## 第3章 チャージコントローラー

チャージコントローラーとは、バッテリーには蓄えられる電力容量に限界を超えてバッテリーに電気を送ると、使用寿命を縮めるばかりではなく、バッテリー自体が破損してしまう。そこでバッテリーの電圧を監視し、満充電時には遮断、充電不足には接続といった動作を自動的に行なう装置である。

前章で太陽光発電パネルについてまとめたが、実際に逐電されるのはチャージコントローラー(C.C.)によって制御された電力である。ここでは、実際にSDに使用されるICRR製作されたC.C.と通信タワーなどで使用されるモーニングスター社製SS-10L-12Vの性能についてまとめる。

### 3-1 SD-チャージコントローラー

SD用C.C.はSDのエレキに含まれており、図3-1の□で囲まれた部分である。

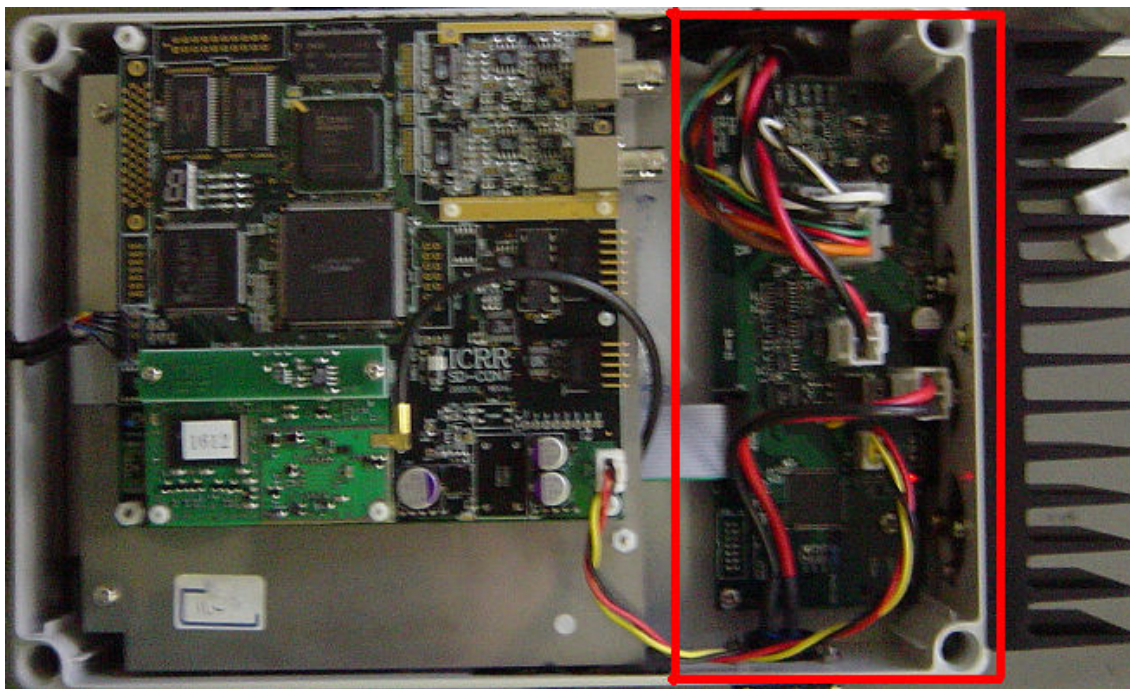


図3-1 SD-エレクトロニクス

C.C.の部分のみを図3-2に示す。



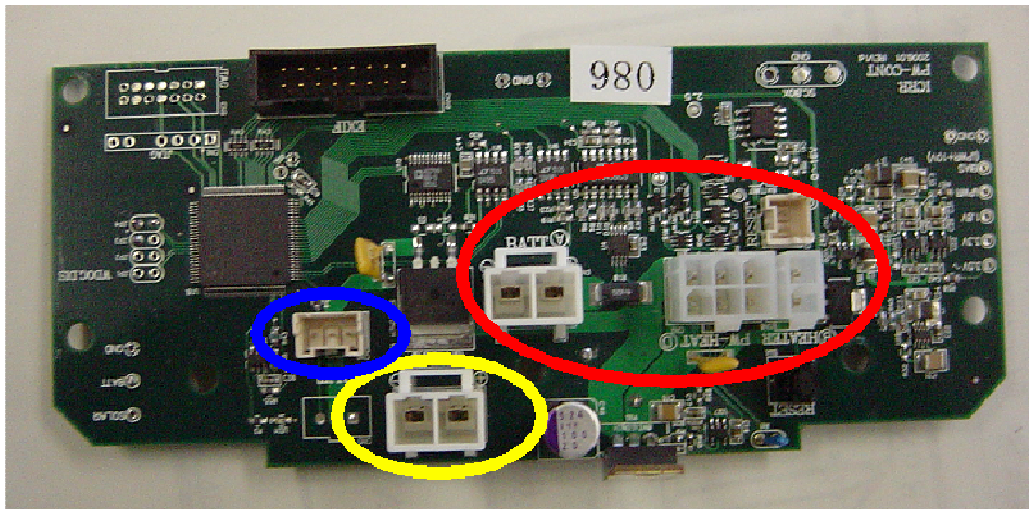


図 3-2 SD-チャージコントローラ

赤で囲まれた部分がバッテリー保護用クーラーボックス内にある小型エレクトロニクスからの接続端子であり、黄色が太陽光発電パネルとの接続である。また青はエレクトロニクス本体のメインボードに接続される。

### 3-2 SS-10L-1V

SS-10L-1V の外観を図 3-3 と仕様を表 3-1 に示す。

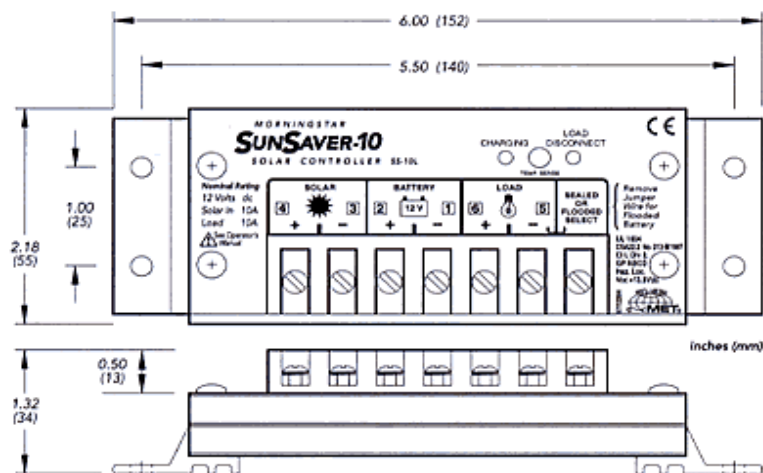


図 3-3 SS-10L-1V 概観

表 3 - 1 SS-10L-1V 仕様

型 式	SS-10L-12V
制御機能	充電・放電（同時稼働）
システム電圧	12VDC
太陽電池入力電流	10A
負荷電流	10A
充電方式	PWM
充電電圧（固定）	14.1V（密閉型）、14.4V（非密閉型）
負荷遮断電圧（固定）	11.5V
負荷再接続電圧（固定）	12.6V
周囲温度範囲	-40℃～+60℃
自己消費電流	8～10 mA
温度補正	-28mV/℃
夜間タイマー	--
逆流防止	不要
寸法（mm）	152×56×33
重量	230g

表 3 - 1 について説明する。

システム電圧とはシステム運転時の動作電圧のこと。今回の実験ではエレキ等の回路供給には 12VDC を使用するので、12 ボルトのバッテリーを使うシステムである。システム電圧は 12VDC となる。

PWM 充電方式：PWM とはパルス幅変調のことである。もしバッテリーが満充電になった場合（充電電圧 14.1V（密閉型））、過充電を防ぐため充電電流をパルス状（ON、OFF 状態）にして満充電の状態を維持するしくみである。つまり PWM 充電中に発電量が低下した場合は、パルス幅を広くしてより多くの電流を通過させ、発電量が増加した場合はパルス幅を狭くして電流の通過量を制限する。図 3 - 4 に示されているように、満充電になると PWM 充電に切り替わり、電流を制限して充電電圧を維持しているのが分かる。

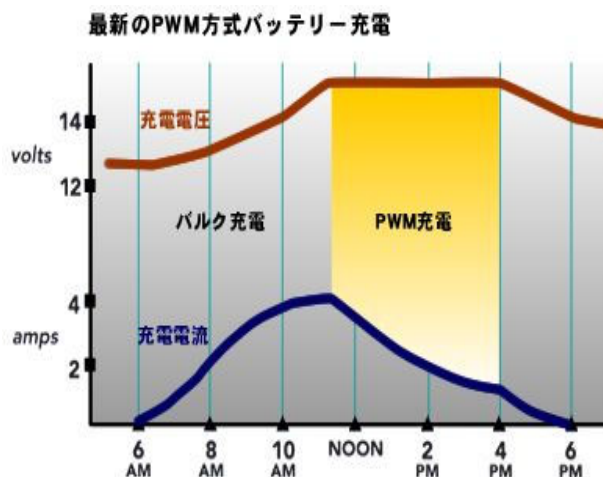


図 3 - 4 PWM 方式充電

負荷遮断電圧：負荷による電力消費によってバッテリーの容量が低下してくると、バッテリーの過放電を防ぐために、バッテリー電圧がある一定値になると負荷を遮断する。負荷遮断電圧とはその時の電圧値（この機種は 11.5V）。

負荷再接続電圧：バッテリー電圧が負荷遮断電圧に達し負荷を遮断した後、バッテリー容量が増加し過放電の心配がなくなって再び負荷を接続する時のバッテリー電圧を言う。

### 3-3 実験システム

チャージコントローラ試験は山梨大学 A1 号館 4 階で SD-チャージコントローラ、SS-10L-12V それぞれで行っており、ともに同館屋上に仰角 0° に設置された太陽光パネルによって発電された電力をそれぞれのチャージコントローラで制御しバッテリーに充電するものである。SD 用チャージコントローラはシンチレーションボックスがないため、PMT を除いて接続して行っている。また、そのデータ取得用ソフトウェアは野中氏（ICRR）に製作して頂いたものを利用している。SS-10L-12V の試験は前項の太陽光発電パネルの試験と同一である。図 3-5、図 3-6 にその概略を示す。

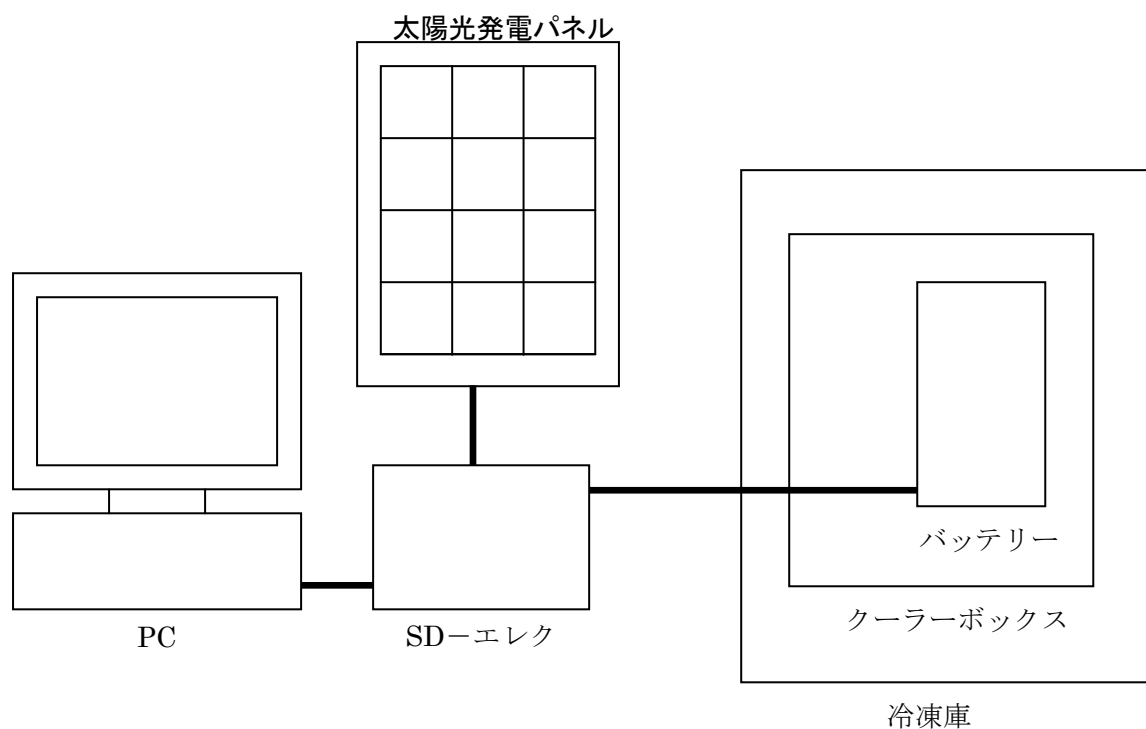
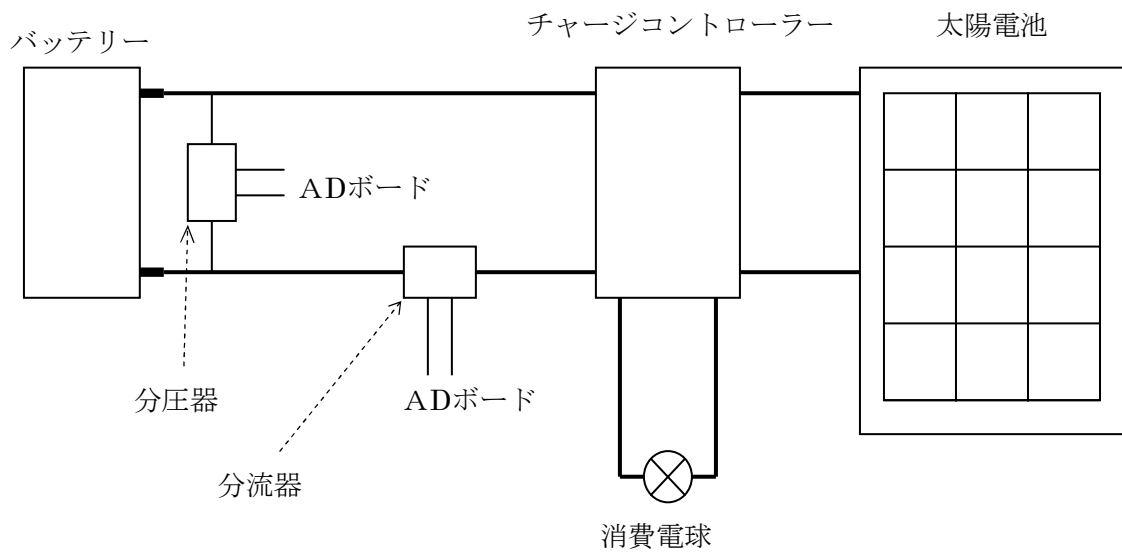
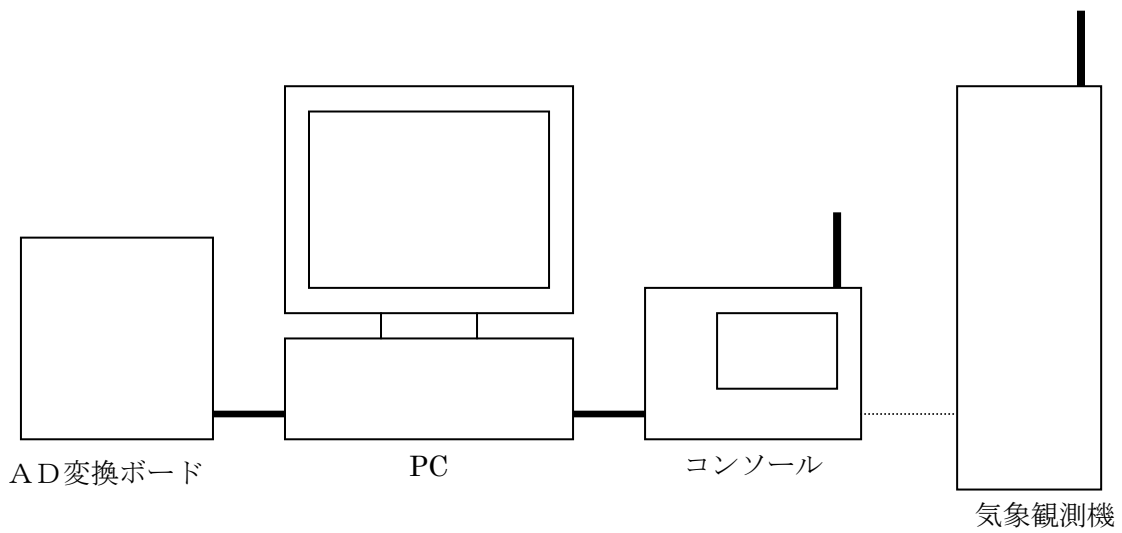


図 3-5 SD-チャージコントローラ試験





SD-エレクトロニクスは自身で電力消費するのに対して SS-10L-12V は消費がないので擬似的に 5 W の電球を接続して消費している。

図 3-6 SS-10L-12V 試験および気象試験

### 3-4 チャージコントローラー性能評価

#### 3-4-1 SD-チャージコントローラー評価

得られた発電電圧、電流を図3-7、図3-8に示す。

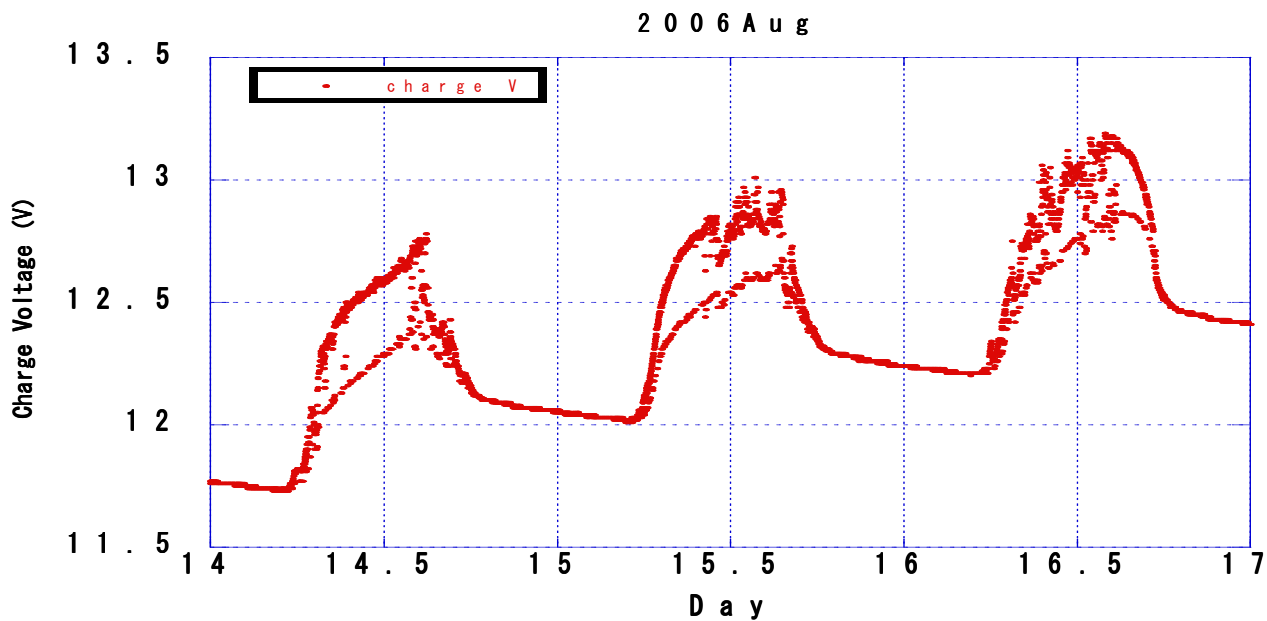


図3-7 SD エレクトロニクスでの充電電圧

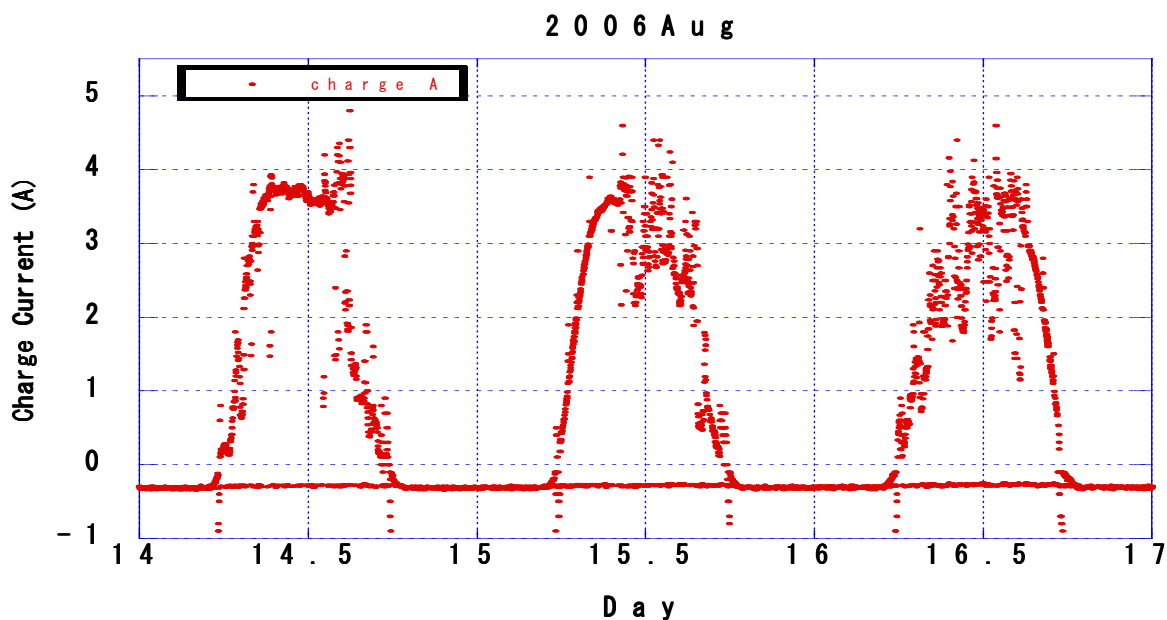


図3-8 SD エレクトロニクスでの充電電流

これらをかけ合わせて得られた充電電力と日射強度を図3-9、図3-10に示す。

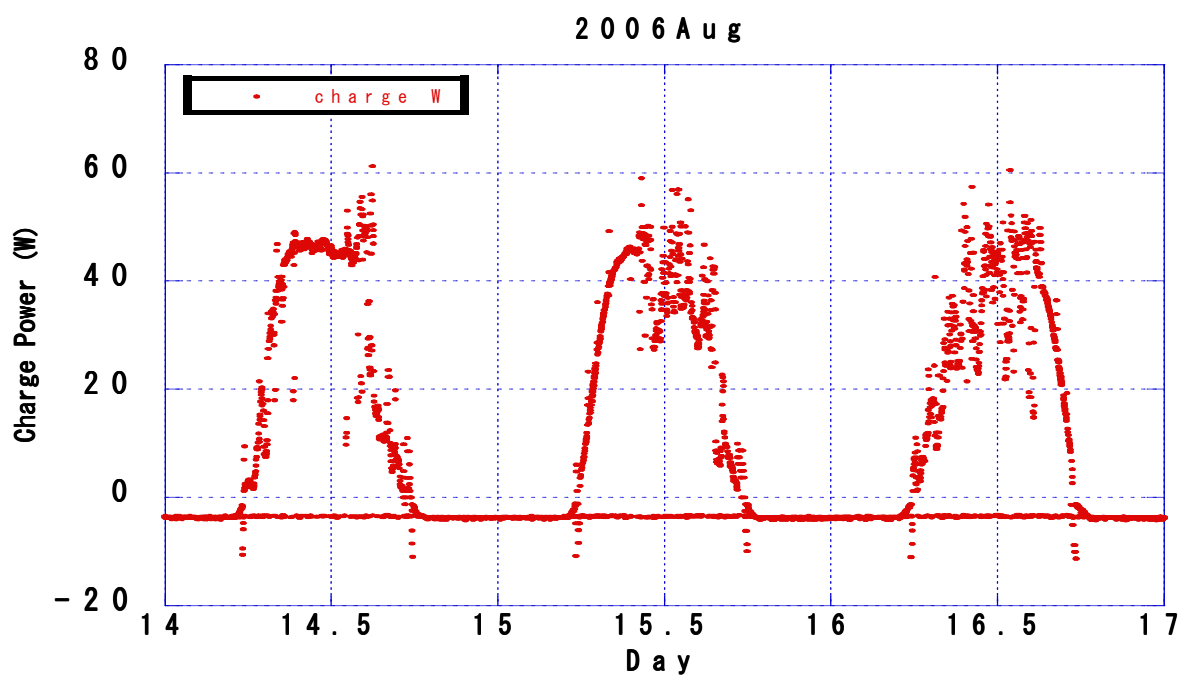


図3-9 SDエレクトロニクスでの充電電力

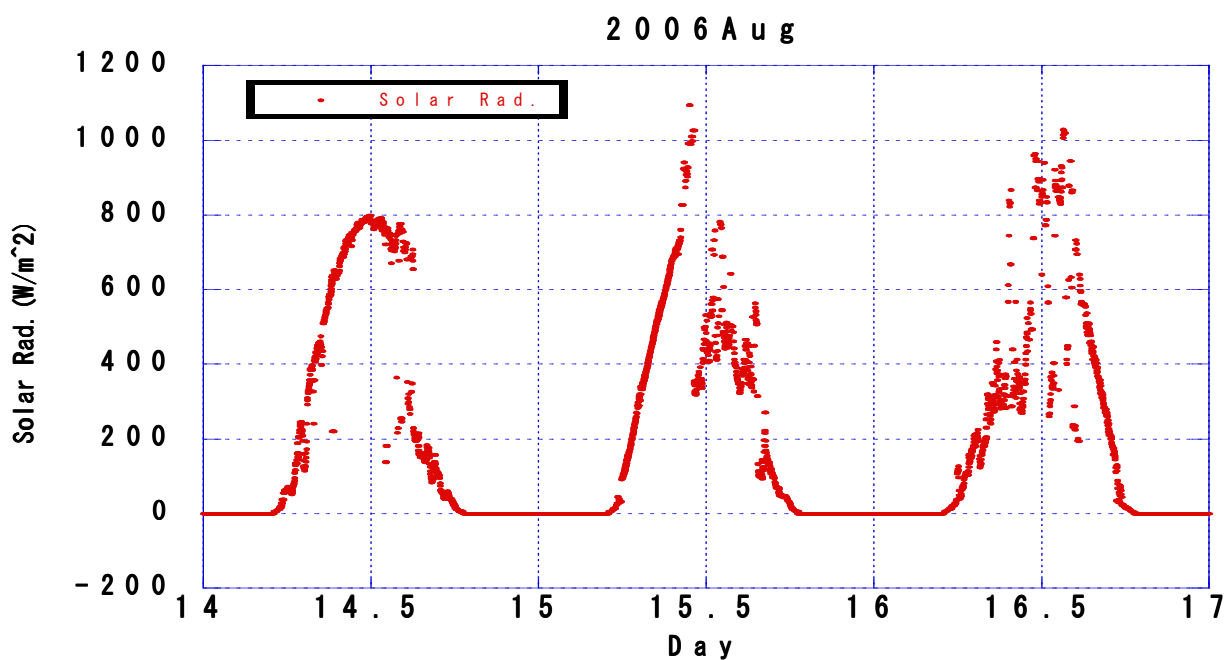


図3-10 日射強度

充電電力と日射強度の相関をとると図3-11となる。

また緑の線は太陽光発電パネルでの発電電力の予定値である。

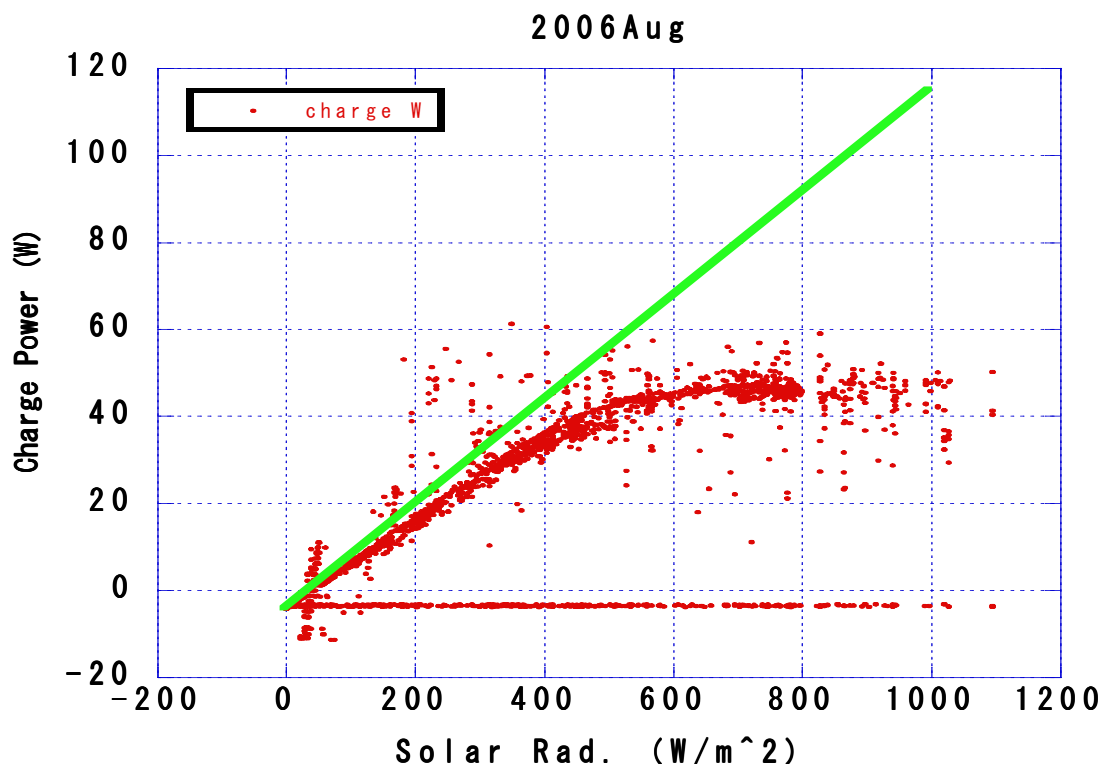


図 3-1-1 SD-チャージコントローラ充電特性

これによると、日射強度が $400\text{ W/m}^2$ 以下の際、日射強度に対して充電電力は太陽光発電パネルでの発電電力の予定値よりも約25%落ちで線形的に変化する。それ以上になると充電電力は頭打ちとなっている。充電電圧が3日間とも上昇しているので満充電にもなっていないことが分かるので充電の速さという点では効率的ではないといえるだろう。しかし、これは急速充電を防いでおり、バッテリー保護の点では効果があると考えられる。

### 3-4-2 SS-10L-1V 評価

SD-チャージコントローラと同様に発電電力-日射強度の相関を図3-1-2に示す。また緑の線は太陽光発電パネルでの発電電力の予定値である。これによると、日射強度が $600\text{ W/m}^2$ 以下の際、日射強度に対して充電電力は太陽光発電パネルでの発電電力の予定値よりも約5%落ちで線形的に変化し、非常に効率的に充電されていることが分かる。しかし、それ以上になると充電電力は頭打ちとなっている。これもバッテリー保護のために過充電を防いだ結果だと考えられる。SS-10L-1V はSDチャージコントローラに比べると充電の速度効率は良いようである。

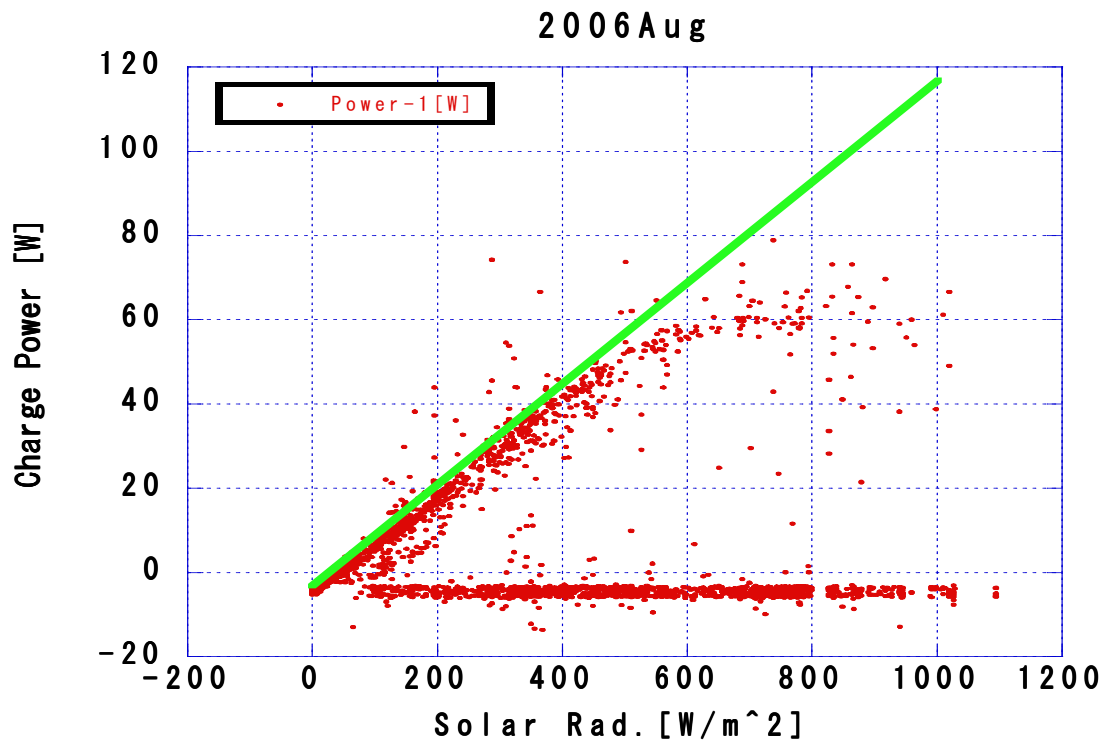


图 3 - 1 2 SS-10L-1V 充電特性

## 第4章 バッテリー

本実験は長期に亘って、夜間や悪天候に関わらず、継続して行われることが望まれる。また実験地が非常に広大であり、保護区であるので、電解液の補充等のメンテナンスなども控えたい。これを実現するためメンテナンスが不要な密閉型のディープサイクルバッテリー（DYNASTY 製 DCS-100L）を用い、そのような状況に対応できるようにしている。またここでは SD に使用されるバッテリーについてまとめる。

### 4-1 DYNASTY 製 DCS-100L

DYNASTY 製 DCS-100L の外観および仕様をそれぞれ図 4-1、表 4-1 に示す。



図4-1 DYNASTY 製 DCS-100L

表 4-1 DYNASTY 社製バッテリーの仕様

型式	DCS-100L
電解物	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
最大放電電流	800Amps
稼働温度範囲	-40°Cから 71°C(放電)    -23°Cから 60°C(充電)
適正温度範囲	23°Cから 27°C
浮動充電電圧	13.5 から 13.8V(25°C)
重量	31kg
寸法(mm)	172.7×340.9×213.1
容量	5 時間率 84Ah、20 時間率 100Ah

### ● バッテリーの容量 Ah (電流量) と Wh (電力量)

1Ah とは 1A の電流を 1 時間にわたって供給できる能力を示す。今回使用したバッテリーの容量は 100Ah である。

電流量は一般的にバッテリーの容量を表すのに使用されている。我々は太陽光発電パネルの発電を電力で解析しているので、電力に統一して電力寮を用いた。

### ● 時間率

20 時間率が 100Ah、5 時間率が 84Ah となる。これは満充電の状態から、5A の電流を 20 時間連続で流すことが可能であるが、16.8A の電流ならば 1 時間で空になってしまうという意味である。

## 4-2 実験システム

実験自体はバッテリーを充電器で充電を行い、充電が終了するとスイッチを切り替えSDの消費電力を6Wとした時の10倍にあたる 12V-60W の電球での消費を繰り返すといった非常に単純なものを基本とし、充放電の組み合わせで1回の試験毎に、100回目の充放電には test100という具合にシリアルに番号を与えていく。これを、通常時はSDの1日の使用電力量である144Whとなるよう144分の消費と充電を繰り返し、定期的に長時間の放電を様々な温度で行い、その変化を追うものである。測定は 1 分間隔のサンプリングでバッテリー電圧、電流、雰囲気温度を対象とした。雰囲気温度はバッテリーに貼り付けた熱電対温度計で測定している。バッテリーは 2005 年度春に購入した2台の DYNASTY 製 DCS-100L であり、それぞれにNo. 1、No2と割り振った。実験概略は図4-2の通りである。

### 4-2-1 充電器(OKADA 製 Vertex)

SD は自走するため太陽光発電で得られた電力をチャージコントローラーで調整の後バッテリーを充電するが、試験では安定な充電が求められるので充電器(OKADA 製 Deep Well Battery Charger、Vertex)を使用した。図4-3に概観写真、図4-4に使用を示す。



図4-3 OKADA 製 Deep Well Battery Charger、Vertex



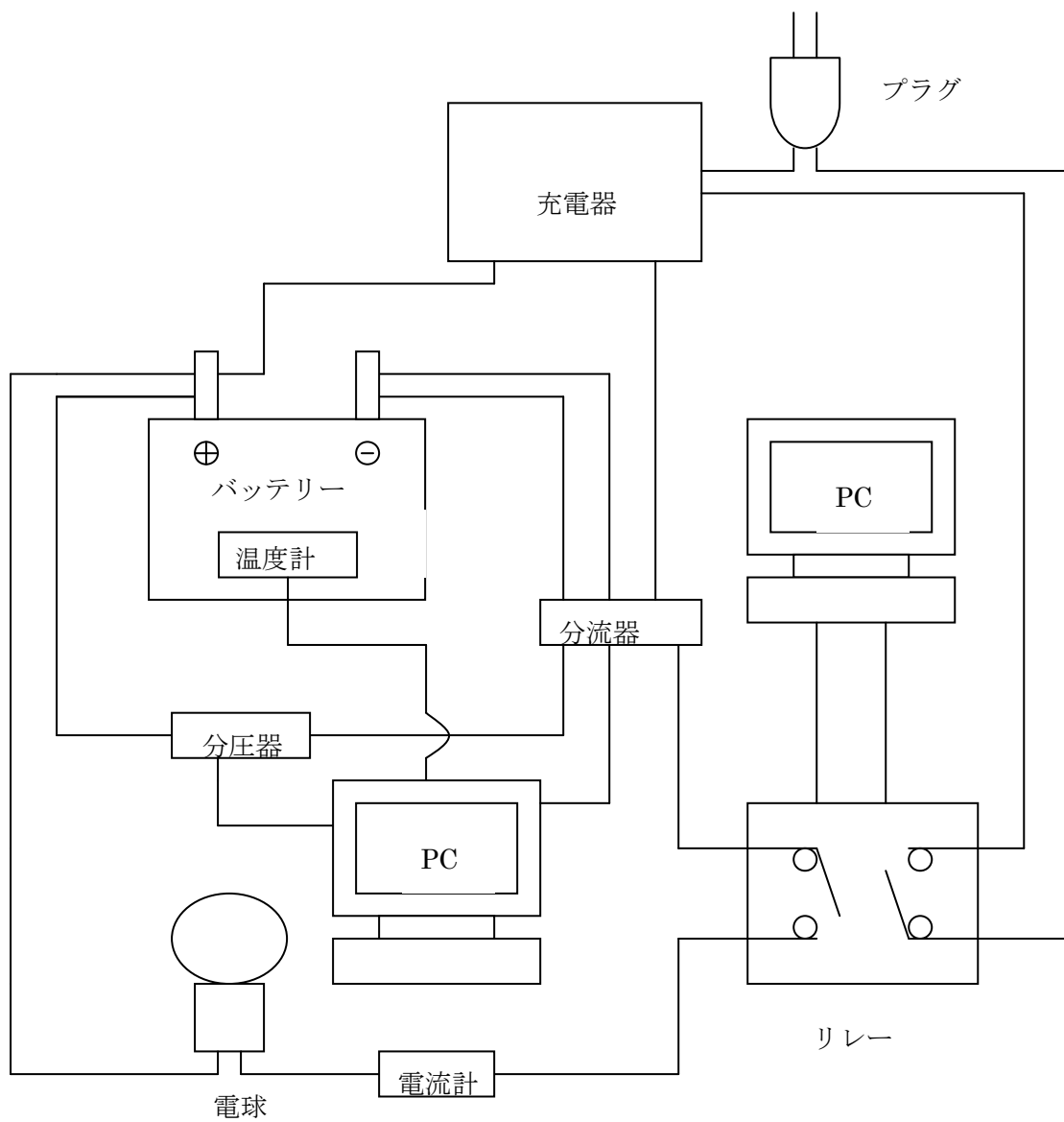


図4-2 実験概略

<b>性能・仕様</b>			
入力電圧	AC100V家庭用	充電方法	末期定電圧充電
出力電圧	DC12V	オートストップ	ICタイマー
出力電流	DC10A	寸法	230mm(W)×160mm(D)×160mm(H)
適用バッテリー	DELCO-Voyager ディープサイクル他 一般120Ahまでのバッテリー	重量	約4.2kg
保護機能	入力側：電流ヒューズ 8A 出力側：電流ブレーカー 15A	コード寸法	入力側：1.5m 出力側：1.5m

図4-4 性能・仕様

#### 4-2-2 デジタル入出力ボード

リレー回路に充電と放電を切り替えるスイッチング命令を出力する為に、デジタル入出力ボードを用いてデジタル信号の出力を行う。

株式会社インターフェイスの 16/16 点デジタル入出力ボード PCI-2753 を使用する。

図 4-5 に示す PCI-2753 は、TTL シュミット入力(DC+5V)16 点パラレル信号入力と、TTL オープンコレクタ 16 点のパラレル信号出力を持つパラレル入出力ボードである。

本ボードは、タイマカウンタを搭載しているため、インターバルタイマとして使用できる。また、出力制御回路を内蔵している。この制御信号により、外部回路と同期をとって、データ出力ができる。コネクタからリセット信号の出力、外部リセット信号の入力をサポートしている。

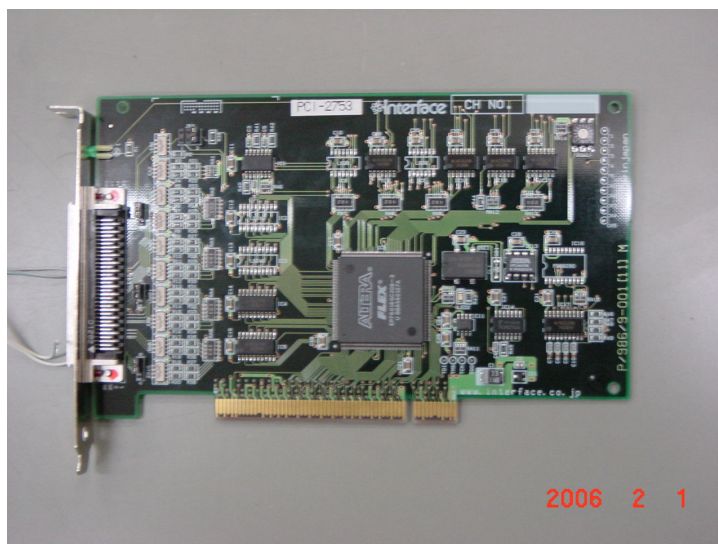


図 4-5 デジタル入出力ボード PCI-2753

#### 4-2-3 分圧器

AD 変換ボードに入力できる電圧値のレンジは最大で 10V であり、11V~13V の電圧となるバッテリーは、AD 変換ボードに直接電圧を入力することができない。そこで、分圧器(分圧比 約 1/10)を使用して電圧値を下げて測定する。分圧器の回路図は図4-6の通りである。

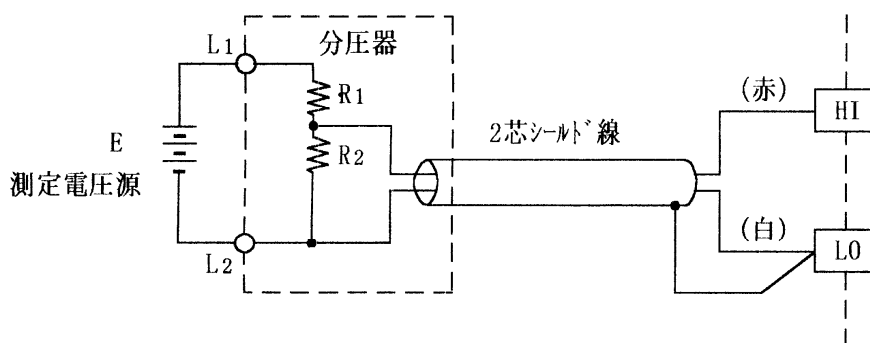


図4-6 分圧器の回路図

抵抗は  $R_1 = 430 \text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = 47 \text{ k}\Omega$  である。

$$V_2 = R_2 \frac{V}{R_1 + R_2} \quad (V = \text{測定電圧源})$$

Vは分圧される電圧(バッテリー電圧)V<sub>2</sub>は分圧後の電圧(AD変換ボードに入力される電圧)よって以下のような式が導き出される。

$$y = 10.123 x$$

上の式の x 部分に計測データ (AD変換ボードに入力される電圧)を代入して計算すると、実際の電圧値が y [V] (バッテリー電圧) として算出される。この式を解析の際の換算式として用いた。

#### 4-2-4 分流器

今回使用した分流器は旭計器社製 20A/200mVである。この機種の分流比は 1/100 であるが、正確な分流比が分からないと計測したデータを実際の値 (分流される前の値) に変換できない。ここでは前年度で行われたキャリブレーション (校正) 結果を用いて換算を行う。以下が換算式を用いる。

$$y = 101.61 x - 0.0285$$

上の式の x 部分に計測データを代入して計算すると、実際の電流値が y [A]として算出される。この式を解析の際の換算式として用いた。なお放電電流の流れる方向をプラスとしている。

#### 2-2-5 消費電球

今回実験に使用した消費電球は朝日電器株式会社製 12V-60W 船舶用電球であり、仕様は以下の通り。

金口 26mm 全長 110mm バルブ径 60mm

#### 2-2-6 保冷用冷凍庫

TA計画の実験予定地 (米国ユタ州デルタ) は乾燥地帯であることと内陸部であることから、冬期は著しい気温の低下と大きい日格差が予想される。よって低温での耐久試験が重要である。本来であれば恒温槽を使用しなければならないであろうが、予算の都合上バッテリー零囲気温度の安定にサンヨー製の冷凍庫 (HF-12RG) を使用した。図4-7にその温度使用を示す。

型式	SANYO HF-12RG
調節可能温度範囲	冷蔵 4°C±5°C
	氷温 -1°C±5°C
	冷凍 -18°C±5°C

図4-7 冷蔵庫性能

#### 4-2-7 リレー回路

充放電を自動で行うにはデジタル入出力ボードからの出力信号を受け取り、充放電の切り替えを行うためのリレー回路を組み込む必要がある。リレー回路とは、スイッチ信号された入力電気信号を受け取り、出力部に必要な動作電気信号を送ることで電気回路を開閉する装置である。使用するのは OMRON 社の制御盤用バイパワーリレー、LY2F である。図 4-8 にリレー回路概観図を示す。

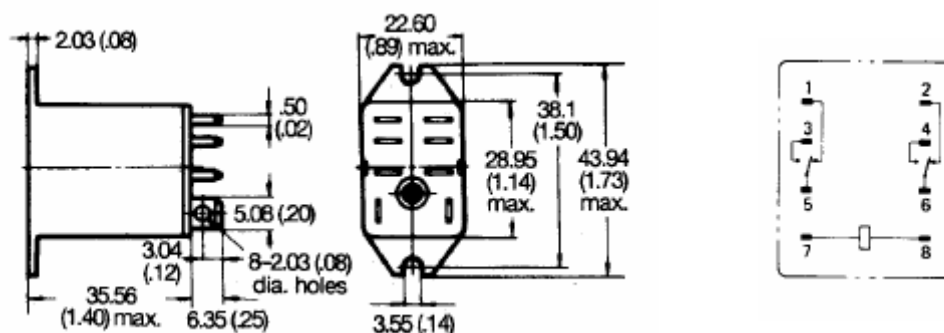


図 4-8 リレーLY2F (OMRON 社)

#### 4-3 取得データ

前項のシステムで取得されるデータは日時、電圧、電流、雰囲気温度である。図 4-9 は、取得データの例を時系列に並べたものである。最も試験の進行を表しているのは電圧である。充電中は充電量に伴い電圧の上昇が見られ、全体の 80% の充電量を超えると電圧も一定となる。充電の終了の後、加圧されなくなりバッテリーの開放電圧まで落ち込む、消費回路との接続により動作電圧までさらに降下する。電流値は充電方向を正、消費方向を負にとっている。充電中は充電器の特性によって安定しない。これについては本章 6 項で触れるので、そちらを参照して頂きたい。温度は 3℃ほどのばらつきを持ちつつ充放電に同期して上下している様に見える。充電時のデータは大体が充電器による挙動なので、バッテリー状態の解析は放電時のデータを用いるのだが、バッテリーの容量を表す電力量の算出について触れておく。まず電圧値と電流値をかけて電力とする。データの取得は 1 分間隔なので、単純な掛け算で得られた電力が 1 分間安定して得られているとすれば、電力量 (電力×分) となる。この電力量 (電力×分) を 60 で割り、この 1 分に得られた電力量 (電力×時) となる。放電開始からの 1 分後との電力時を積算し、その放電で得られた電力量とする。

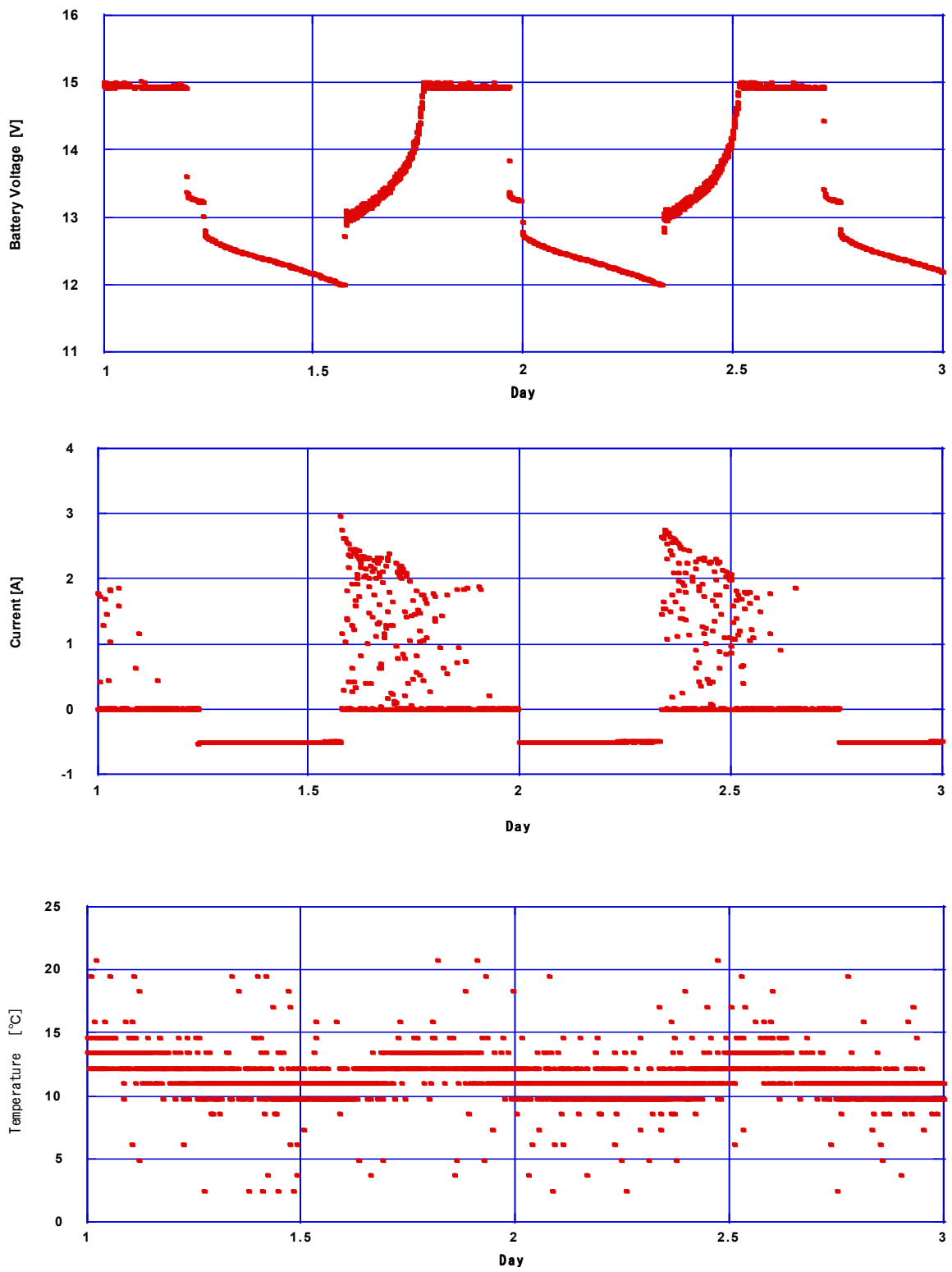


図 4 - 9 取得データ

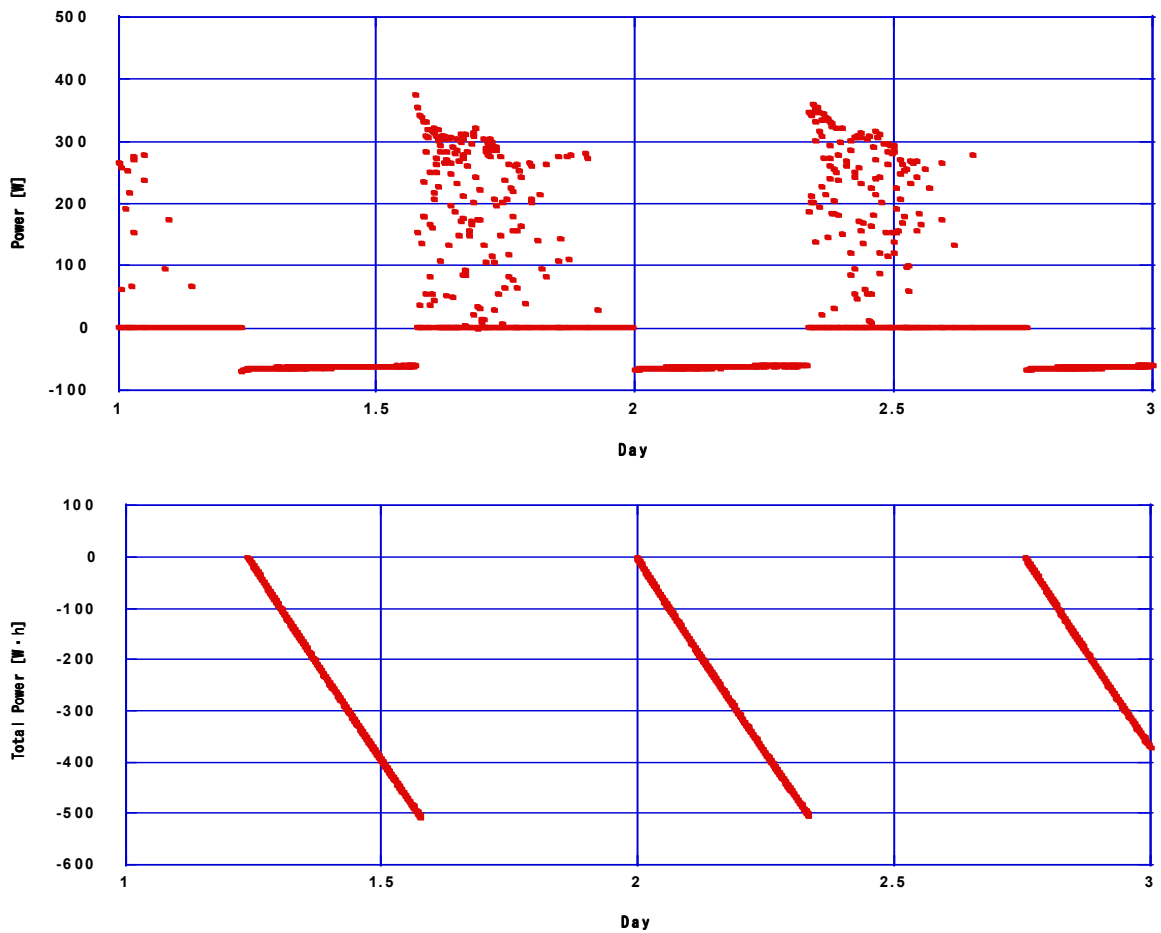


図 4 - 1 0 電力値と電力量

#### 4 - 4 温度特性と劣化

既知のことと思うがほとんどのバッテリーは化学反応によって電力を生み出している。DCS-100L も鉛バッテリーである以上その例外ではない。その為、SDのように気温の変化の大きい屋外での使用では温度特性についての情報を得ることで、停止などの異状時に問題を切り分けることができる。また本項は放電時のみの解析なので電流値および電力値は絶対値で表記する。

##### 4-4-1 健全バッテリー

図 4 - 1 1 は比較的試験回数の少ない No. 2 バッテリーの test222~245 (2006/6/16~7/18) の放電データを基に各電圧までに取り出せた電力量の関係である。試験は放電時間を一律 10 時間とし、バッテリー温度を室温のから始め数回の試験の後に冷蔵庫により 10、0、-7.5、-15 度で安定させて行っている。

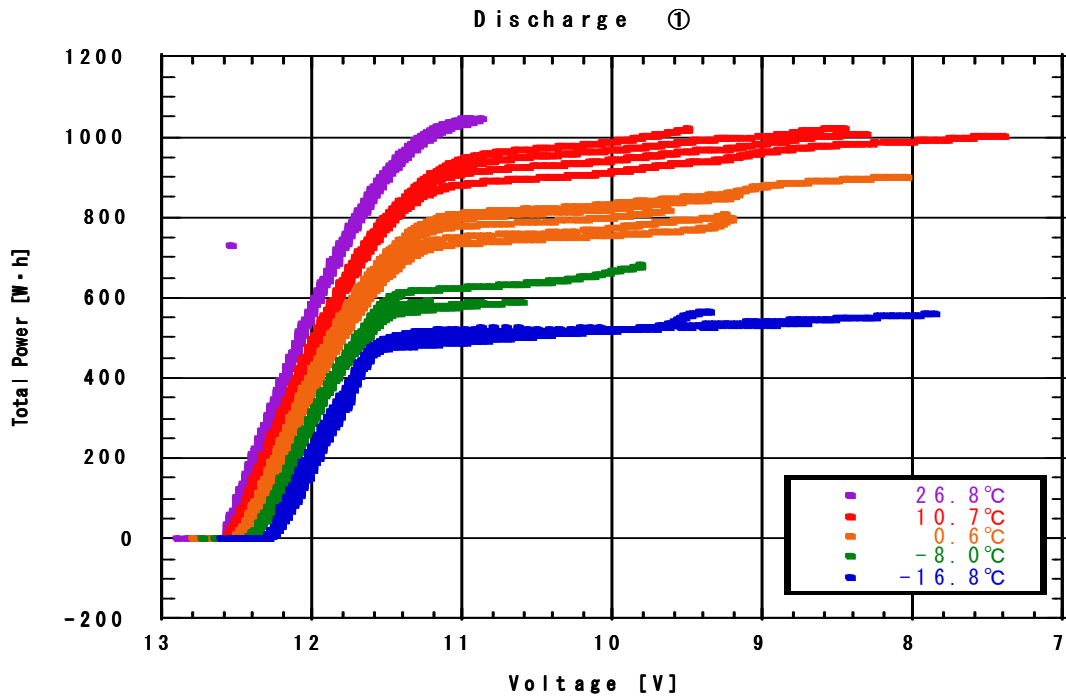


図4-1-1 Battery 放電特性 1-1

温度別に色を変えて描写しているが、どの曲線においても、放電開始から約 11.6V までは直線でバッテリー電圧と積算電流は比例関係をとる。その後、約 11.3V 付近において傾きは小さくなり、ある電圧値以降はほとんど電力が取り出せなくなる。また温度の低下がバッテリー容量の低下にそのまま繋がっている。まず、放電初期の直線部分のみにして横軸に電力量、縦軸に電圧をとったものが図 4-1-2 である。

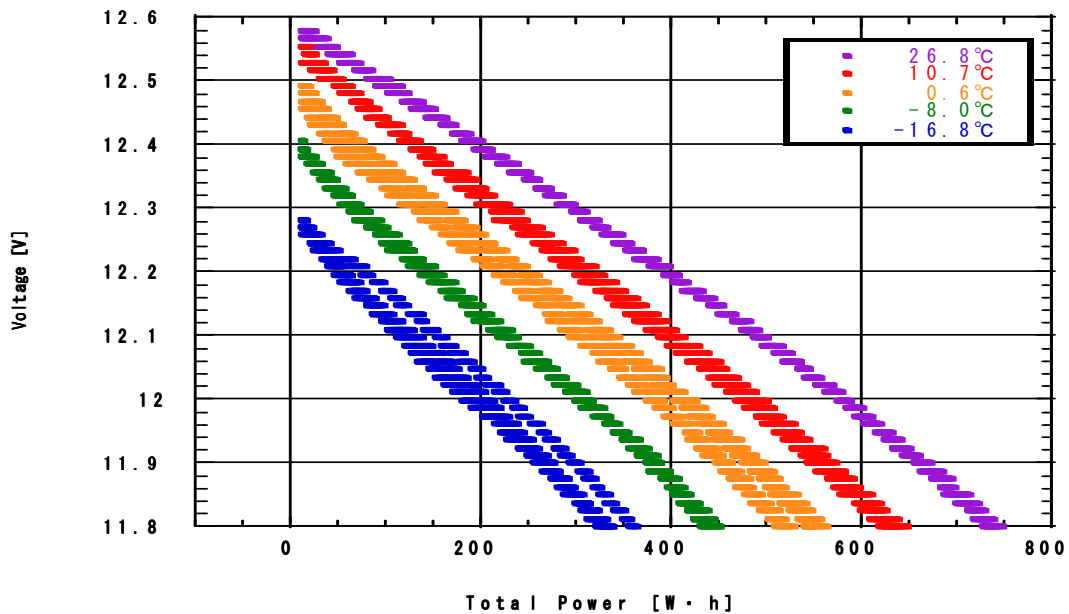
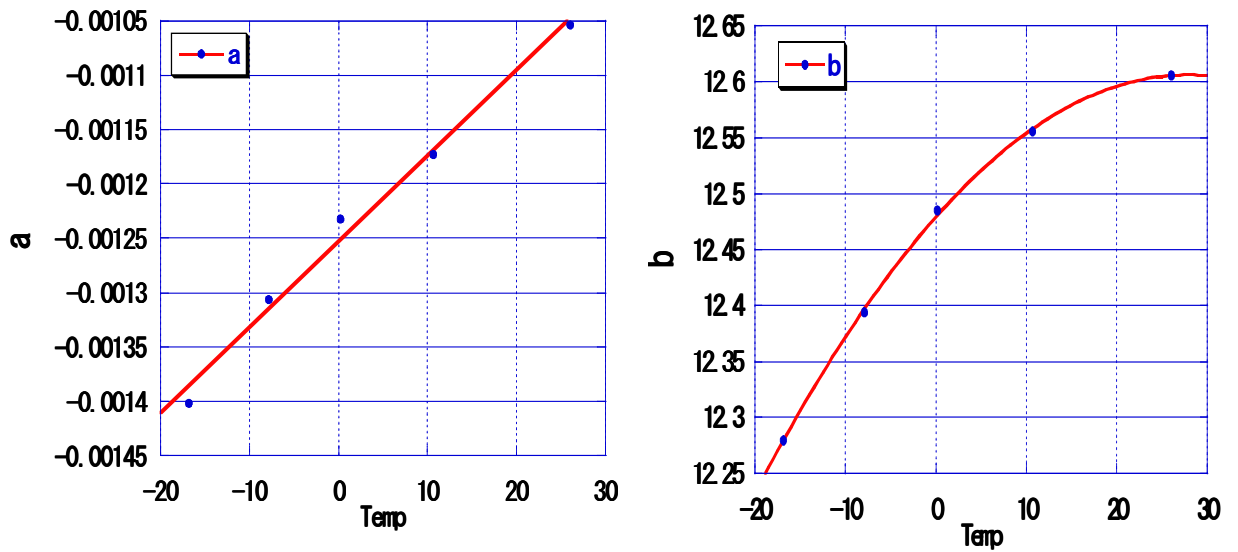


図4-1-2 Battery 放電特性②



この回帰直線を  $y = ax + b$  とすると温度に対する係数  $a$ 、 $b$  は図 4-13 の通りとなる。



$$a = 7.8839T - 0.001525$$

$$b = -1.6305 \times 10^{-4} T^2 + 9.1099 \times 10^{-3} T + 12.479$$

図 4-13 放電初期直線変化時の係数

また図 4-11 を各電圧 (11.0, 11.2, 11.4, 11.6, 11.8, 12.0) で区切り、それまでの放電量と温度の関係を図 4-14 に描写しなおした。

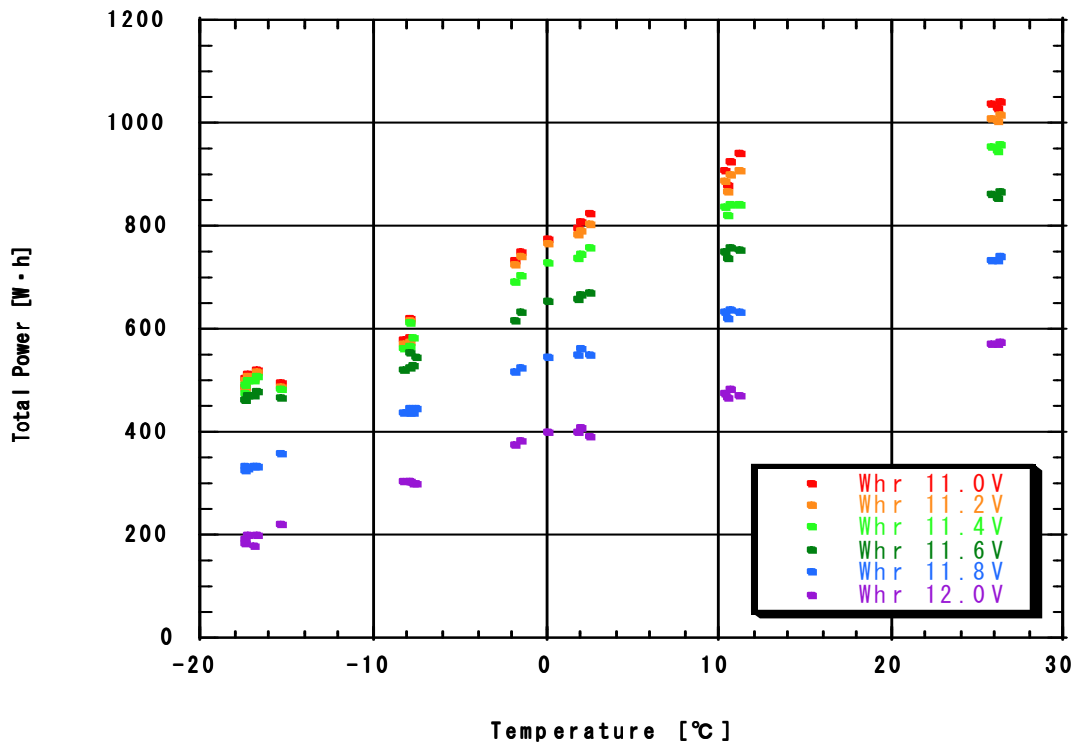


図 4-14 Battery 温度特性 1-2

まず 11.4V を境にそれ以下の電圧まで放電しても、それまでに比べて放電量は大きく増加しない。また 0℃～-10℃の間で変化の仕方が変わっているようである。よってこれを 30℃～-10℃、5℃～-20℃の2区間に分けてそれぞれの電圧まで放電した際の回帰曲線を求めた。

回帰曲線を  $y = ax^2 + bx + c$  とすると係数  $a, b, c$  は表 4-2 になる。

表 4-2 Battery 温度特性回帰曲線の係数 1

Temp >-10	11.0V	11.2V	11.4V	11.6V	11.8V	12.0V
<b>A</b>	-0.292	-0.278	-0.200	-0.134	-0.108	-0.087
<b>B</b>	18.0	17.0	14.4	12.0	10.6	9.5
<b>C</b>	766	752	714	642	534	386

Temp < 5	11.0V	11.2V	11.4V	11.6V	11.8V	12.0V
<b>A</b>	0.550	0.051	0.338	0.283	-0.033	-0.130
<b>B</b>	24.7	23.5	18.8	14.9	11.2	9.2
<b>C</b>	765	753	715	640	535	388

12.0V～11.6V までは温度による曲線間隔の差は少なく、ほぼ平行だと言える。逆に 11.4V～11.0V では大きく異なり、温度が下がるにつれて取り出せる電力量も低下していくことが判る。特に 0degree 以下では急激に低下を見せ、-18degree 付近では 11.4V、11.2V、11.0V の曲線はほぼ重なり、これ以上の電力量の取得は望めない。

#### 4-4-2 劣化バッテリー

No. 2 バッテリーは test245 の後、通常試験である放電時間 144 分の試験を行った後、バッテリーの温度特性の試験を test824～899 で行った。その後さらに通常試験を継続したが、バッテリー電圧の挙動に変化が見られたため test1033～1065 行った。それぞれの結果を同様に描写したものが図 4-15、図 4-16 である。それぞれの回帰曲線の係数は表 4-3、表 4-4 の通りとなる。

表 4-3 Battery 温度特性回帰曲線の係数 2 (test824～899)

	11.0V	11.2V	11.4V	11.6V	11.8V	12.0V
<b>A</b>	290	289	285	280	253	162
<b>B</b>	-1.83	-1.73	-1.58	-0.927	1.51	4.49
<b>C</b>	-0.238	-0.287	-0.337	-0.419	-0.453	-0.234

表 4-4 Battery 温度特性回帰曲線の係数 3 (test1033~1065)

	11.0V	11.2V	11.4V	11.6V	11.8V	12.0V
A	72.9	66.7	66.5	61.1	54.7	48.0
B	-1.10	-0.837	-0.818	-0.977	-0.678	-0.529
C	-0.179	-0.133	-0.138	-0.125	-0.0982	-0.0900

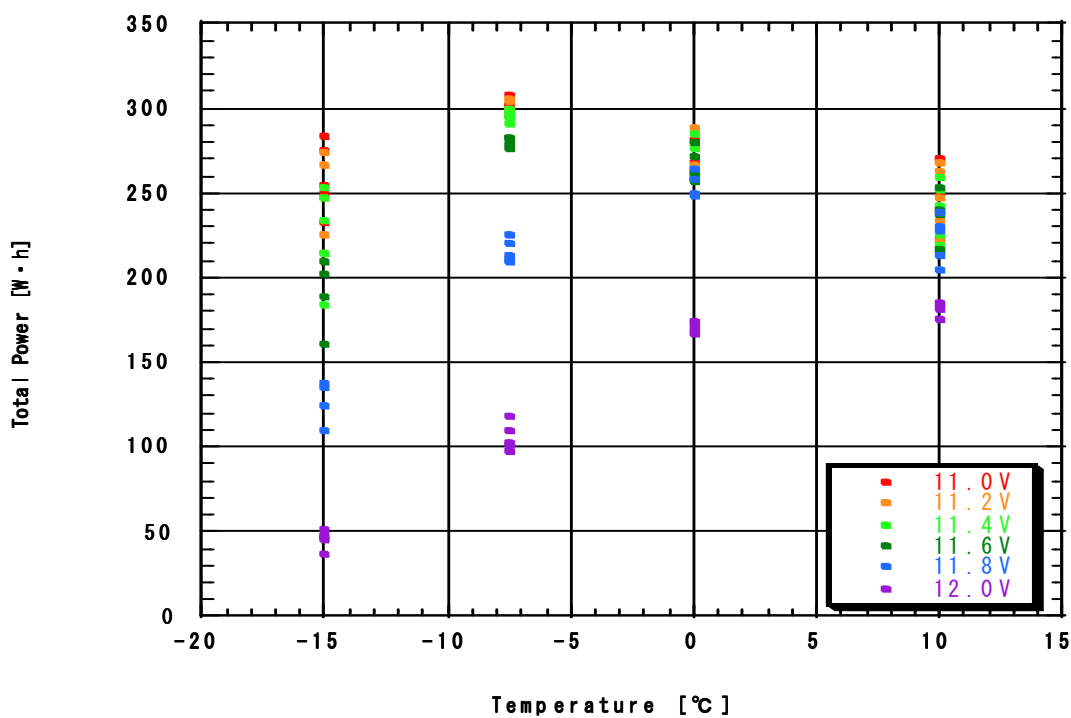
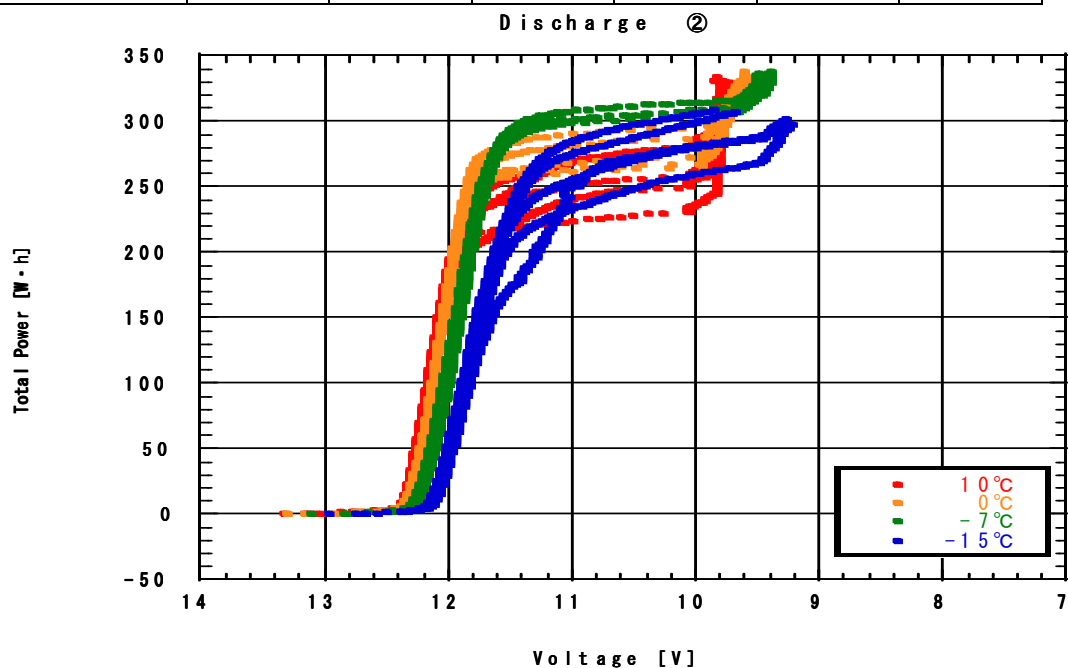


図 4-15 Battery 放電および温度特性 2

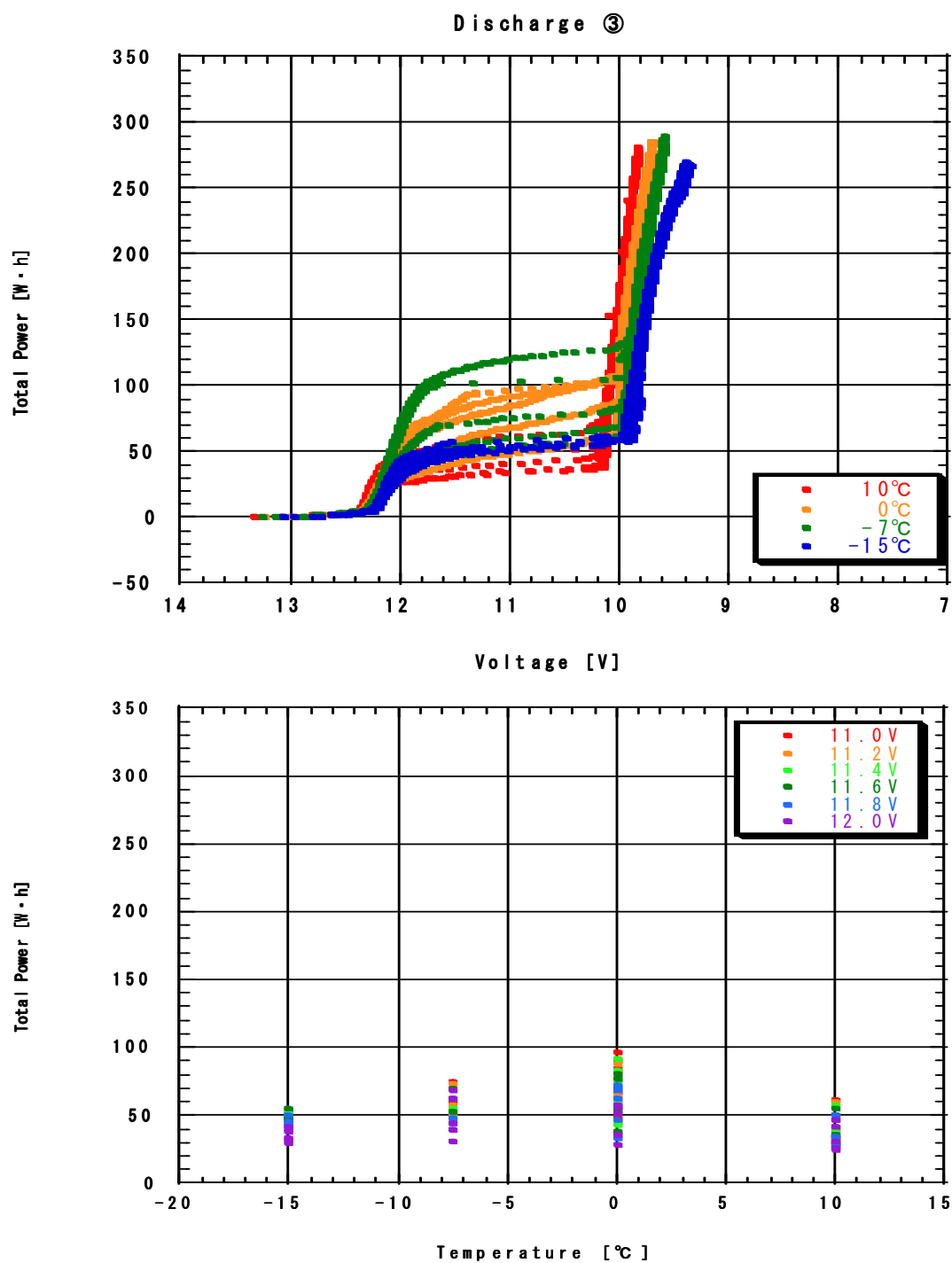


図4-16 Battery 放電および温度特性3

前試験から500回強の試験間に0°Cで800Wh取り出せた電力が300Wh以下にまで落ち込んでいる。さらに150回ほどの試験でバッテリーはさらに劣化してしまい、SDで使用可能な電圧である1.1VまでにSDの1日の使用電力量である144Whすら取り出せなくなっている。バッテリーの劣化状態がtest1000と同等になってしまうと日射が望めな

い天候が継続した際 SD の停止は逃れられない。TA 計画の観測デットタイムの削減には劣化状態がこれほどまでに進行する前に SD バッテリーの一斉交換が有効である。そのために長時間の放電によるものではなく、SD の通常使用に近い使用で劣化の兆候を通常試験から判断する必要がある。

#### 4-5 通常放電試験からのバッテリー劣化の評価

これについては本年度の望月靖仁さん卒業論文に詳しくまとめているので、結論のみを述べるとバッテリーの劣化を顕著に示すのは電圧である。放電時のバッテリー電圧は劣化に伴い低下しやすくなる。それはある時、劇的に表面化するもので、事前の察知は非常に難しいというのが現状である。

図 4-17 は放電時間を一定に取った通常試験の放電終了時の電圧と試験回数との関係をとったものである。800 回から 900 回の間、色が青に変わっている点は温度特性試験を行い、通常に比べ長時間放電していたので 144Wh 取り出した時点での電圧になっている。また 700 回代後半に空白の後、電圧値が回復しているように見える所があるが、この空白の期間はバッテリーを SD と同様に使用したデータを取る目的で別試験を行っていた期間である。それは太陽光発電で充電し、SD エレクトロニクスで消費するもので、SD エレクトロニクスは無線通信を利用していないと 4W しか消費しないもので、通常の試験に比べバッテリーへの負担は非常に小さいものであった。因果関係はまだわかってはいないのだが、別試験のあとの挙動だけに参考程度に記しておく。

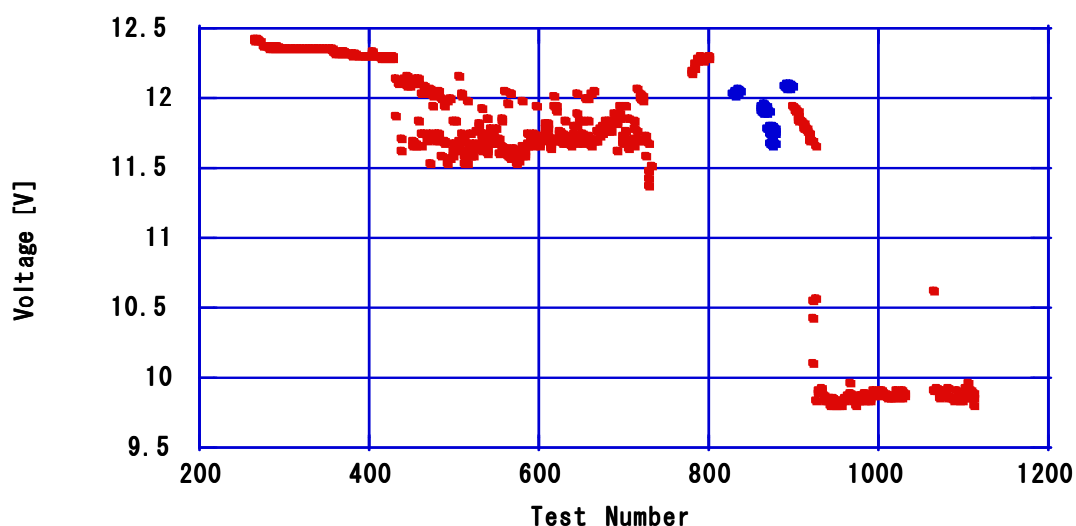


図 4-17 試験回数と電圧の変化

## 4-6 充放電間での電力量損失

次に充電量と放電量を比較することで、そこでの損失電力について述べる。放電量は単純に電球で消費して放電しているの、前項でも実験データをそのまま使用しているのと同様に使用できる。しかし充電時は使用する充電器の特性で定電圧ではなく周期的に変化する波形を持つ電圧で充電される。そのため、充電量を推算するには使用充電器の充電特性について知る必要がある。大まかにではあるが以下にその特性について記す。

### 4-6-1 充電時の電流の推定

充電器の特性を調べるために、図4-2に示したバッテリー耐久試験システムの分流器の両端にストレージスコープをつないで、電圧波形を記録観察し、その電圧から電流を求め、充電時にバッテリーに流れる電流値を推定する。

#### ● 波形からの電流の求め方

ここではストレージスコープの波形から充電時の電流値を導く考え方を説明する。電流値の求め方の図4-18に概念図で示す。①はストレージスコープの波形の写真である。この波形の高さを  $P.H[V]$ 、横幅を  $P.W[s]$  として、この波形を2次曲線で近似し、波形の面積を求める。写真に示すような1つの波形は②のように1秒間の間にいくつもある。1秒間の全ての波形の面積を加えたのが③であり、この③図の高さは電圧  $V$  となる。この  $V$  を抵抗で割れば電流  $I$  を求めることができる。こうして求めた  $I$  は④のように1秒間あたりの電流値となり、この  $I$  を充電時の電流とする。波形の近似式は以下ようになる。

$$y = \alpha \left( x - \frac{P.W}{2} \right)^2 + P.H$$

よって面積は積分して

$$\begin{aligned} S &= \int_0^{P.H} \left( \alpha x^2 - \alpha P.Wx + \alpha \frac{P.W^2}{4} + P.H \right) dx \\ &= \frac{1}{3} \alpha P.W^3 - \frac{1}{2} \alpha P.W^3 + \frac{1}{4} \alpha P.W^3 + P.H \cdot P.W \end{aligned}$$

なお、 $\alpha$  は

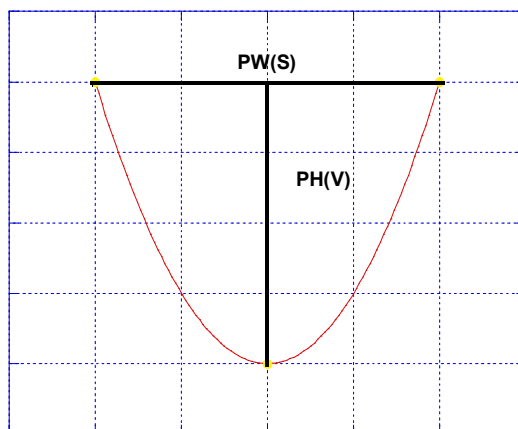
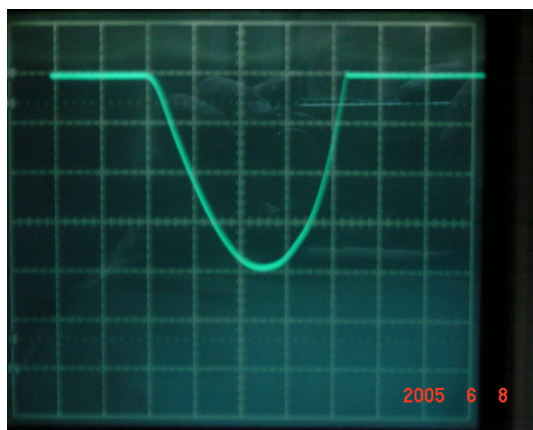
$$y = \alpha \left( x - \frac{P.W}{2} \right)^2 + P.H$$

$$0 = \alpha \left( 0 - \frac{P.W}{2} \right)^2 + P.H$$

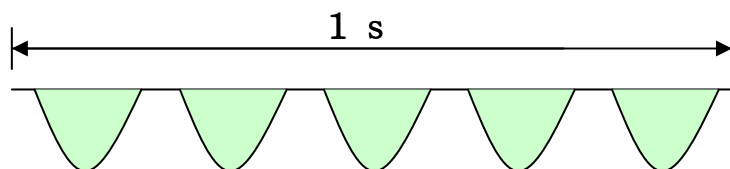
$$\alpha = -\frac{4P.H}{P.W^2}$$

とする。

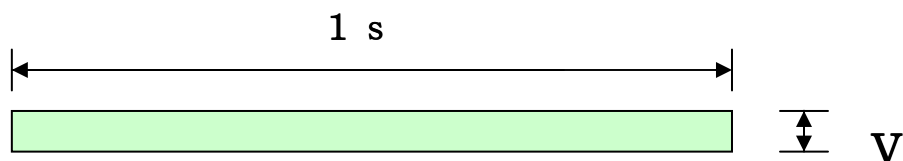
①



②



③



④

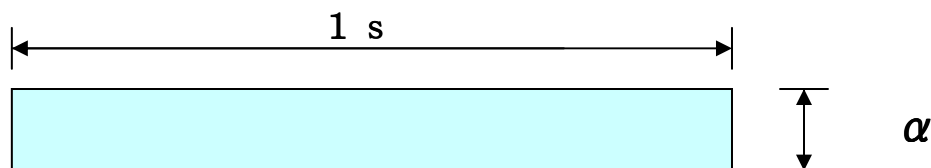


図4-18 電流推定の概念

● 充電時の電流

この実験で使用した充電器は充電圧1.5V付近になり、充電率が80%ほどになると、充電電圧を一定にして充電する。このため、その前後で充電特性は大きく変わってくる。まず充電量の大部分を占める充電量80%未満の際の電流を推定した結果を図4-19に示す。図は充電時のバッテリーの電圧と推定した電流の関係を示したものである。赤のプロット



したものは 11.4V まで放電した後の充電でしたものを推定しものであり、青のプロットは 13.5V まで放電したものの推定である。11.4V まで放電した後の充電では、充電開始後電圧が 13V まで上がる間に電流は大きく下がり、その後 14.5V までの間に電流は少しずつ減少する。12.5V まで放電した後の充電では、放電開始後から電圧が 15V まで下がる間に電流も急激に下がる。

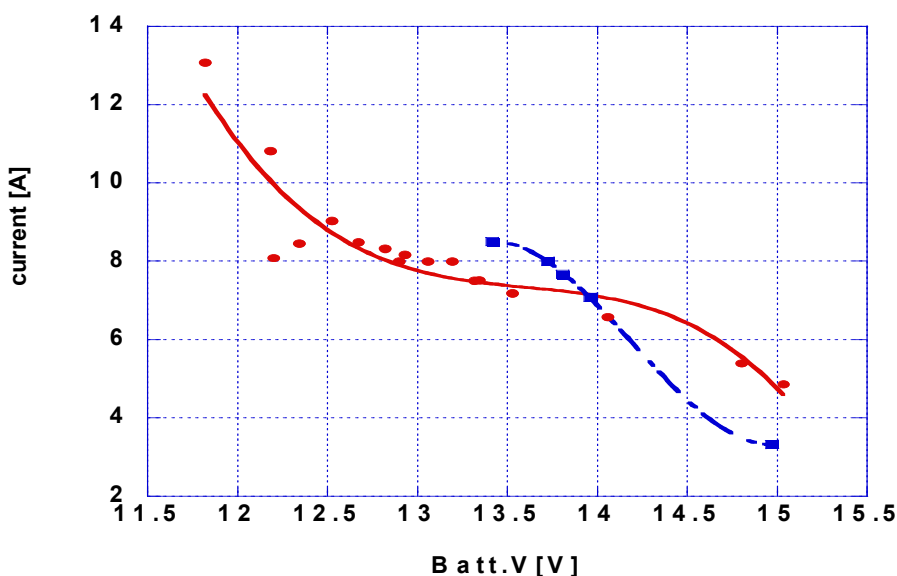


図 4-19 放電量別の充電時の電流推定と電圧の関係

次に充電量が 80% 以上になった際だが、充電電圧は 15V 付近で一定となり、定圧充電にはいる。電流は電圧に関係なく時間とともに減少するようになる。その例を図 4-20 に示す。時間は定電圧になってからの経過時間である。

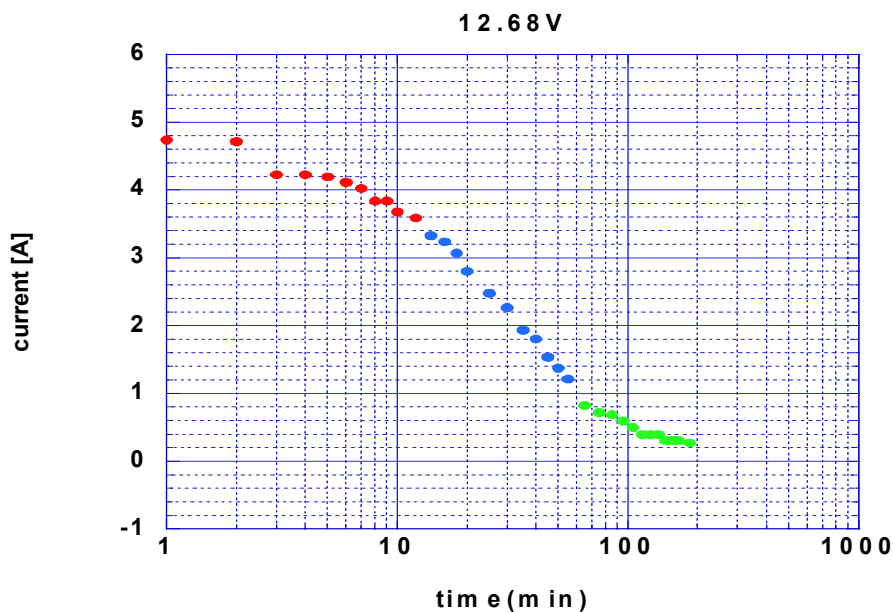


図 4-20 80% 充電完了後の電流値の時間経過

ランプ点滅後における電流は、時間との関係は、3本の直線で表される。よって電流の近似式を得るには、3直線の近似式を求める。表4-4は放電量別（放電終了電圧別）の直線の切片を求める式を示す。なお、式中のxは放電終了電圧である。

表4-4 充電80%以上完了時の電流近似式

放電終了電圧	1本目	2本目	3本目
11.39V~12.33V	$Y=-0.337x+10.5$	$Y=-1.03x+21.8$	$Y=-0.481x+10.7$
12.49V~12.68V	$Y=-2.02x+7.61$	$Y=-3.39x+50.8$	$Y=-0.188x+27.9$

#### 4-6-2 充放電の電力量の比較

図4-21は推定された充電電力量を縦軸に放電電力量を横軸にとったものである。また、黒の線は損失が全くないとした理想的充放電値である。理想的充放電に対して、充放電間の損失率は約10%であった。

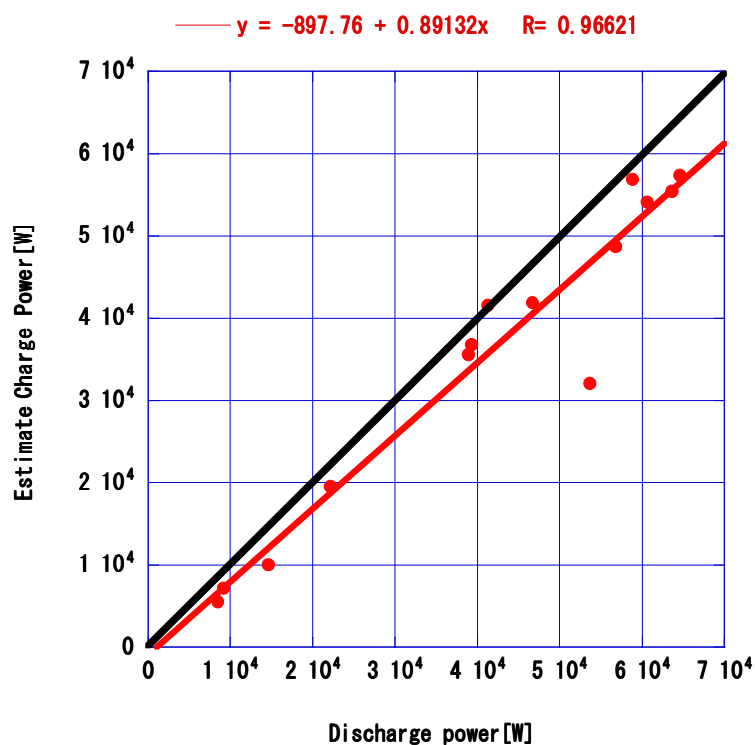


図4-21 Battery 充電時の損失

## 第5章 クーラーボックス

前項のバッテリー試験でバッテリーは、温度が氷点下になると容量が非常に小さくなってしまったことがわかった。これを受けて、バッテリーの保温、保護のためにクーラーボックスを使用する。クーラーボックスは Daiwa 社製（GXU-1600）を用いる。

### 5-1 GXU-1600

クーラーボックス（Daiwa 社製 GXU-1600）の外観および仕様を以下に示す。

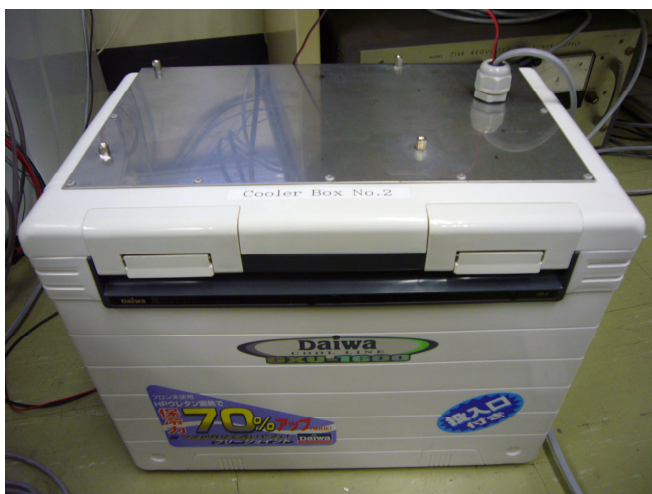


図 5-1 GXU-1600 外観

表 5-1 GXU-1600 の仕様

型番		GXU-1600
容量[L]		16
自重[kg]		3.8
内寸[mm]	奥行	180
	幅	360
	高さ	260
外寸[mm]	奥行	285
	幅	475
	高さ	330

### 5-2 実験システム

Battery をクーラーボックス内に入れ SD 検出器の蓄電部を擬似的にクーラーボックス内に製作する。この際後に行う Heater 試験のために film ヒーターを Battery 側面に設置しておいた。このクーラーボックスを冷凍庫（GE Appliances 社製 FHJ3SF(WW)）内に設置し、クーラーボックス外気温を制御し安定させることで、クーラーボックス内部と外部の温度の関係を明らかにするものである。温度データ採取には KN ラボラトリーズ製 ThermoManager（図中赤いボタン）を用いて行い。計測場所は冷凍庫内上面、冷凍庫底、クーラーボックス内上部、クーラーボックス内下部、Battery 上部の 5 ヶ所で時間間隔は 2 分である。クーラーボックス内外共に室温である 23℃に安定させてから冷凍庫のスイッチを入れる。冷凍庫の特性でスイッチを入れてしばらくは冷凍庫内の温度が安定しないため、スイッチを入れて 2 時間以上経過した後のデータのみを用いる。

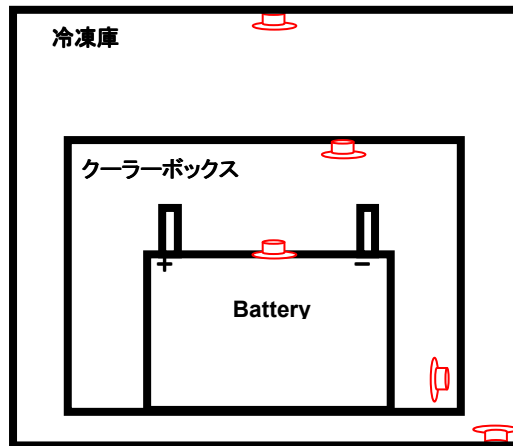


図 5 - 2 クーラーボックス試験

### 5 - 2 - 1 保冷用冷蔵庫 (GE Appliances 社 FHJ3SF[WW])

SD 検出器電源 Battery 保温用クーラーボックス試験に利用する冷蔵庫 (GE Appliances 社製 FHJ3SF(WW)) の仕様を表 5 - 1 に示す。

表 5 - 1 FHJ3SF(WW)の仕様

型式		FHJ3SF(WW)
有効内容積		96 L
外形寸法(mm)	幅	664
	奥行き	504
	高さ	835
電気定格 50/60Hz	相・電圧(V)・周波数(Hz)	単相 100V・50/60Hz
年間消費電力量(50/60Hz)	C法による(kwh/年)	278/297
冷却方式及び冷凍室記号		冷気自然対流方式
霜取方式		手動
主な特徴	温度コントロール	ダイヤル式
	パワーオンオフ表示	●
	バスケット	1
	霜取り用ヘラ	1
製品質量(重量)(kg)		32
温度調節	level1～level7	-15～-25°C

### 5 - 2 - 2 温度計 (KN ラボラトリーズ製 ThermoManager)

実験で使用する温度データ採集素子 (KN ラボラトリーズ製 ThermoManager) は直径 1

0 mmほどのボタン状の素子あり、分解能 0.5°Cで測定可能である。また、この素子は同時に記録も行え、オフラインでの計測、記録日時および計測温度の記録（2028point）が可能である。また計測の時間間隔も指定可能である。外観を図 5 - 3 に示す。



図 5 - 3 ThermoManager

### 5 - 3 クーラーボックス性能

#### 5 - 3 - 1 外部温度一定時の特性

冷凍庫内の温度を一定に保ち実験を行った。冷蔵庫のレベル 1、4、7 でそれぞれ 1 回ずつ行う。採取データをクーラーボックス内外のそれぞれの平均をグラフにまとめた例を図 5 - 4 に示す。

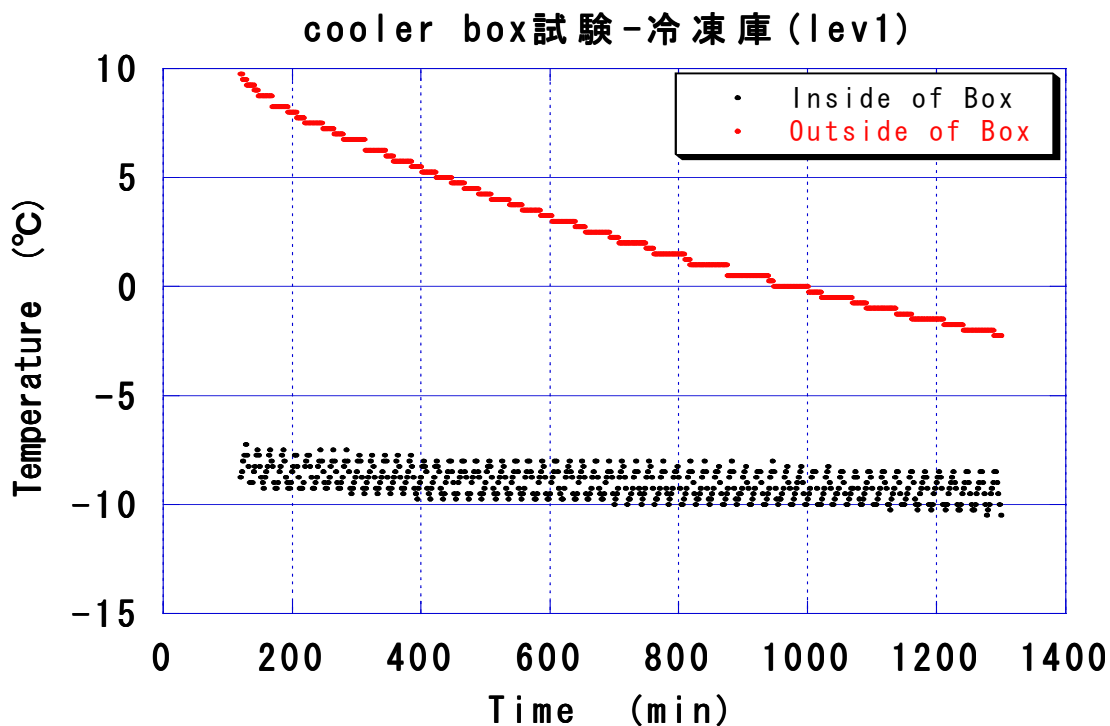


図 5 - 4 外気温一定時のクーラーボックス特性

クーラーボックス内の温度変化はクーラーボックス内外の温度差の関数であると考えられる。また本実験の場合、外部温度は一定なので温度差の変化とクーラーボックス内の温度変化は同等であると考え、以下に各レベルでのクーラーボックス内外の温度差と時間経過の関係を近似した式を表5-3にまとめた。

表5-3 クーラーボックス特性式

Lev1	$\Delta T = 19.15 \exp(-0.0007512t)$
Lev4	$\Delta T = 30.77 \exp(-0.0007219t)$
Lev7	$\Delta T = 27.23 \exp(-0.0007265t)$

これより、温度変化前の内部温度  $T_{Bin}$ 、外部温度  $T_{Bout}$ 、温度変化後の内部温度  $T_{Ain}$ 、経過時間  $t$  (min) の関係は

$$T_{Ain} = (T_{Bin} - T_{Bout}) \exp[-7.2 \times 10^{-4} \times t] + T_{Bout}$$

となる。

導かれた特性式を用いて外気温を変化させた際の内部温度の推定と実測値を比較した。クーラーボックス外の温度は今回も冷凍庫を利用し、Level 1 から 7 まで 2 時間毎に一段ずつ変化させた。結果は図5-5である。

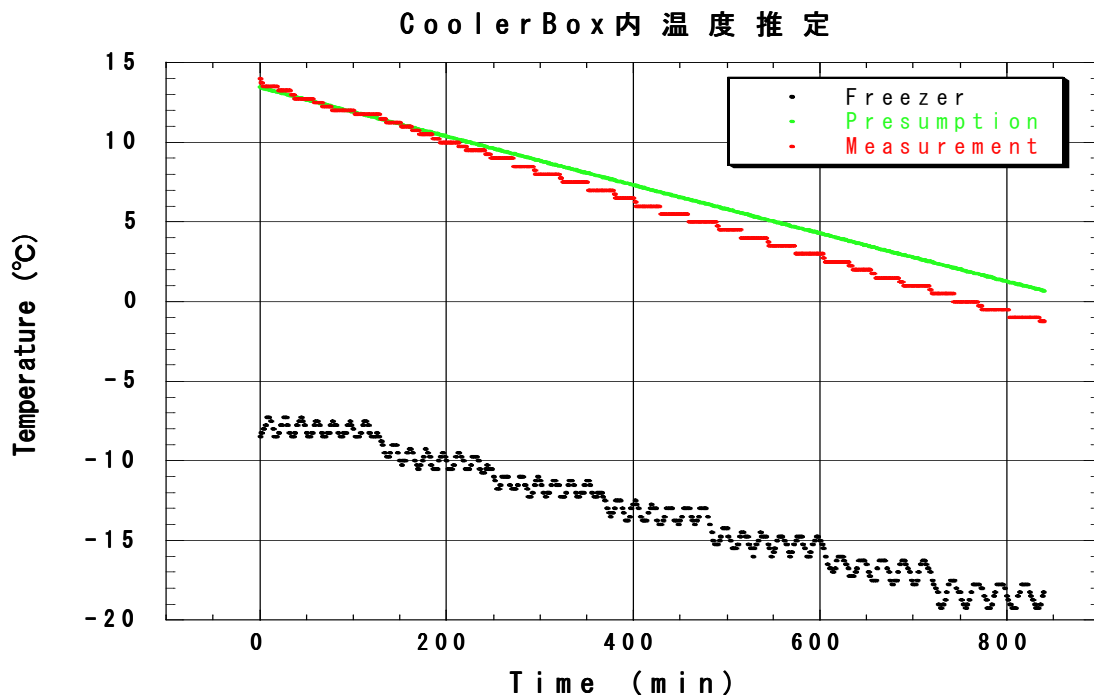


図5-5 クーラーボックス内温度と推定値

実測値が $-1.25^{\circ}\text{C}$ であるのに対して、推定値は $0.68^{\circ}\text{C}$ であった。温度変化の様子は比較的似ていると言える。しかし、14時間で約 $2^{\circ}\text{C}$ の差であった。

### 5-3-2 外部温度変化時の特性

外部温度が変化する際、外温が一定の時とは特性式の係数が変化する可能性が考えられ  
 あった。そのため、推定値との比較の際に行ったのと同様の試験を温度変化の時間間隔を  
 変えて温度計測を行い、それぞれに実測値と推定値がより一致する係数を特定する。特性  
 式による推定値よりさらに一致させた例を図5-6に示す。

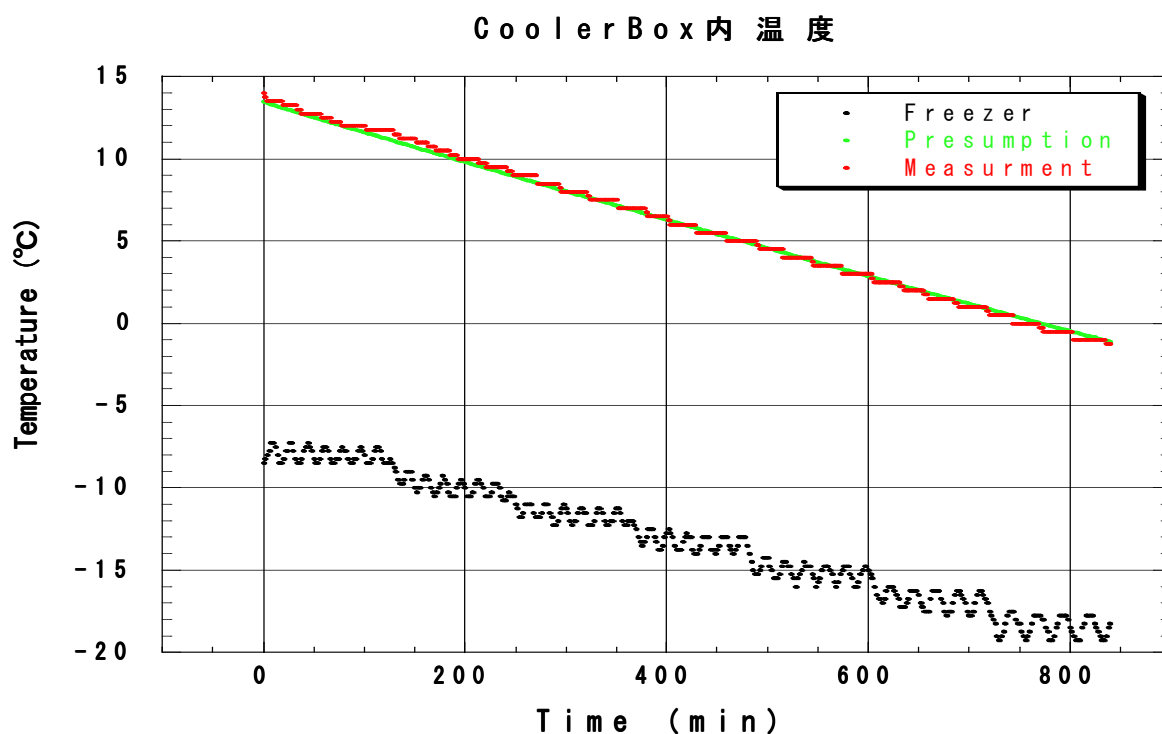


図5-6 クーラーボックス内温度と推定値②

外温がほぼ一定での内温の温度変化と外温が変化する際での内温の温度変化では、特性  
 式の係数が違ってくると仮定して、外温の低下速度と特性式の係数を表5-4と図5-7  
 にまとめた。外気温の変化速度と係数の関係は

$$y = 5.04 \times 10^{-4} \exp[4.397 \times 10 \cdot x] - 1.3 \times 10^{-3}$$

となり、外気温が変化時のクーラーボックス内外の温度の関係は

$$T_{Ain} = (T_{Bin} - T_{Bout}) \exp[yt] + T_{Aout}$$

となる。



表 5 - 4 外気温の変化速度と特性式係数

スイッチ間隔	外温低下速度(°C/min)	係数
0.0hr	0	-0.00073
0.5hr	-0.050747	-0.00125
0.5hr	-0.054124	-0.00125
1.0hr	-0.026252	-0.00115
2.0hr	-0.014305	-0.0009
2.0hr	-0.01338	-0.001
3.0hr	-0.009186	-0.0011

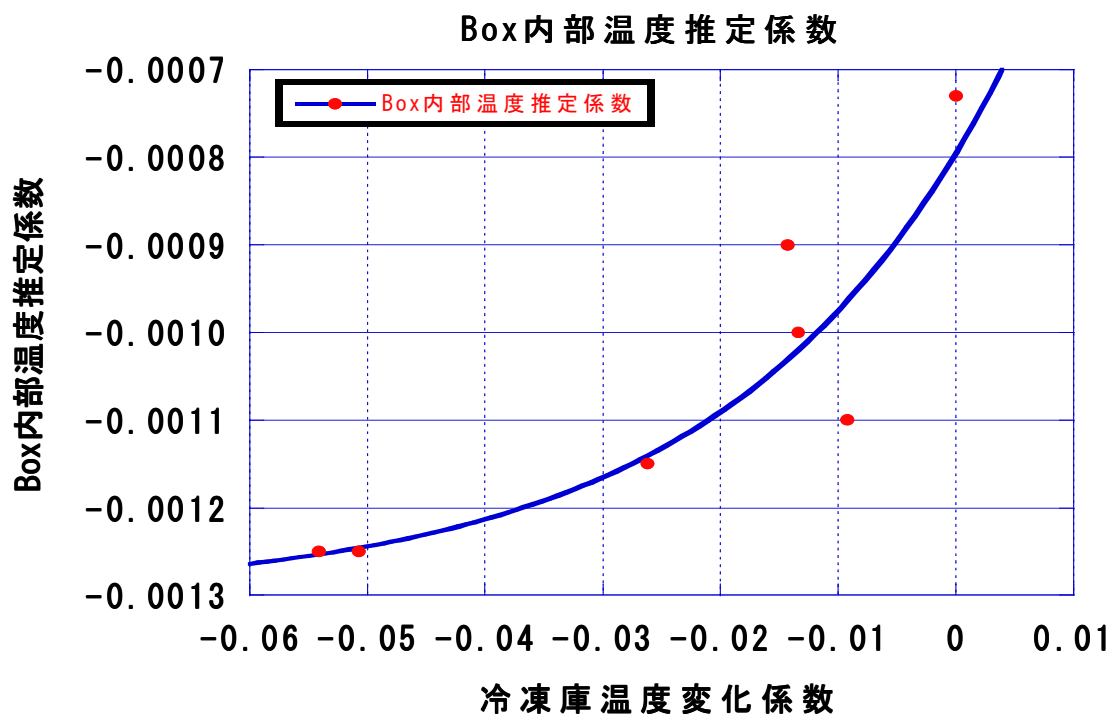


図 5 - 7 外気温の変化速度と特性式係数

ここで、Delta 気温およびクーラーボックス内の温度の実測値、Delta 気温と前項でもとめた関係よりクーラーボックス内の温度の推定結果を比較する。図 5 - 7 にその例（2006/11/28～12/6）を示す。図 5 - 8 より、実測値は推定値に比べ外気温の変化から大きく影響を受けていることが分かる。つまり、クーラーボックス内の温度変化は前項で考慮された以上に外気温の変化に影響される。そこで温度変化の効果を含まない特性式を第一項とし、新たに温度変化の項を加えることにした。ここで 11/29 の昼の最高温度付近に注目すると、外気温の変化が直接的に内部温度に影響しているのが判る。そこで外気温変化の 25%が内部温度に影響させると、図 5 - 9、図 5 - 10 のように非常に実測値と推定値は近いものとなった。

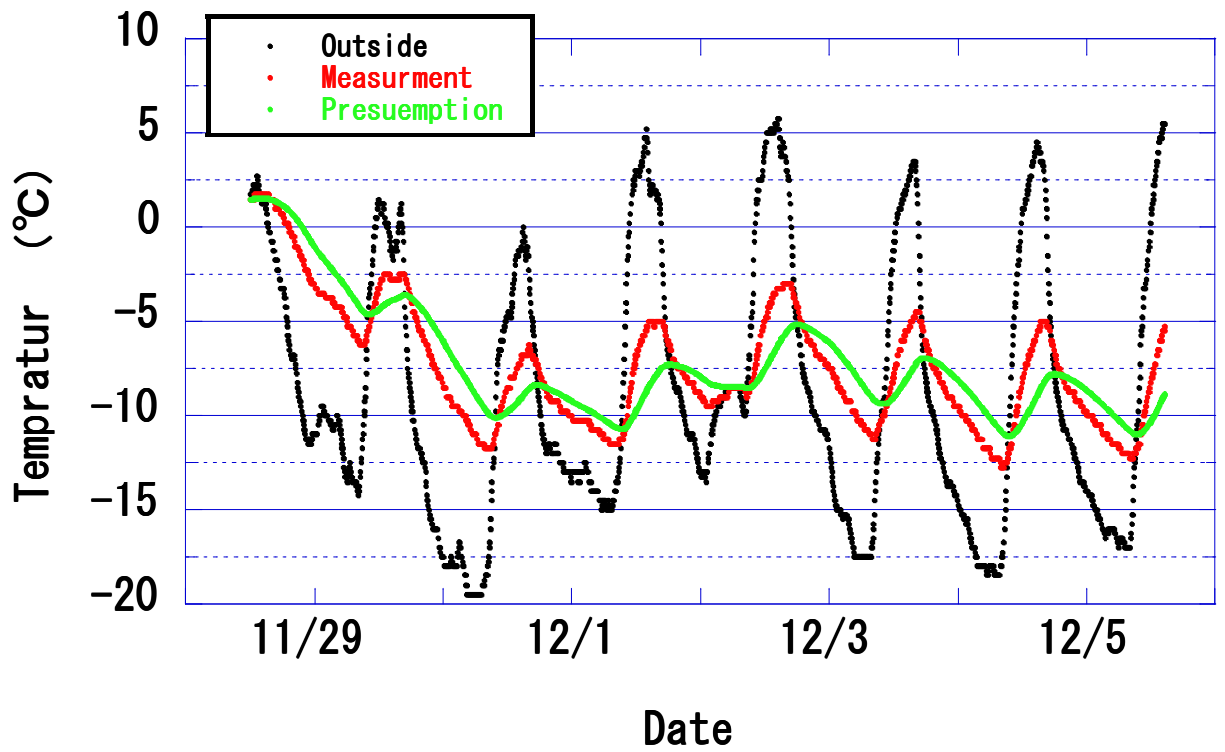


図5-8 クーラーボックス内の温度推定値と DELTA 実測値①

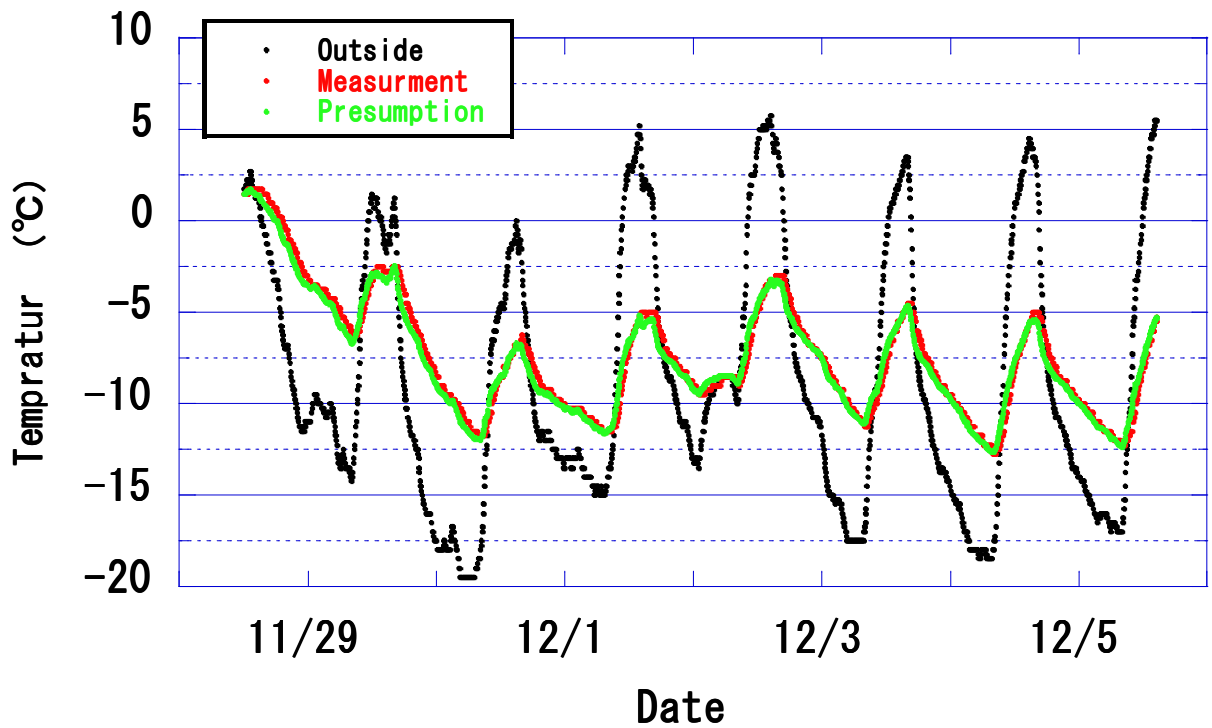


図5-9 クーラーボックス内の温度推定値と DELTA 実測値②

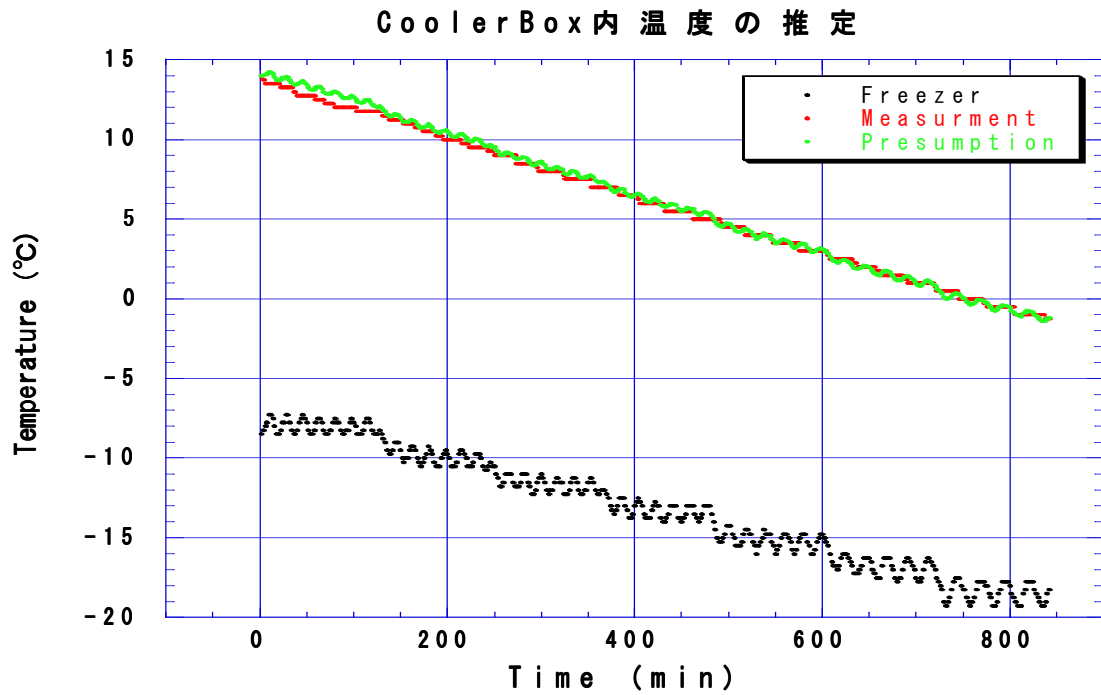


図5-10 クーラーボックス内温度と推定値③

よって、温度変化前の内部温度  $T_{Bin}$ 、外部温度  $T_{Bout}$ 、温度変化後の内部温度  $T_{Ain}$ 、外部温度  $T_{Aout}$ 、経過時間  $t$  (min) の関係は

$$T_{Ain} = (T_{Bin} - T_{Bout}) \exp[-7.2 \times 10^{-4} \times t] + T_{Bout} + (T_{Aout} - T_{Bout}) \times 0.25$$

となる。

## 第6章 ヒーター

バッテリーは温度の低下にともないその能力著しく低下させてしまう。このため冬場は Heater を使用することとなった。ここでは SD で使用する2種類の Heater および、その他の熱源についてまとめる。

### 6-1 フィルム型ヒーター

これは  $40\Omega$  のフィルム状の抵抗 (図6-1) に加電しその熱を利用するモノで、実際には4枚を並列に設置しバッテリー側面に貼り付けて使用する。

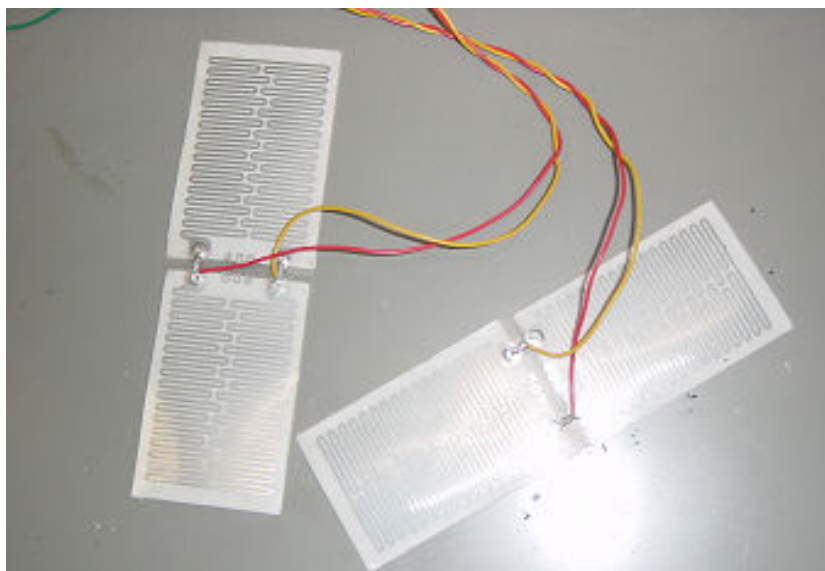


図6-1 フィルムヒーター

### 6-2 放熱板

これは通常 SD エレクトロニクス本体内のレギュレータを使用しているところを、クーラーボックス内の小型エレクトロニクス上のレギュレータを使用し、そこで放出される熱をバッテリーの保温に流用しようというものである。図6-2の○部分が放熱部である。

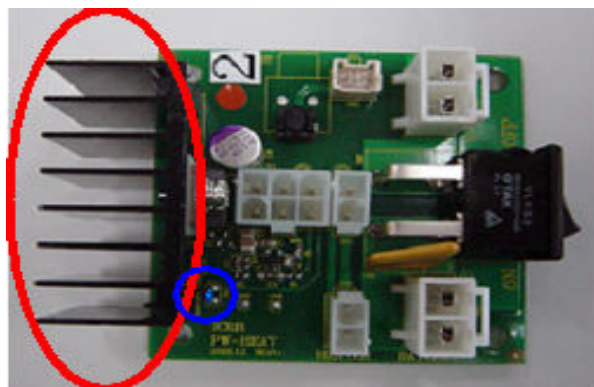


図6-2 小型エレクトロニクスと放熱板

### 6-3 実験システム

フィルムヒーター試験と放熱板試験はそれぞれクーラーボックス試験、SD-チャージコントローラ試験と同じ装置を利用し行った。フィルムヒーター試験はクーラーボックス内に設置したバッテリーの側面にフィルムヒーターを貼り付けておき、外部を冷凍庫で約-20℃に保った上で、これに加電し、クーラーボックス内の温度上昇について調べる。試験は放熱板試験と同様に冷凍庫内を約-20℃に保ち、放熱板以外の熱源を全て冷凍庫外に設置した状態で、放熱板の設置された小型エレクトロニクスを介して冷凍庫外のバッテリーに充電する形で行った。温度の採取はThermo Managerと小型エレクトロニクスに設置された温度計(図6-2○部)を用いた。Thermo Managerはクーラーボックス内外共に上部、中部、下部を測定して平均値をその値とした。

### 6-4 ヒーター性能

#### 6-4-1 フィルムヒーター性能

2006年5月末より、フィルムヒーター試験を行った。試験結果の例を図6-3に示す。

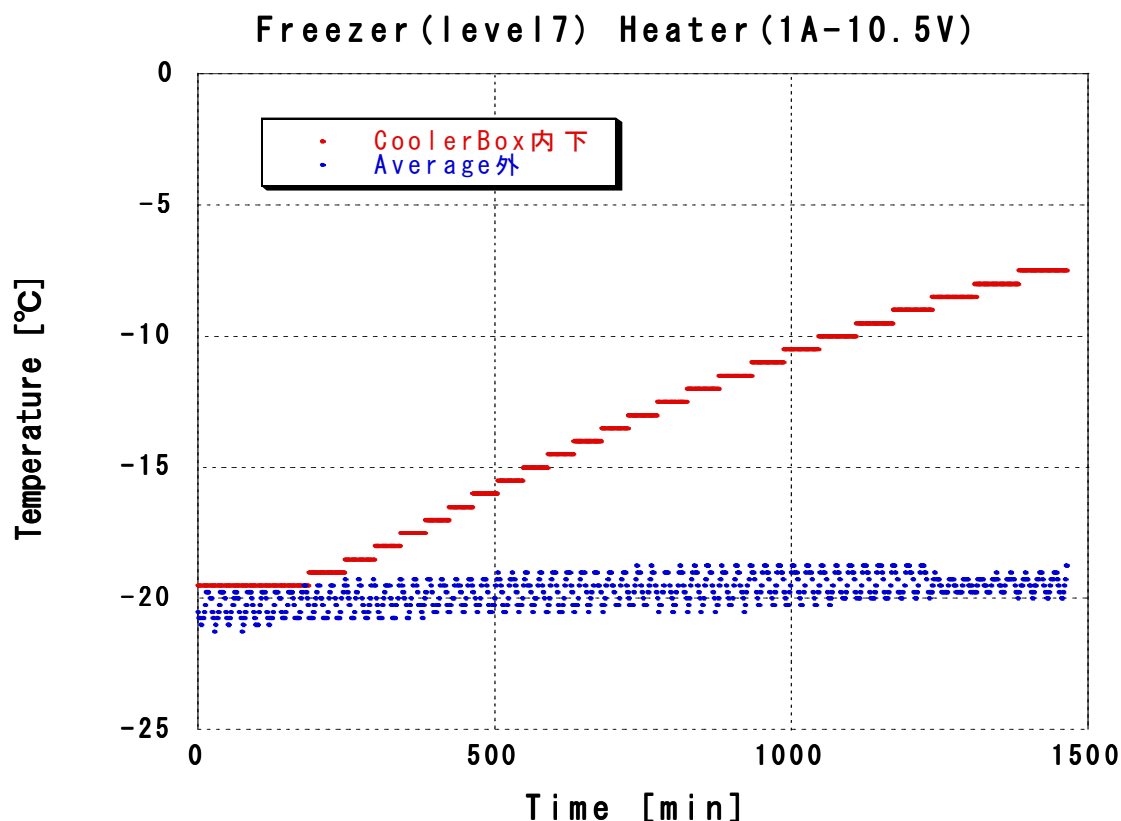


図6-3 フィルムヒーター使用時の温度上昇

クーラーボックス外部と内部の温度差とその温度から 1.0℃上昇させるのに必要な電力量の相関を試験別に描写すると図6-4になる。

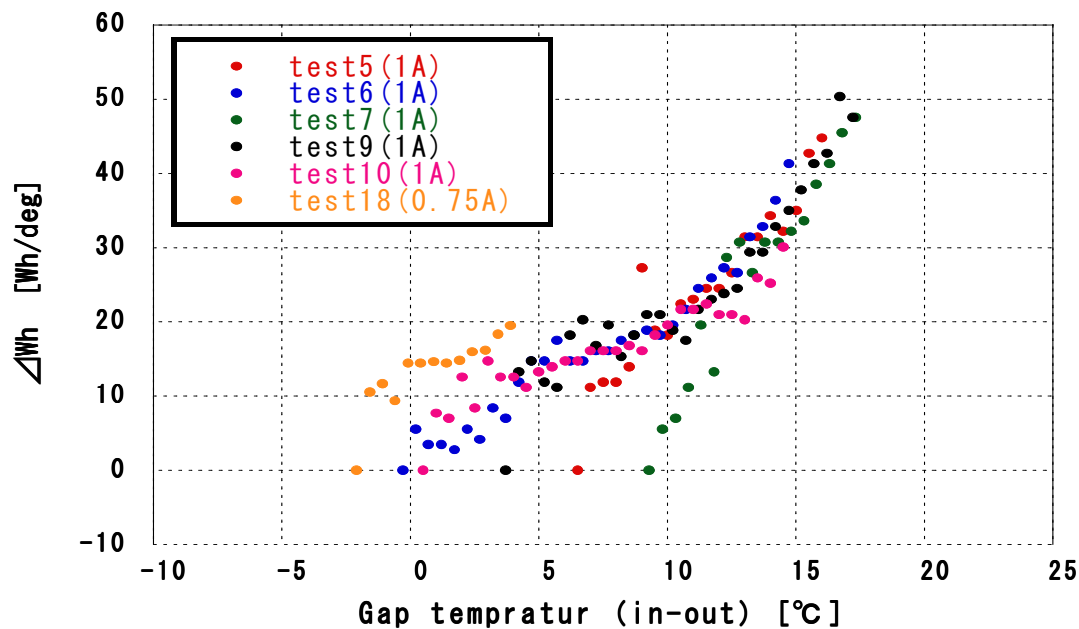


図6-4 ボックス内を単位温度上昇に必要なエネルギー量

さらにこれを、全試験を統一し、単位電力量あたりの上昇温度として図6-5にプロットした。

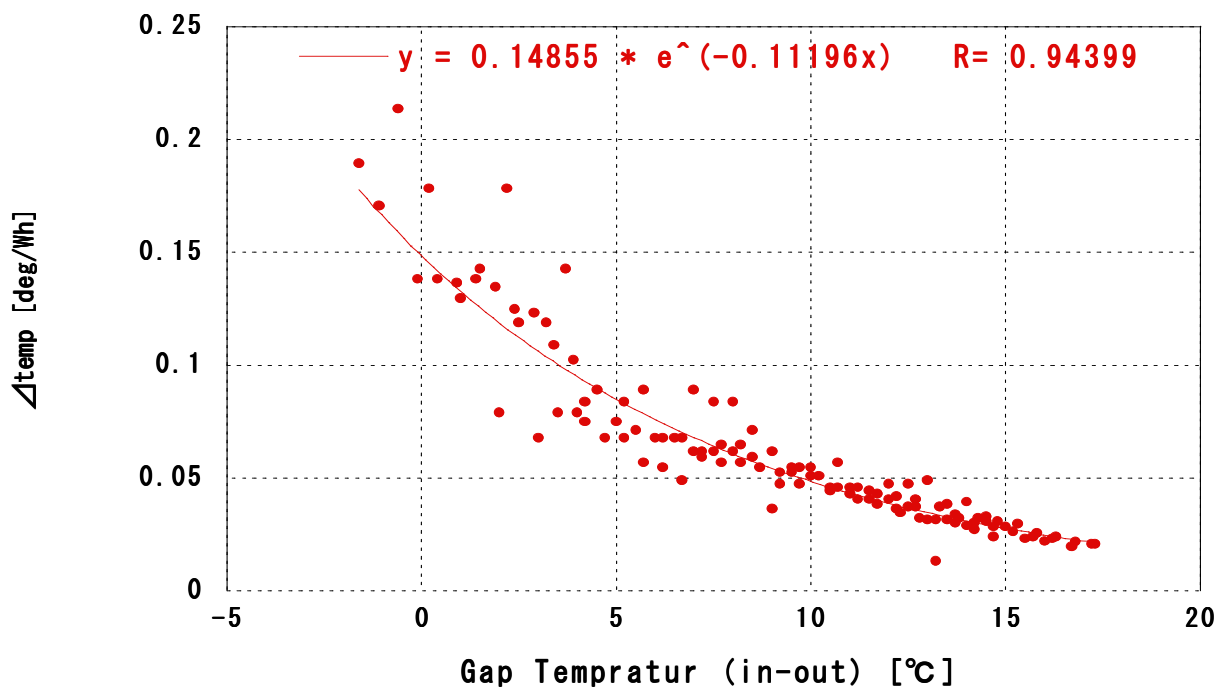


図6-5 単位エネルギーで上昇するボックス内温度

単位電力量での温度上昇  $t$  とクーラーボックス内外の温度差  $T$  の関係は

$$t = 0.14855 \times \exp[-0.11196 \cdot T]$$

となる。

#### 6-4-2 放熱板性能

2007/5/12、この放熱板を利用してクーラーボックス内を保温する試験を行った。結果は図6-6に示す。

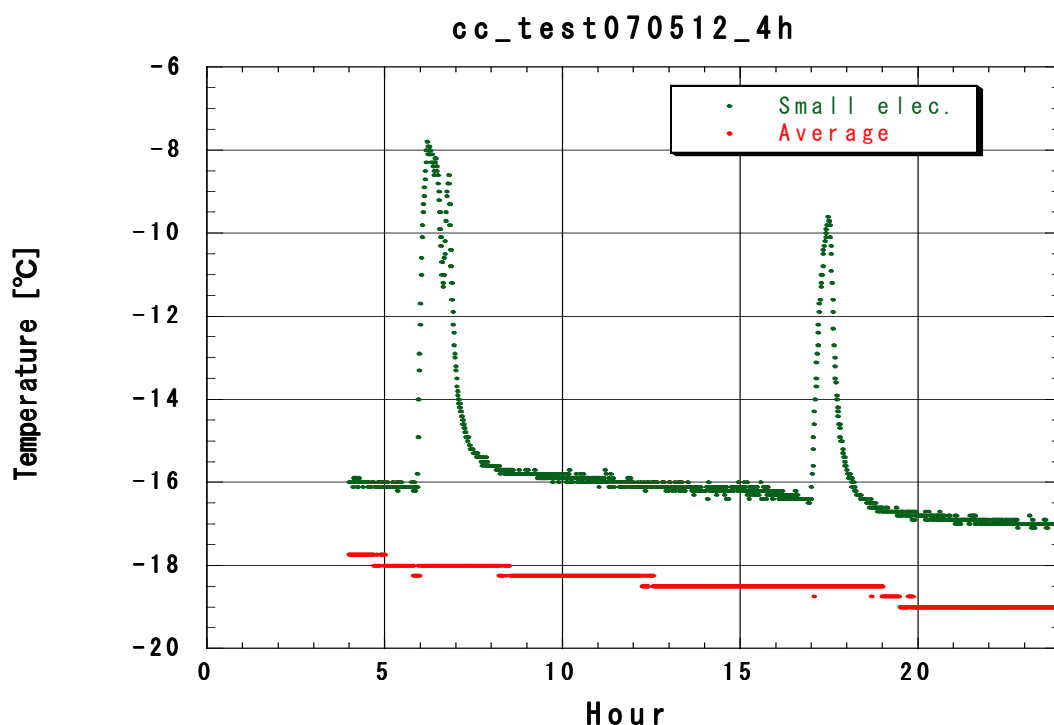


図6-6 放熱板の効果①

午前4時から計測を始めたのだが日の出と共に放熱板の取り付けられた小型エレクトロニクスの温度センサーは強く反応して約8°C上昇している。しかし1時間ほど経過したところで急激に温度が低下してもとの温度に戻ってしまっている。その後温度変化は無く、再び午後17時から同じように反応している。そこでこれにバッテリー電圧を重ねたものが図6-7である。バッテリーが満充電になり電圧が一定になった時には温度は上昇せず、早朝と夕方のバッテリーに充電されている時のみ温度上昇がみられる。そして、短時間のみの放熱ではクーラーボックス内の平均温度は全く上昇していない。そこでバッテリーに21Wの電球を接続し消費をしながら行った放熱板の実験の結果である図6-8を見てみるとやはり充電電力に伴い1日放熱し続けている。しかしながら、前結果と大差なくクーラーボックス内の平均温度は最大でも0.5°Cの上昇で効果は非常に小さいものであった。

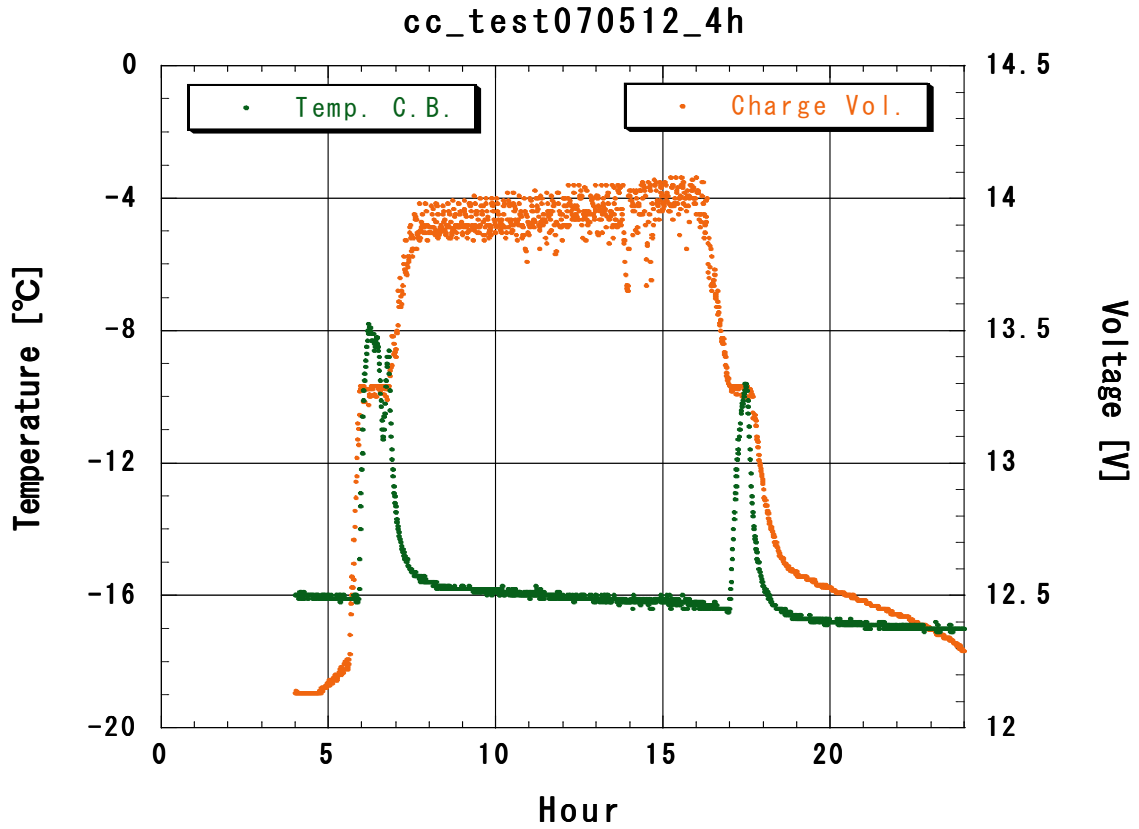


図6-7 放熱板の効果②

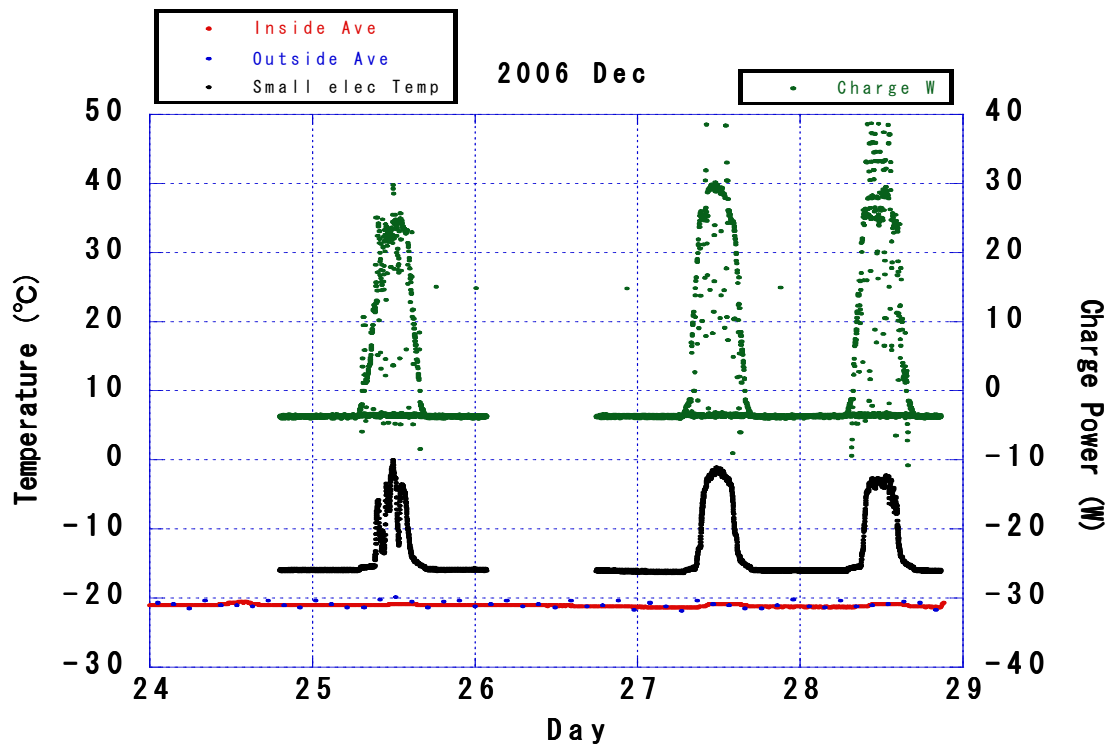


図6-8 放熱板の効果③



## 6-5 SD 小型エレクトロニクス温度センサー性能

放熱板の試験の結果、放熱板の効果が得られると同時に小型エレクトロニクスの温度センサーが 5℃から 2℃ずれている事が分かった。そこで小型エレクトロニクス温度センサー付近の温度を Thermo Manager で計測し比較することとした。小型エレクトロニクス温度センサーおよび Thermo Manager 設置位置は図 6-9 に写真で示す。小型エレクトロニクス温度センサーが赤で見緑と青が Thermo Manager である。またクーラーボックス内平均温度とも比較し小型エレクトロニクス温度センサーの計測値との関係も調べた。

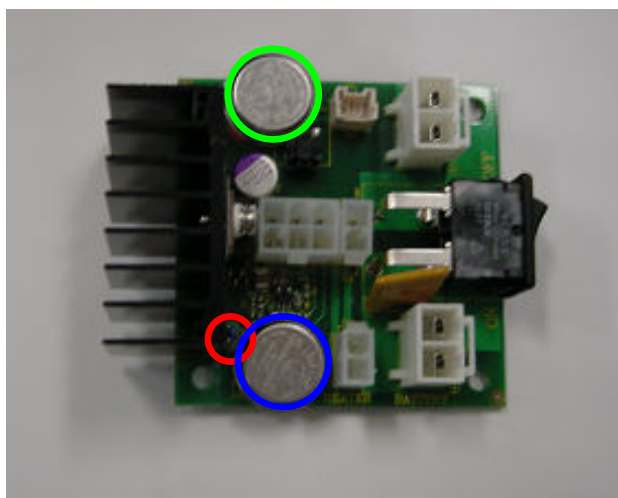
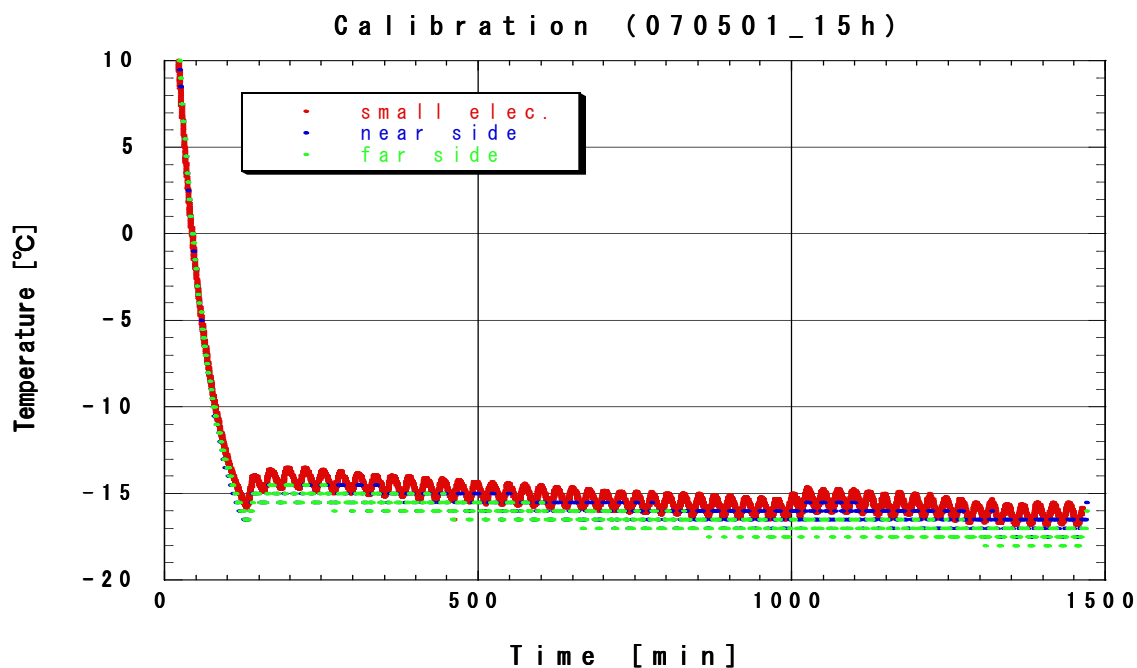


図 6-9 温度計測場所



※プロットと写真の計測器の位置は同色にしてある。

図 6-10 温度計較正

図6-10に示したのが放熱板ヒーターを使用せずにバッテリーを充電した際の小型エレクトロニクス温度センサーと Thermo Manager での温度測定の結果である。温度下降時は3つの機器共に同じ温度を示している。しかし温度が安定しだすと小型エレクトロニクスの温度センサーから近い Thermo Manager で $-1.3^{\circ}\text{C}$ 、遠い Thermo Manager で $-1.6^{\circ}\text{C}$ の差がある。Thermo Manager の分解能が $0.5^{\circ}\text{C}$ なのでこの2つはほぼ同じ値であるので、周辺温度が低温で安定している際は温度センサーと Thermo Manager の差は約 $1.5^{\circ}\text{C}$ である。また、放熱板のみを使用した場合は図6-6、図6-8より $2^{\circ}\text{C}$ から $5^{\circ}\text{C}$ 、小型エレクトロニクス付近の温度が高い。

# 第7章 シミュレーション

前章まで SD 電力系統に関わる機器の性能についてまとめてきたが、本章ではそれらを基に SD バッテリーの残存電力を推定する。これにより年間稼働日数、電力的デッドタイム、効率的な SD 自動停止電圧や自動復旧電圧、バッテリー交換時期設定が可能になる。

## 7-1 シミュレーション概要

まずシミュレーションの流れを図7-1に記す。入力には Community Environmental Monitoring Program (CEMP) (<http://www.cemp.dri.edu/cemp/>) から得られる1時間毎の DELTA 市街内公園で計測されている日射強度と気温を用いている。

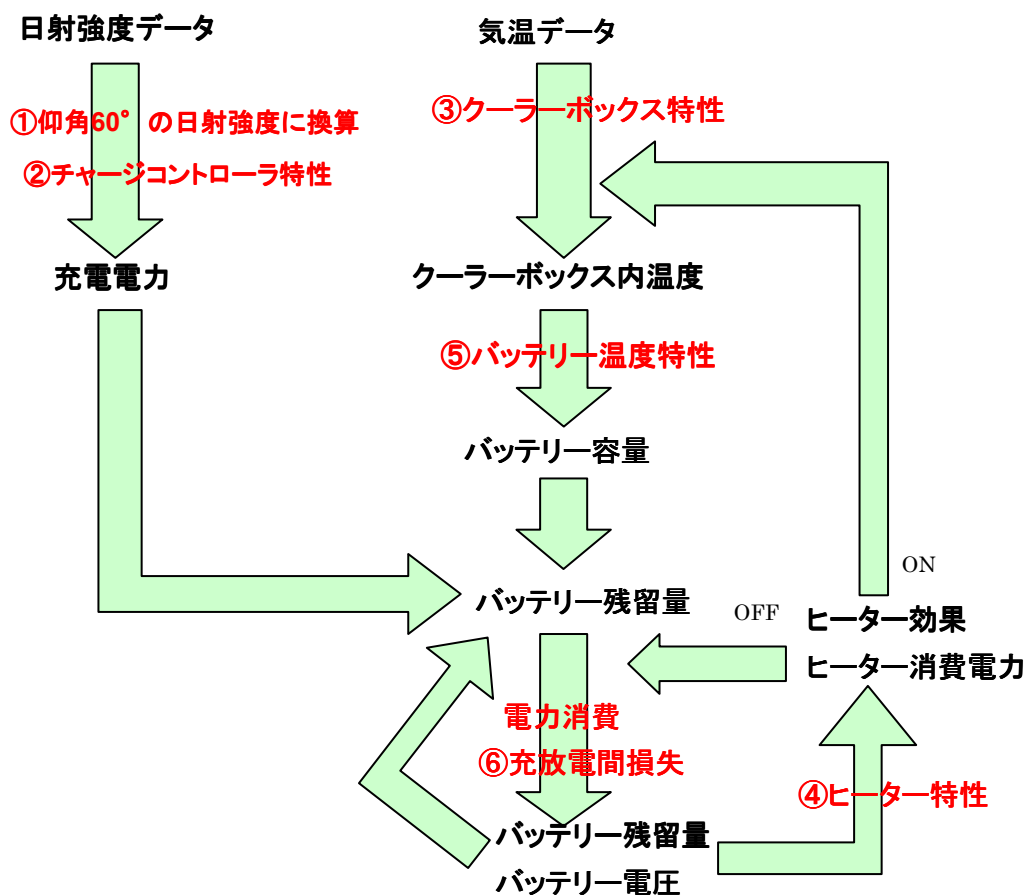


図7-1 シミュレーション概要

- ①-1 太陽位置の特定
- ①-2 太陽光発電パネルの太陽方向有効面積率の算出
- ①-3 パネルの受ける日射強度の推定
- ②-1 パネル特性からの発電電力量の推定
- ②-2 チャージコントローラ特性からの充電電力量の推定
- ③ クーラーボックス内温度の推定
- ④ ヒーター効果でのクーラーボックス内温度の補正
- ⑤ バッテリー容量の推定
- ⑥-1 充電間の損失電力量の推定
- ⑥-2 バッテリー残量およびバッテリー電圧の推定

これを順を追って各項目について説明していく。

#### ①-1 太陽位置の特定

太陽位置は実験地によって変わる上、発電量は太陽光発電パネルの受ける放射線量に比例する、太陽の位置からパネルを見たパネルの有効面積は太陽位置とパネル角度に依存する。発電量の推定には非常に重要な項目なので太陽光発電の章に重複しているが載せておく。

CEMP の日射強度データは一般的なそれと同じように水平に設置された機器で観測されている。SD パネルは冬季により多くの日射を得られるように仰角 60° に設置されている。そのため、CEMP で計測されている日射強度は 60° 相当に換算しなければならない。換算法は単位面積平面と太陽位置から太陽位置から見た垂直面積を単位面積 0° と 60° に対し計算し、その面積比と仰角 0° の観測値との積で仰角 60° 相当の数値とするものである。

- ・北緯 ( $\phi$ )
- ・東経 ( $L$ )
- ・中央標準時 ( $T_s$ )
- ・中央標準時子午線 ( $L_s$ )
- ・太陽赤緯 ( $\delta$ )

$$\delta = 0.33281 - 22.984\cos(\omega J) - 0.34990\cos(2\omega J) - 0.13980\cos(3\omega J) \\ + 3.7872\sin(\omega J) + 0.0325\sin(2\omega J) + 0.07187\sin(3\omega J)$$

※  $\omega = 2\pi/365$  閏年は  $\omega = 2\pi/366$   $J$  = 元日からの通算日数 + 0.5

- ・均時差 ( $e$ )

$$e = 0.0072\cos(\omega J) - 0.0528\cos(2\omega J) - 0.0012\cos(3\omega J) \\ - 0.1229\sin(\omega J) - 0.1565\sin(2\omega J) - 0.0041\sin(3\omega J)$$

※  $\omega = 2\pi/365$  閏年は  $\omega = 2\pi/366$  J = 元日からの通算日数 + 0.5

・ 真太陽時 (T)

$$T = T_s - (L - L_s) / 15 - e$$

・ 時角 (t)

$$t = 15 \cdot T - 180$$

・ 太陽高度 (h)

$$\sin h = \sin \phi \cdot \sin \delta + \cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \cos t$$

・ 太陽方位角 (A)

$$\cos A = (\sin h \cdot \sin \phi - \sin \delta) / (\cos h \cdot \cos \phi)$$

この時、太陽の座標は次のようになる。

$$\begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos A \cdot \cos h \\ \sin A \cdot \cos h \\ \sin h \end{bmatrix}$$

### ①-2 太陽光発電パネルの太陽方向有効面積率の算出

- ・ 有効面積率  $R_A$
- ・ 面積の仰角  $\theta$
- ・ 面積の真南からの方位角のズレ  $\phi$
- ・ パネルの単位法線ベクトル

パネルの有効面積率は太陽の位置座標とパネルの単位法線ベクトルの外積なので

$$R_A = \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x_v \\ y_v \\ z_v \end{bmatrix} = -\sin \theta \cdot \sin \phi \cdot \cos A \cdot \cosh \\ - \sin \theta \cdot \cos \phi \cdot \sin A \cdot \cosh + \sinh \cdot \cos \theta$$

となる。

### ①-3 パネルの受ける日射強度の推定

- ・ パネルの受ける日射強度  $SR_R$
- ・ Delta 実測の日射強度  $SR_D$
- ・ 水平時の有効面積  $R_{A0}$
- ・ パネル角の有効面積  $R_{AX}$

とすると

$$SR_R = (R_{AX} / R_{A0}) \times R_{SD}$$

となる。

### ②-1 Solar Radiation の換算値より発電電力量の推定

発電電力は太陽光発電パネルの受ける日射強度にほぼ比例し、その係数はパネルの種類によって変わってくるが、SD に使用する KC-120T は日射強度  $1000 \text{ (W/m}^2\text{)}$  で  $120 \text{ (W)}$  発電するので  $0.12$  が係数となる。またパネル設置場所が砂漠ということで清掃などのメンテナンスも困難なので表面の汚れ状態などからの損失も考慮して積算する。発電出力はバッテリー充電の際に、調整やバッテリー保護のために電力を消費放出し、さらに充電電力には上限があり頭打ちする。SD エレキの場合、発電電力の約  $25\%$  の消費放出を行い  $54\text{W}$  で充電最大電力になる。

- ・ 発電電力  $P_{GO}$
- ・ パネル表面状態による損失率  $R_S$

また、日射強度  $1000 \text{ (W/m}^2\text{)}$  で  $120 \text{ (W)}$  発電するので

$$P_{GO} = 0.12 \times SR_R \times R_S$$

となる。

### ②-2 充電電力の推定

- ・ Charge Controller による損失充電電力  $P_{LC}$
- ・ Charge Controller による損失率  $R_{CC}$

$$P_{LC} = R_{CC} \times (P_{GO} - P_{LS})$$

- ・ 充電電力  $P_B$
- ・ 充電最大電力  $P_{Max}$

$$P_B = P_{GO} - P_{LS} - P_{LC}$$

$$P_B > P_{Max} \text{ の時}$$

$$P_B = P_{Max}$$

### ③ クーラーボックス内温度の推定

バッテリーの容量はその温度により大きく変化する。そのためクーラーボックス内の温度の推定を CEMP による DELTA 気温から推定する。クーラーボックス内温度はボックス内外の温度差と外部温度の変化に依存することが分かっているので、そこから算出すると

- 温度変化前の内部温度  $T_{BI}$
- 温度変化前の DELTA 気温  $T_{BO}$
- 温度変化後の内部温度  $T_{AI}$
- 温度変化後の DELTA 気温  $T_{AO}$
- 経過時間  $t$

$$T_{AI} = (T_{BI} - T_{BO}) \exp[-4.32 \times 10^{-3} \times t] + T_{BO} + (T_{AO} - T_{BO}) \times 0.25$$

となる。

#### ④ ヒーター効果でのクーラーボックス内温度の補正

クーラーボックス内の温度の著しい低下を防ぐためにヒーターを設置しているが、これによる温度上昇はボックス内外の温度差およびヒーター使用電力によって決まる。

- 単位電力量での温度上昇  $DT$
- Battery 電圧  $V_B$
- film-ヒーター消費電力  $P_{FH} = V_B^2 / 10$
- 補正後のクーラーボックス内温度  $T_C$

$$DT = 0.14855 \times \exp[-0.11196 \cdot (T_{BI} - T_{BO})]$$

$$T_C = T_{AI} + DT \cdot P_{FH}$$

#### ⑤ バッテリー容量の推定

バッテリーに充電可能な電力、つまりバッテリーの容量はバッテリー試験では各温度で取り出し可能な電力量として試験した。バッテリーの温度特性は2次曲線で近似可能だったが、その係数は温度、バッテリー状態によって様々な値をとった。具体的な数値はバッテリーの章にあるので、ここでは係数は a、b、c とした。

- battery 温度  $T_B = \text{AVERAGE}(T)$  (before 3 hr)
- 取り出し可能最大電力量  $E_{MAX}$  (Whr)
- 自動 OFF のソフト制御電圧  $V_{CS}$  (V)
- バッテリー温度特性係数 a、b、c

$$V_{CS} = \alpha \quad E_{MAX} = a_{\alpha} (T_B)^2 + b_{\alpha} (T_B) + c_{\alpha}$$

#### ⑥-1 充電時損失電力量の推定

充電電力とそこからの取り出し可能電力の間には、バッテリー内部抵抗エネルギーの状

態変化などで損失が出る。試験の結果、充電器を用い、消費 60W の場合であるが DYNASTY 製 DCS-100L の充放電間には 10% の損失があることが判明している。

- 充電時損失電力  $P_{LB}$
- 充電時損失率  $R_B$

$$P_{LB} = R_B \times P_{CC}$$

### ⑥-2 バッテリー残量およびバッテリー電圧の推定

SD の一部機能はバッテリー電圧の条件によって使用の可否が決まる。バッテリー電圧が一定値以下まで低下するまでは、使用済み電力と電圧の関係は線形的である。またその計数はバッテリーの関係の数値なので、他の例と変わらず温度によるものである。

- Battery 残量  $E_{RO}$
- 1 hr 前の Battery 残量  $E_{Rb}$
- SD 消費電力  $P_{SD}$

$$E_{RO} = E_{Rb} + P_B - P_{SD} - P_{fH} - P_{LB}$$

- 使用済み電力量  $E_{USE} = E_{MAX} - E_{RO}$
- Battery 電圧  $V_B$
- Battery 電圧係数  $A$ 、 $B$

$$A = 7.8839 (T_B) - 1.525 \times 10^{-3}$$

$$B = -1.6305 \times 10^{-4} (T_B)^2 + 9.1099 \times 10^{-3} (T_B) + 12.479$$

$$V_B = A \cdot E_{USE} + B$$

以上の計算を用いてシミュレーションするのだが、用いている式の導出法はそれぞれの機器の章にて説明しているので、より知りたい方は読み返していただきたい。

## 7-2 シミュレーション精度

シミュレーションにおいて精度は非常に重要な項目なので、その精度を試験した。試験には SD エレクトロニクス社のチャージコントローラ試験と同じ装置を利用した(図 7-2)。冷凍庫で外気温を一定に保ち、バッテリーを十分に充電した後に太陽光発電パネルとの接続を切り離しエレクトロニクスが停止するまでの電圧と時間を同条件に設定したシミュレーションと比較をする。

消費電力を実測値より 4 W、冷凍庫は  $-18^{\circ}\text{C}$  付近で安定させ、バッテリーは使用回数が少なく劣化はないものを利用した例のシミュレーションと実測地の比較が図 7-3 である。



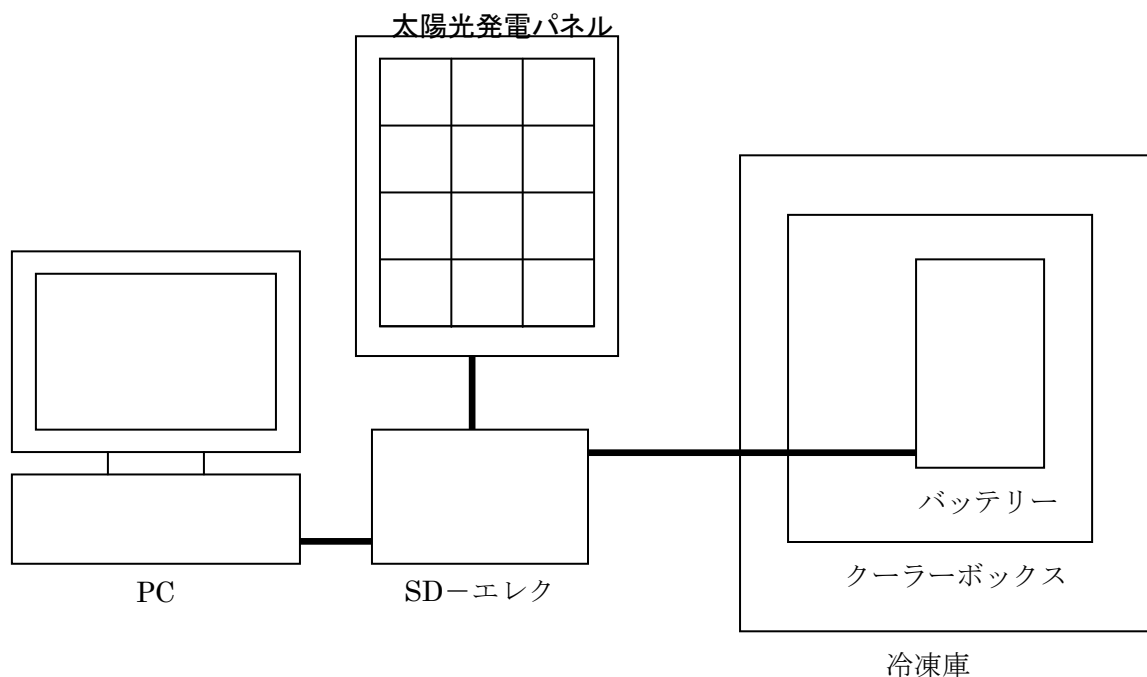


図 7-2 シミュレーション確認試験

シミュレーションのバッテリーが枯渇する直前に電圧のシミュレーションと実測の差は最大の 0.3V となる。停止時間はシミュレーションの方が 10 時間早く停止しており、シミュレーションの方が停止しやすい見積もりになっている。バッテリー温度  $-18^{\circ}\text{C}$  の際に停止までの使用可能電力量に 50Wh のばらつきがあり、4W 消費で半日程度の誤差は許容される。また充電無し、氷点下  $20^{\circ}\text{C}$  近い極限状態においてもバッテリーの劣化がない状態であれば 5 日間の稼働は可能であることも分かった。

バッテリーが劣化した状態でのシミュレーション、実測の比較は図 7-4 である。試験はバッテリー test760 から 790 の間に行われ、冷凍庫を用いずに 8 月の実施のため  $30^{\circ}\text{C}$  以上の室温での実施となった。シミュレーション設定は、消費電力は同じく 4W、気温は  $30^{\circ}\text{C}$  とした。こちらもシミュレーションの方が停止しやすい設定であることは変わらないが約 2 日も早く停止しており、劣化がない状態と比べると電源システムの能力を低く見積もっている。これは、劣化バッテリーの温度試験を  $10^{\circ}\text{C}$  以下でしか行っておらず、今回のような高温の状態の数値が取りきれていなかったことが原因の 1 つと考えられる。また、劣化してない状態と比べて温度に対するバッテリー容量にばらつきが大きかったことも原因と考えられる。原因はいくつかあると考えられるが、とにかく劣化バッテリーに関してはシミュレーションの信頼度は低く、かなり低い見積もる結果になった。

4 章に記載したように、さらに劣化の進んだ状態のバッテリーが存在しているがこの論文の提出期限と試験予定の都合がつかず、そのような状態とシミュレーションと実測値の比較は今後の課題となっている。

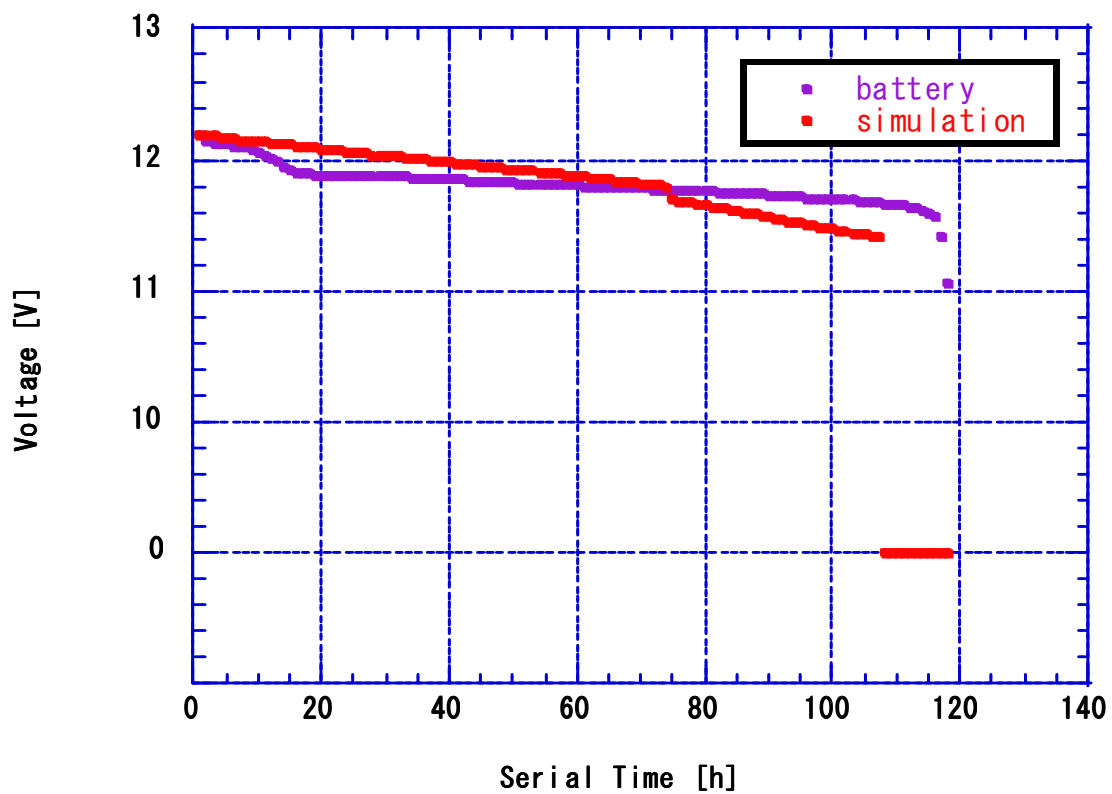


図7-3 シミュレーション電圧と実測値1

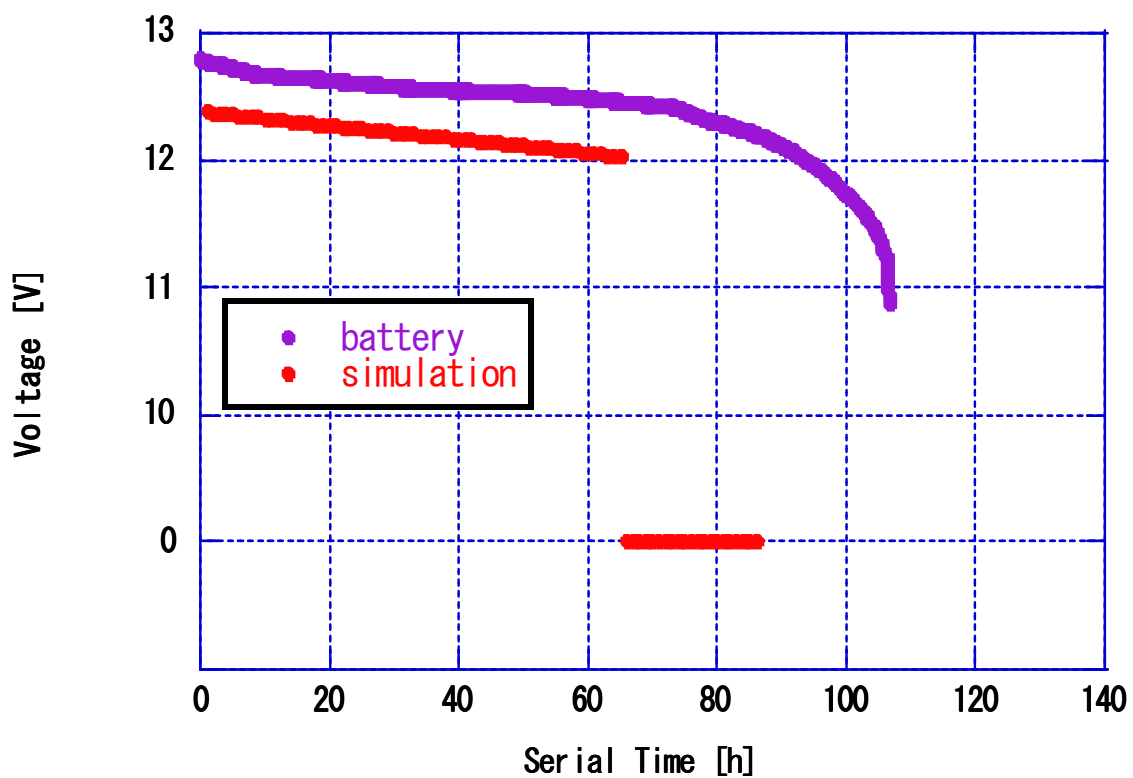


図7-4 シミュレーション電圧と実測値2

### 7-3 地表検出器の年間稼働日数

CEMP データを用い、残り使用可能エネルギー量、電圧を算出した。期間は 2003 年 1 月から 2007 年 2 月までの約 4 年間、消費電力 6 W、休止復旧電圧を 11 V とし、ヒーター未使用の条件で行った。消費電力が大きくなっているのは、実験室ではデータ送信用長距離無線をしていないことを考慮したためである。

#### 7-3-1 健全バッテリー

図 7-5 はバッテリーの 2003 年の入力データ（日射強度、気温）と劣化していないバッテリーを使用した場合のシミュレーション結果である。

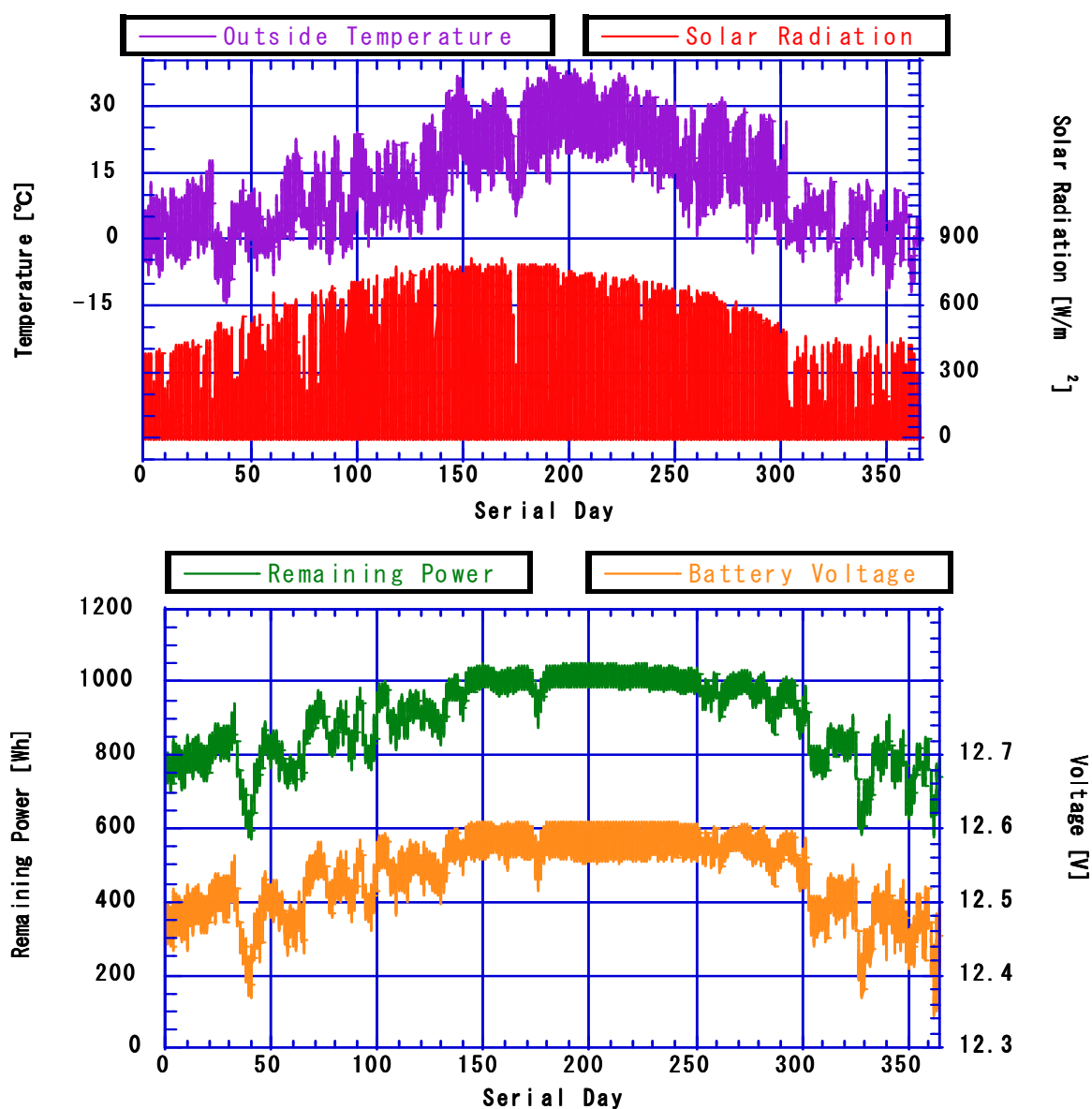


図 7-5 シミュレーション結果 1

2003 年は現状の設定で使用しても 1 年通して全く停止しない。同設定で 2003 年から 2007 年までの停止時間と停止までの残量が 1.5 日分の 200Wh を下回った時間をまとめた。

表 7-1 停止および残量低下の時間と回数 1

		停止	残量 < 200
時間	2003	0	0
	2004	0	30
	2005	0	0
	2006	10	41
	2007	0	0

		停止	残量 < 200
回数	2003	0	0
	2004	0	2
	2005	0	0
	2006	1	1
	2007	0	0

2004 年に 95hr (1/27 13:00~1/31 11:00) と 2006 年に 121hr (3/9 18:00~3/14 19:00) のデータ欠損があるため、実質は装置に何らかの欠陥が発生しない限りは停止の電力面からの停止は全く無いといえる。

### 7-3-2 劣化バッテリー

図 7-6 は図 7-4 の劣化バッテリーを使用した場合のシミュレーション結果である。入力データは同様に 2003 年のものである。

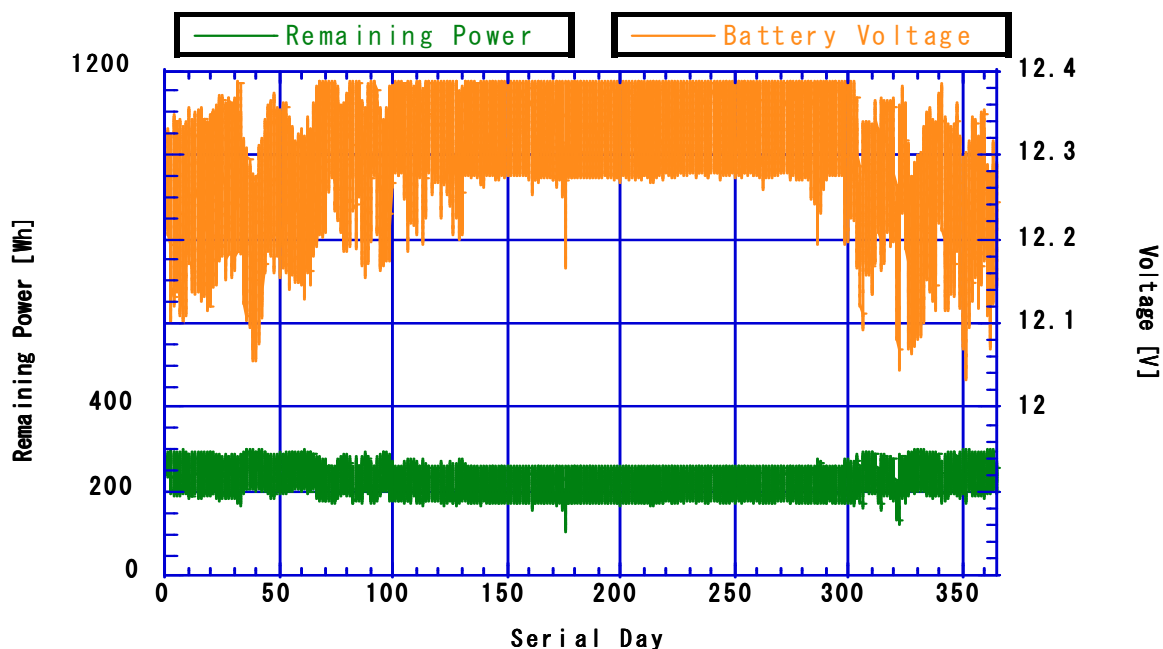


図 7-6 シミュレーション結果 2

表 7-2 停止および残量低下の時間と回数 2

		停止	残量 < 200
時間	2003	0	1521
	2004	47	1568
	2005	0	1727
	2006	60	1828
	2007	0	94

		停止	残量 < 200
回数	2003	0	305
	2004	1	282
	2005	0	293
	2006	4	291
	2007	0	26

前項で劣化したバッテリーのシミュレーションは実際より性能低く見積もっており、停止し易くなっているが、日射強度データの欠損している以上期間しか停止していない。停止の可能性が高く危険な残量になる時間は、年間の最大バッテリー容量でも 300Wh 無いこともあって非常に長くなっており、ほぼ毎日危険な残量まで達している。

### 7-3-3 最劣化バッテリー

精度確認には間に合わなかったが、バッテリーがさらに劣化した（バッテリー試験で test1000 以上）ので参考までにシミュレーションした。結果は図 7-7 である。使用電力量と電圧の相関がとれなかったためバッテリー残量のみでの評価となっている。

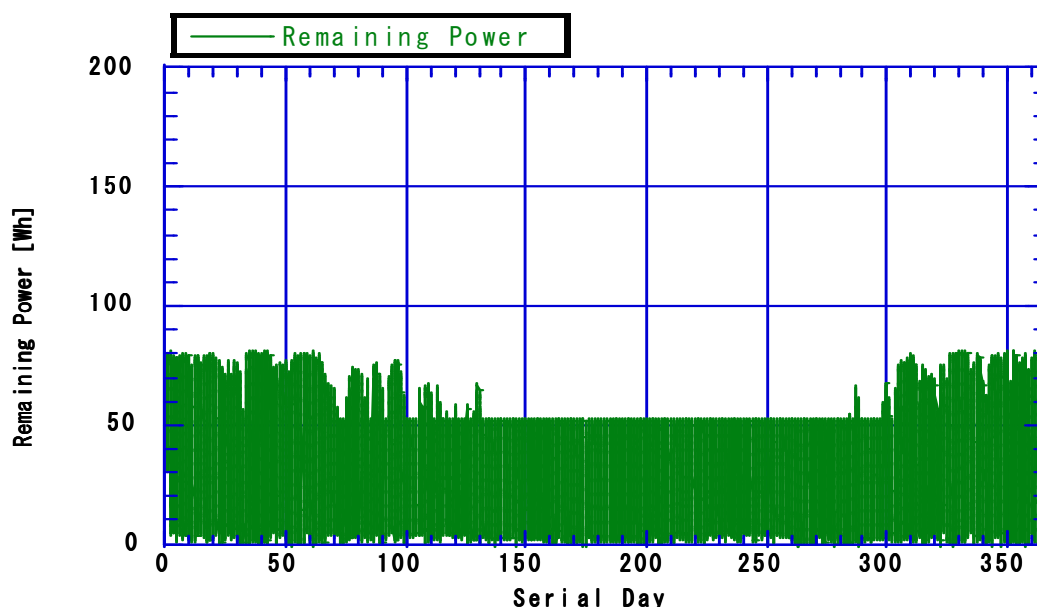


図 7-7 シミュレーション結果 3

ここまで劣化すると残量は常に停止危険量でほぼ毎日停止する。前記の劣化バッテリーのように性能を低く見積もっている可能性もあるので課題である試験が急務である。しかしながら、時間効率が高いことが SD の強みなので停止の危険性は避けたくこのような事態に

至る前にバッテリーの交換をしなければならない。バッテリー試験を 900 回ほど行ったところでバッテリーの劣化はこの段階には至っている。SD 6 W の消費電力に対し実験室では 60W の 10 倍の負荷だったので、少々試験より長く見積もっても、負荷の違いとバッテリー寿命の関係が分かっていない現状では 3 年間の連続使用でバッテリー交換が停止させない十分条件であろう。

#### 7-4 ヒーター使用の効果推定

6 章に記載してある様に SD のバッテリーを保温しているクーラーボックス内に 10Ω のフィルム型抵抗ヒーターが設置されている。これを使用した効果を検証してみる。全く制御をしないで 1 年を通して使用した温度、バッテリー残量と使用していないものとの比較の 2003 年の例がそれぞれ図 7-8、図 7-9 である。

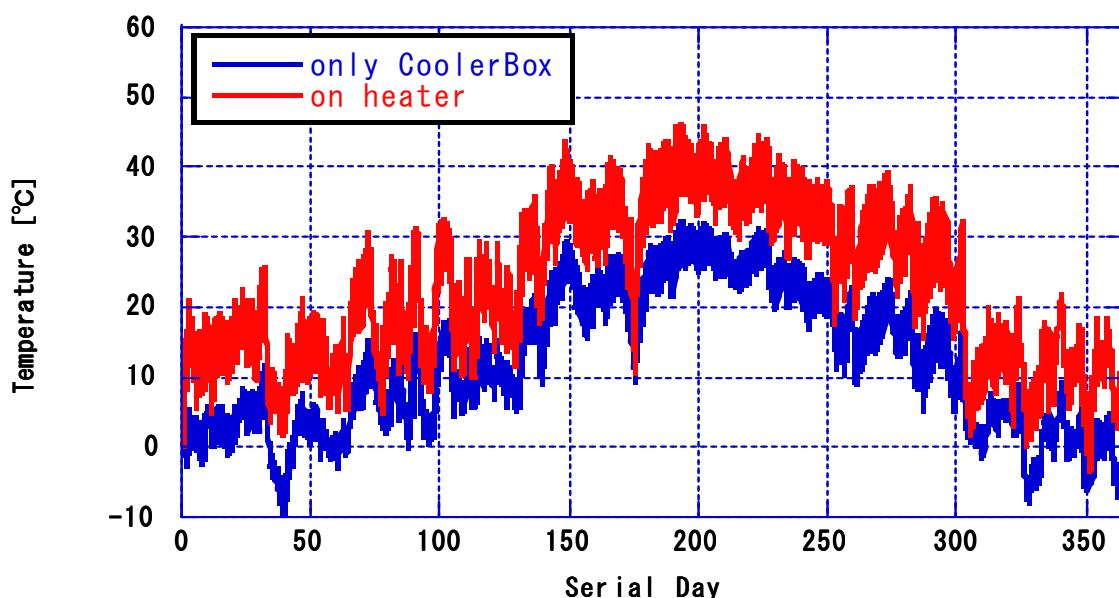


図 7-8 ヒーター使用による温度効果

クーラーボックス内の温度はいずれも上昇しており、未使用時はボックス内温度が氷点下に約 900 時間なっていたが、使用時は 15 時間のみとなっている。例となっている 2003 年以外でも温度が氷点下になる時間は表 7-3 に示すように全ての年で減少している。しかしながらヒーターの使用によってバッテリー残量も大幅に低下しており、無秩序なヒーターを使用は損害の方が大きくなる。

表 7-3 氷点下時間の変化 1

temp	< 0	No Use	On heater
時間	2003	893	15
	2004	1594	480
	2005	880	60
	2006	1427	404
	2007	944	409

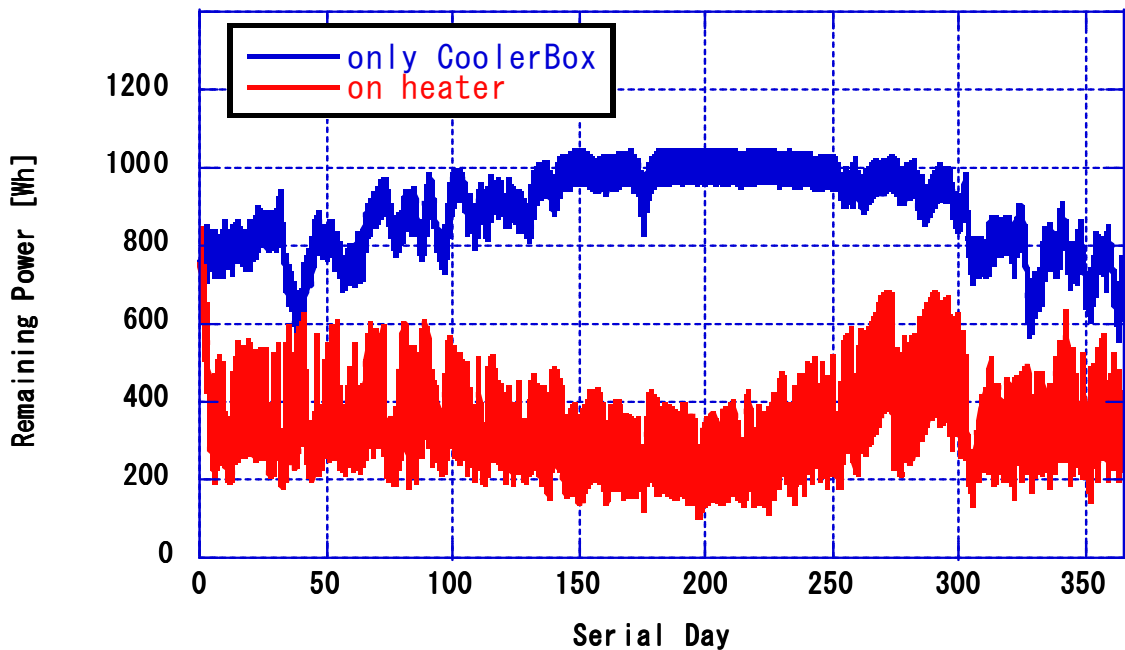


図 7-9 ヒーター使用によるバッテリー残量効果

そこでバッテリー電圧 12.4V 以上時のみにヒーターの使用を制限して、満充電時のみのヒーター使用にした。同様に温度効果と残量効果を図 7-10、図 7-11 に示す。2003 年の場合は温度の上昇は常時使用した際と同じく上昇しているように見える。各年の内部温度の氷点下時間の変化は表 7-4 である。

表 7-4 氷点下時間の変化 2

Temp < 0	No Use	On heater
2003	893	30
2004	1594	745
2005	880	59
2006	1427	445
2007	944	599

常時使用した時ほどではないが最小でも 40% の削減に成功している。バッテリー残量では夏季はヒーター未使用の方が最小残量の方がより大きいこと、および内部温度の過度の上昇を防ぐためヒーター不使用が推奨される。冬季では例としてプロットしている 2003 年ではヒーター使用の方が最小残量の方がより大きくなっており、他年でも表 7-1 にある 2006 年の停止が解消され、2004 年 1 月および 2006 年 3 月の残量 200Wh 以下の期間も 3 時間と 34 時間に少しずつではあるが効果のある結果となっている上、内部温度の安定も図れるので推奨される。

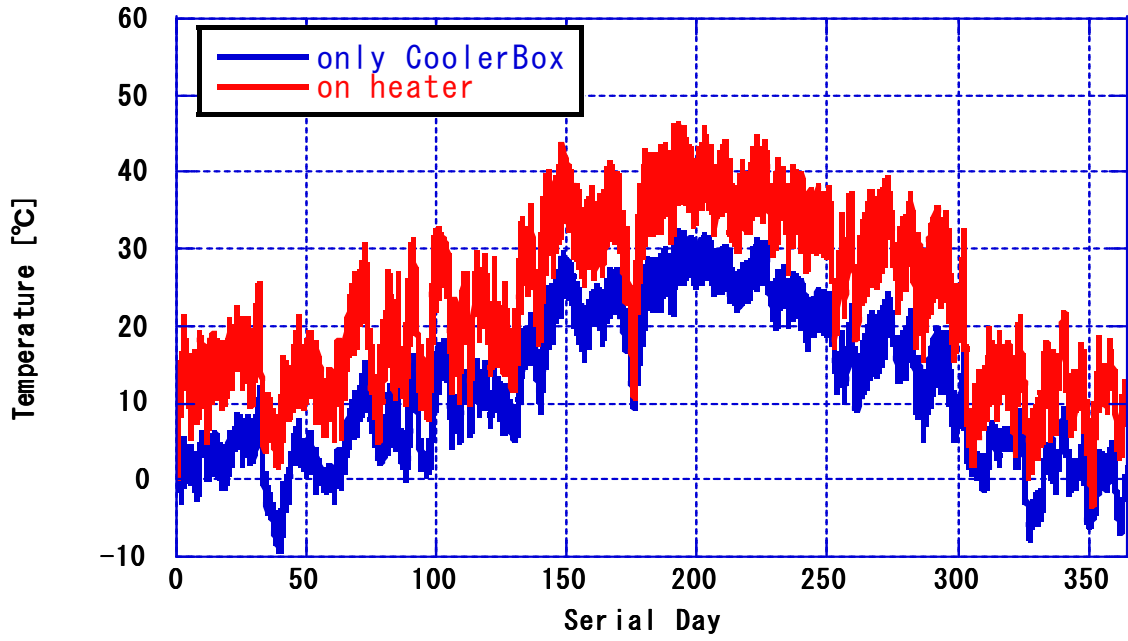


図 7-10 満充電時のみヒーター使用の温度効果

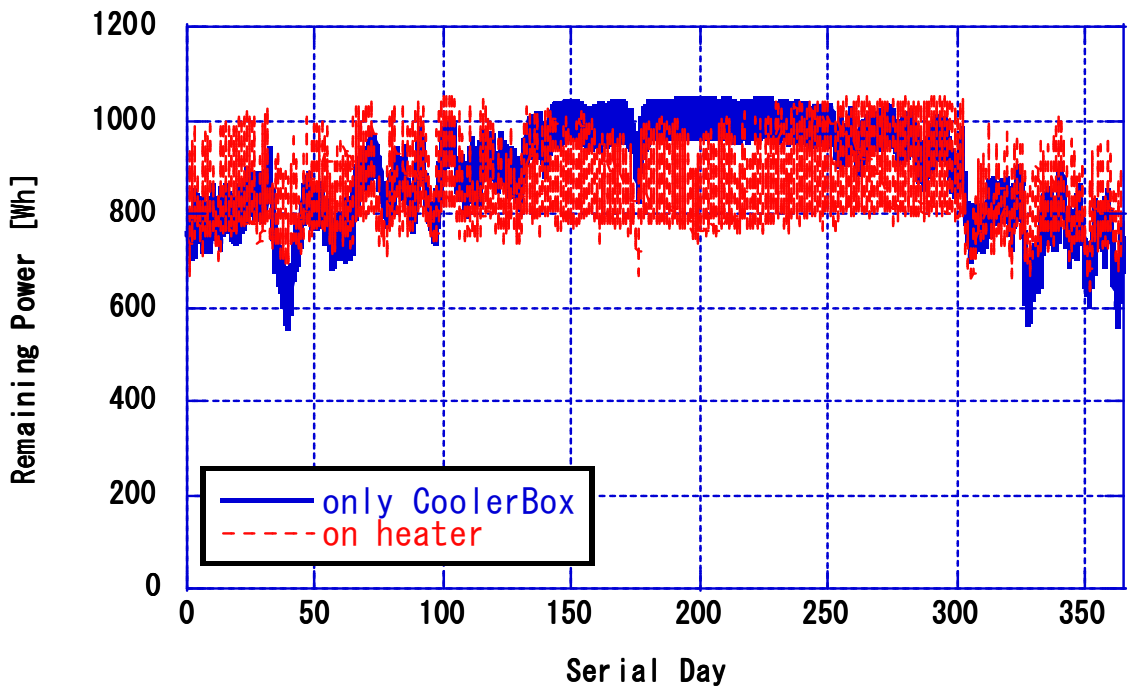


図 7-11 満充電時のみヒーター使用のバッテリー残量効果



## 第8章まとめ

地表検出器に使用される電力系機器の性能試験結果および、それを基に作成したシミュレーションの結果、宇宙線望遠鏡実験の地表検出器の運用について次の3つを提言する。

- イ) 太陽光発電パネルの破損、バッテリーの劣化などのシステムの不具合が無ければ電力低下による停止の可能性は非常に小さい。
- ロ) バッテリーは最短 3 年間の連続使用で地表検出器運用不可能な劣化状態に至ってしまうため、実験期間の 10 年の間に 1、2 回の交換が必要となる。
  - ※ よりバッテリーの劣化兆候などの挙動を調べ交換時期の特定が急務。
- ハ) 保温用ヒーターは満充電時のみ使用する条件でバッテリー延命の目的を達する。運用するのであれば、さらに冬季のみを対象にすることが推奨される。
  - ※ 但し、イの様に現状でも十分な電力は得られ、不可欠な変更では無い。得られる電力は大きさ、この点の変更に必要な労力、宇宙線望遠鏡実験の人員数などの状況から考える必要がある。

## 参考文献

- [1] 宇宙線 (改訂版) 小田 稔
- [2] 文章 Wikipedia 宇宙線 (改訂版) にて確認
- [3] 極高エネルギー宇宙線の大気蛍光法観測に用いる大気較正法の開発  
部山 和愛
- [4] 東京大学宇宙線研究所 中期整備計画 (2004-2009) 提案書 宇宙線望遠鏡計画  
宇宙線望遠鏡グループ
- [5] バッテリーの温度特性及び耐久試験システム 露口 勇輔
- [6] バッテリー耐久試験システムについて 大石 泰也
- [7] 太陽光発電システム用バッテリーの耐久試験について 安西 賢二

## 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。

東京大学宇宙線研究所

福島正己教授、佐川宏行助教授、林田直明助手、竹田成宏助手、櫻井信之特任助手、小澤俊介研究員、野中敏幸研究員、有働慈治研究員、得能久生研究員、柴田達信研究員、武多昭道さん、木戸英治さん、山川雄一さん

大阪市立大学

荻尾彰一助教授、奥田剛司さん

山梨大学

本田建教授、石井孝明准教授、寺田英嗣准教授、岩本祥平さん、露口勇輔さん、小田卓馬さん、望月靖仁さん、鵜飼久さん

皆様に御指導や、実験への御協力、相談にのっていただく事が無ければ本論文が完成はありませんでした。深く感謝しております。