

2006 年度修士論文

宇宙線実験における太陽光発電システムの
シミュレーション

山梨大学大学院医学工学総合教育部(修士課程)

機械システム工学専攻

指導教員 本田 建 教授

G05MM008 生田 健

2007 年 3 月

第1章 緒論.....	4
1-1 宇宙線とは.....	4
1-2 超高エネルギー宇宙線とは.....	5
1-3 T A計画とは.....	6
1-4 地表検出器 Surface Detector (S D) について.....	7
1-5 S Dの電力消費.....	10
1-6 研究目的.....	11
第2章 シミュレーション概要.....	12
第3章 パラメータ算出実験.....	18
3-1 日射強度と太陽光パネル.....	18
3-1-1 日射強度.....	18
3-1-2 太陽光パネル.....	24
3-2 チャージコントローラ特性.....	35
3-2-1 実験装置概要.....	35
3-2-2 日射強度 充電電力.....	40
3-2-3 消費電力.....	42
3-2-4 午前と午後での違い.....	44
3-2-5 充電電力.....	46
3-2-6 現地での充電電力の推定.....	48
3-3 クーラーボックス特性.....	52
3-3-1 温度下降特性.....	52
3-3-2 温度上昇特性.....	56
3-3-3 現地での内部温度の推定.....	58
3-4 バッテリー放電発熱特性.....	62
3-4-1 実験装置概要.....	62
3-4-2 消費電力に伴う発熱.....	64
3-4-3 一日の温度推移.....	68
3-4-4 バッテリー温度の推定.....	69
3-5 エレキ発熱とバッテリー放電発熱.....	71
3-5-1 実験装置概要.....	71
3-5-2 一日の温度推移.....	73
3-5-3 冷凍庫内の温度分布.....	75

3-5-4 バッテリー温度の推定.....	77
第4章 シミュレーション方法.....	78
第5章 シミュレーション結果.....	84
5-1 日射強度と外気温.....	84
5-2 充電電力の推定.....	89
5-3 バッテリー温度の推定.....	97
5-4 バッテリー残留電力量の推定.....	101
5-5 稼働停止回数.....	106
5-6 復帰条件.....	109
第6章 結果及び考察.....	114
参考文献.....	115
謝辞.....	116

第1章 緒論

1-1 研究背景

超高エネルギー宇宙線とは

山梨県北社市明野にて行われた広域空気シャワーアレイ (AGASA) 計画は、 10^{20} 電子ボルト (16 ジュール) を越える超高エネルギーの宇宙線を 11 例観測した。

一方、これまでに行なわれた他の宇宙観測実験によって宇宙はビッグバンの痕跡であるマイクロ波 (3 K 放射と呼ぶ) で満たされていることがわかっている。もし、超高エネルギー宇宙線の源がわれわれの銀河より外にあったならば、このマイクロ波と反応し、遮られてほとんど地球に届くことができないと理論的に予想される。

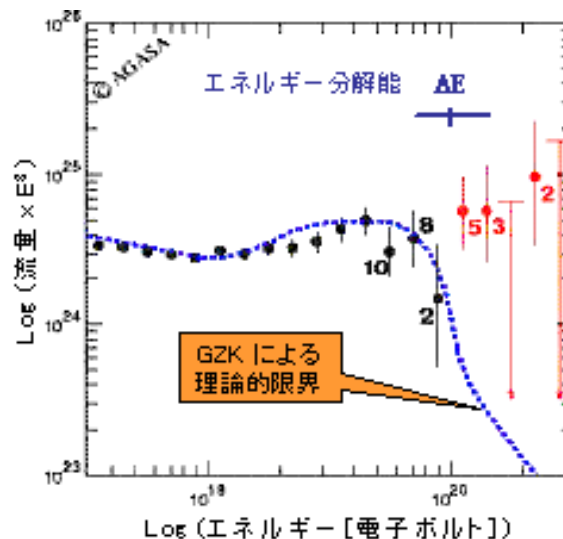


図 1-1 AGASA で観測された超高エネルギー宇宙線のエネルギー分布 (青線が理論予想、赤点が理論予想を超える領域のデータを示す)

しかし、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、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 11 例はこれまでに知られていない物理あるいは天体現象によって生まれ、そして伝播して来たと考えられる。ではこの超高エネルギー粒子の存在を確立すると共に、その発生起源と宇宙空間での伝播機構を解明することを目的とした計画が宇宙線望遠鏡 (TA) 計画である。

1-2 宇宙線について

TA 計画の詳細の前に、宇宙線とはどのようなものを述べる。

宇宙線は宇宙からやってくる放射線の一種であり、そのほとんどが水素の原子核の陽子(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分かっている。それ以上のエネルギーを持つものは、銀河系の中で創られているのか、銀河系外の宇宙で創られているかはまだ分かっていない。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。これらの多くはAGASA計画によって、どのようなエネルギーの宇宙線を観測することができた。

宇宙線の大きさを表す単位としてeV(エレクトロン・ボルト)という単位を使う。1eVとは1ボルトの電位差で、電子が陽極に到着したときのエネルギーの大きさをいう。

宇宙空間では高いエネルギーを持つ宇宙線も、地球大気に飛び込む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」(図1-2)という。

この空気シャワーの測定を行う実験が、AGASA計画であり、さらに9倍を超える感度の検出器を用いて超高エネルギー宇宙線の観測を行う計画が次に述べる、米国ユタ州の砂漠で行う予定のTA計画である。



図 1-2 空気シャワーの様子

1-3 TA 計画とは

TA (Telescope Array) 計画とは、AGASA 計画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9倍の感度を持つ高信頼度の地表粒子検出器アレイと空気シャワーの新しい測定方法である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、得られたデータをつか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 1-3)

大気蛍光望遠鏡を用いた観測は月のでていない暗夜のみ可能で、観測時間効率率は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)を捕まえることが出来る。

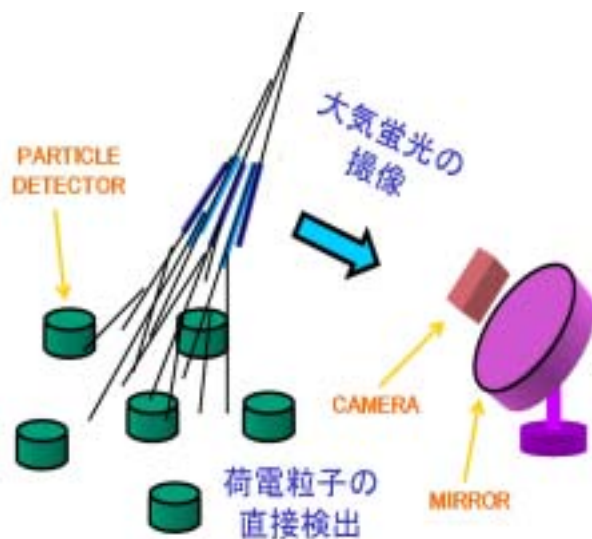


図 1-3 地表検出器と大気蛍光望遠鏡

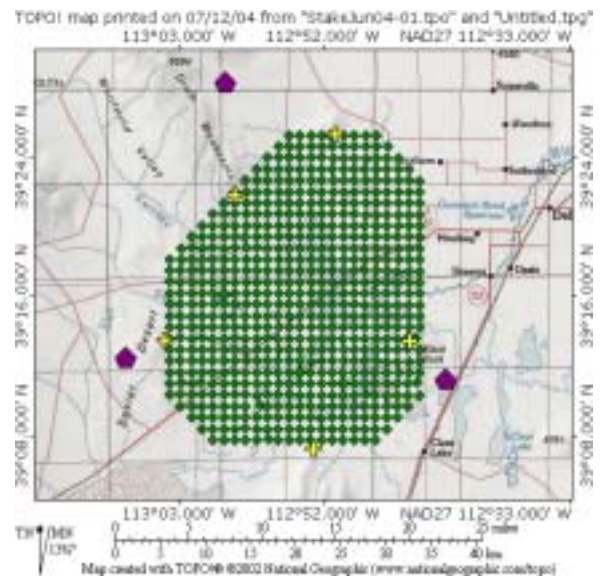


図 1-4 TA 計画予定地

観測装置は図 1-4 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。この地帯の大気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1.2km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1-4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。30km×30kmの範囲内に576台の検出器を置くので、1箇所ですべての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。

1-4 地表検出器 Surface Detector (SD)について

ここではSDの構造、しくみについて述べる。

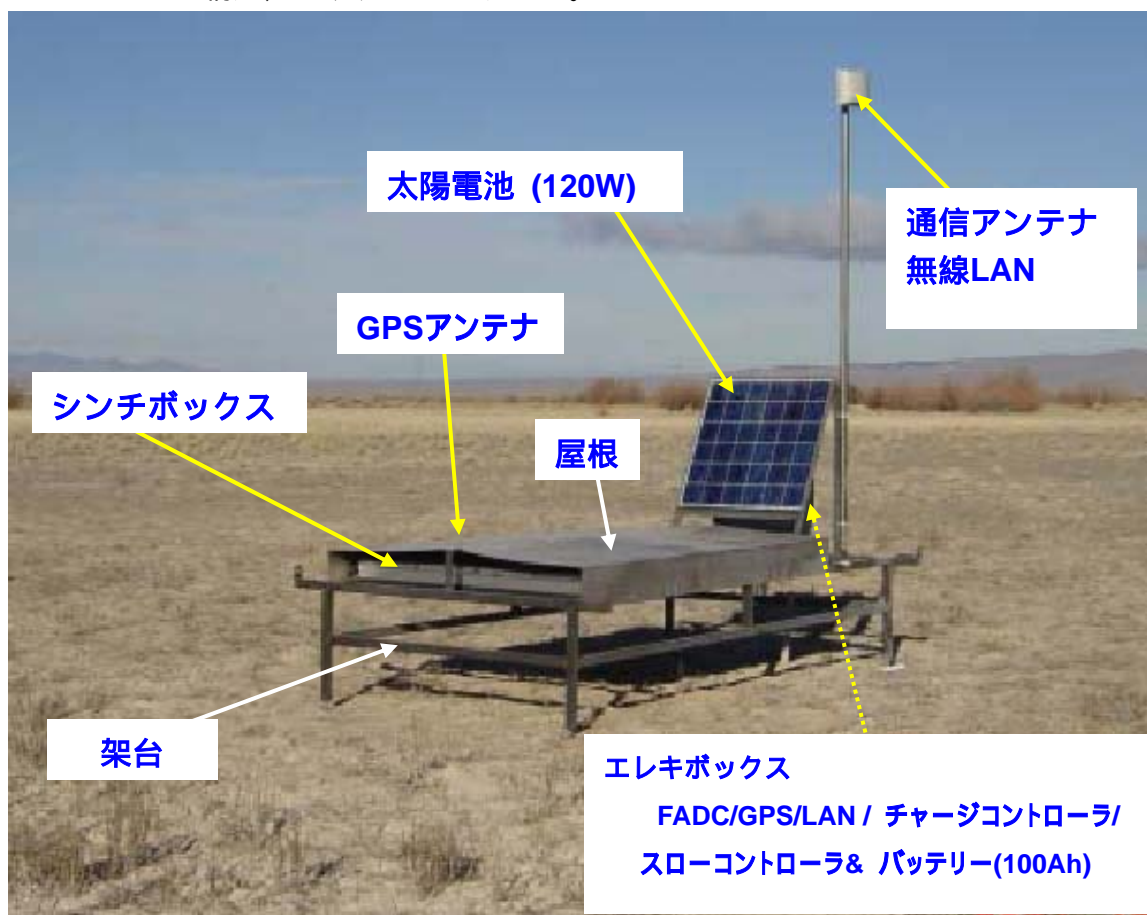


図 1-5

図 1-5 が実際に使用される S D 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ー、シンチレーターにより得られた光信号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 1-6,1-7)。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。

空気シャワーの大まかな観測の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 により伝搬されてきた光信号を、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(宇宙線データ)を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。

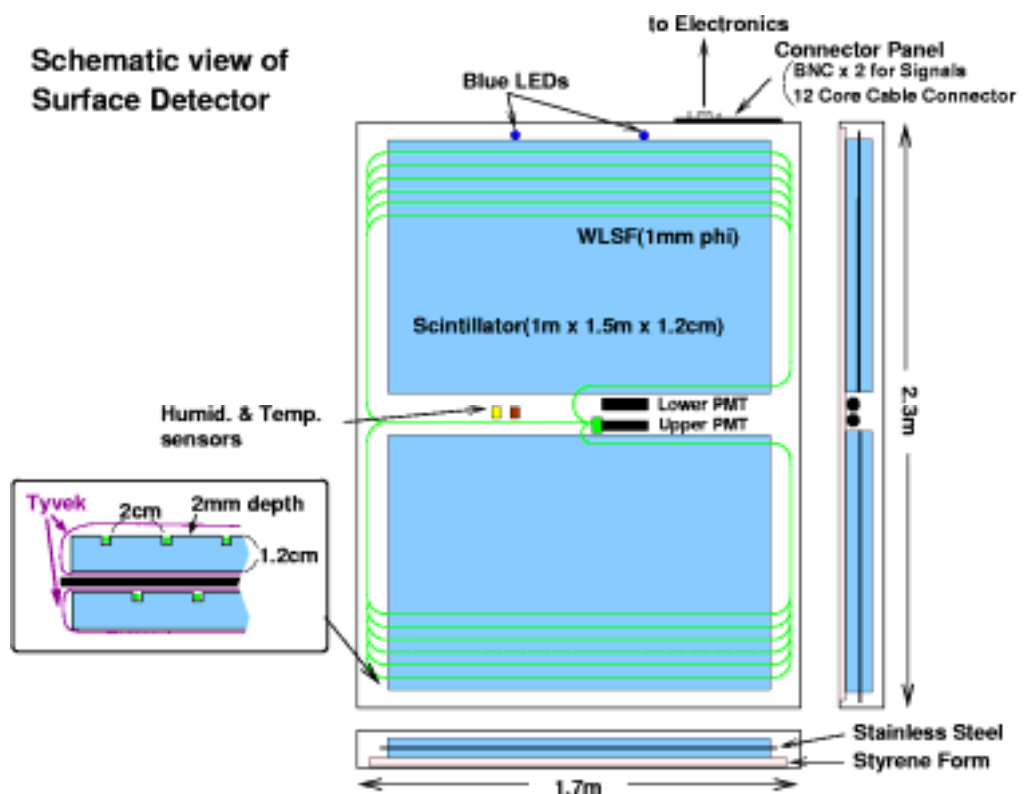


図 1-6



図 1-7

図 1-7 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。

では次に電力消費の内訳を説明する。

1-5 SD の電力消費

地表検出器における電力消費の内訳を表 1-1 に示す。

表 1-1

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)	宇宙線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ー	太陽電池-バッテリー間ケーブルの間に設置され、過充電や夜間の電流逆流、過放電を防ぐ	0.1W
合計		5.18W

よって多く見積もって **6W** の電力が必要になる。ただしこの 6W の電力供給は実験期間中の数年間継続されなければならない。なぜなら観測対象の宇宙線はいつ到来するか分らないからである。

本研究の目的は、自立型太陽光発電システムを用いて全検出器を 10 年近く連続稼動することである。連続稼動させるためには、太陽電池の出力、太陽電池の設置角度、バッテリー

一の容量、現地（アメリカ、ユタ州デルタ）の気象などさまざまな事を考慮しなければならない。

1-6 研究目的

独立型太陽光発電システムにおいて、太陽光発電、チャージコントローラ、バッテリーの試験を行い、解析することで電力供給の効率化を図り、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。

具体的には、現段階ではバッテリー保護のためハード制御によってバッテリー電圧 11.0[V]で電力供給が停止するようになっている。これを現地の気象データとバッテリーの温度効果を考慮することでバッテリー残留電力量を推定し、電力供給を停止するバッテリー電圧と電力供給を再開する復帰条件を検討する。

第2章 シミュレーション概要

TA 計画では太陽光発電システムで地表検出器を稼働させ、長期にわたって連続観測をすることが望まれる。頻度が非常に少ない超高エネルギー宇宙線による空気シャワーを観測するためには、できるだけ地表検出器を止めたくないためである。

日中は太陽光発電の電力は地表検出器を稼働させ、余剰電力はバッテリーに充電される。日没後には地表検出器はバッテリーに蓄えられた電力で稼働する。使用するバッテリーは DYNASTY 社製 DCS100L(密閉式ディープサイクル)を使用することが決まっており、このバッテリーで実際に検出器がどのくらいの期間稼働し続けるか検討する必要がある。

また、バッテリーの容量は電解液温度によって大きく変化し、温度が下がると容量は小さくなる特性がある。TA 計画の実験予定地(米国ユタ州デルタ)は気温の季節変化の大きい土地であり、冬期は著しい気温低下がみられ、そのため温度によるバッテリーへの影響が顕著に表れることが予想される。

これまでの実験によって温度と蓄えられる容量の特性の結果を図 2-1 に示す。

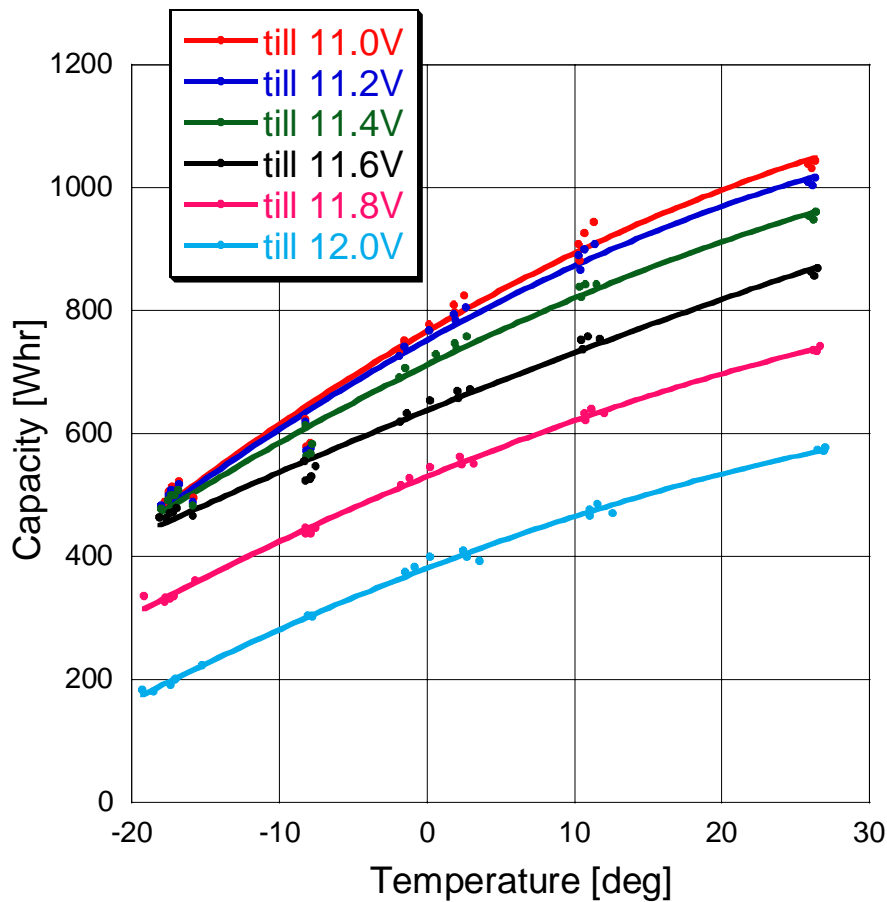


図 2-1 温度によるバッテリー容量の変化

図 2-1 は横軸がバッテリー温度で縦軸は満充電からそれぞれのバッテリー電圧までの取り出し可能な電力量である。

実験では、ある一定の温度に維持された環境下で満充電状態のバッテリーを放電させ、そのとき取り出せた電力量を測定した。例として 0[deg]のデータを参考に説明していく。まず、満充電状態のバッテリーを 0[deg]に維持し、消費によって放電させていく。12.0[V]まで放電させたら、それまでの電力量を算出しプロットする。次に 11.8[V]まで放電させ、それまでの電力量を算出しプロットする。これを 0.2[V]ずつ 11.0[V]まで放電させプロットしたのが図 2-1 中の点である。

これらの実験点から 2 次の多項式で近似した関係式が式(2-1)である。

$$\begin{aligned} \text{till } 11.0[\text{V}] \quad Q &= -0.12T^2 + 13.92T + 767.76 \\ \text{till } 11.2[\text{V}] \quad Q &= -0.12T^2 + 13.27T + 753.46 \\ \text{till } 11.4[\text{V}] \quad Q &= -0.09T^2 + 11.75T + 712.65 \\ \text{till } 11.6[\text{V}] \quad Q &= -0.03T^2 + 9.71T + 638.92 \\ \text{till } 11.8[\text{V}] \quad Q &= -0.07T^2 + 9.82T + 531.43 \\ \text{till } 12.0[\text{V}] \quad Q &= -0.08T^2 + 9.20T + 382.14 \end{aligned} \quad \text{-----} (2-1)$$

Q : 取り出し可能な電力量 [Whr]

T : バッテリーの温度 []

ここで求めたバッテリー満充電容量は満充電からそれぞれのバッテリー電圧値まで取り出せる容量のことである。

この実験結果を用い、現地の気象データからバッテリー残留電力量を推測することにより、観測に欠損があるかどうかを推定することが本研究の目的である。

次に、実際にデルタで検出器に搭載するエレキボックスについて述べる。

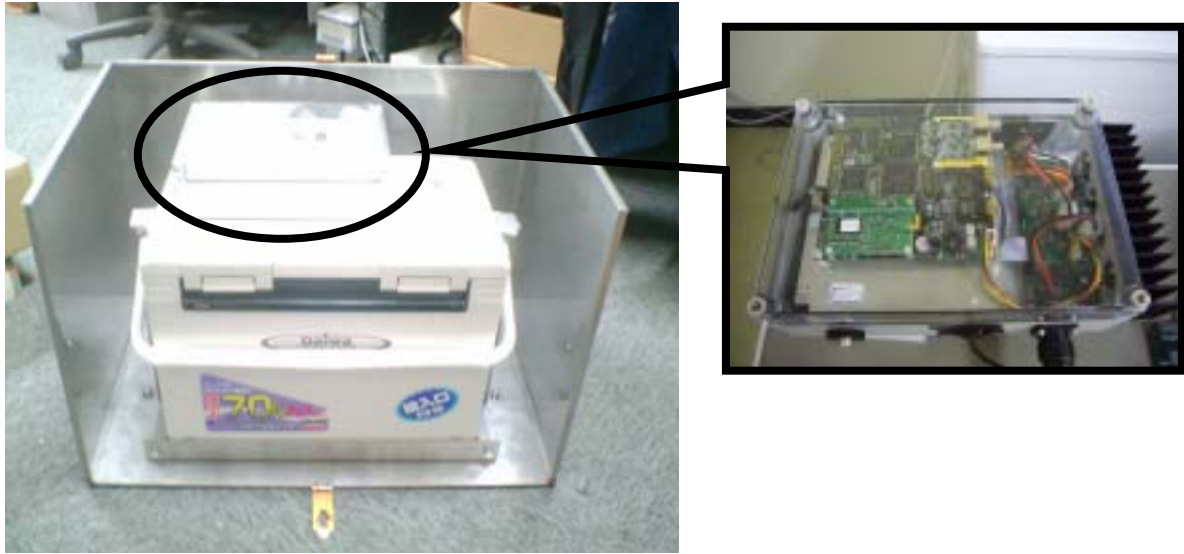


図 2-2 エレキボックス

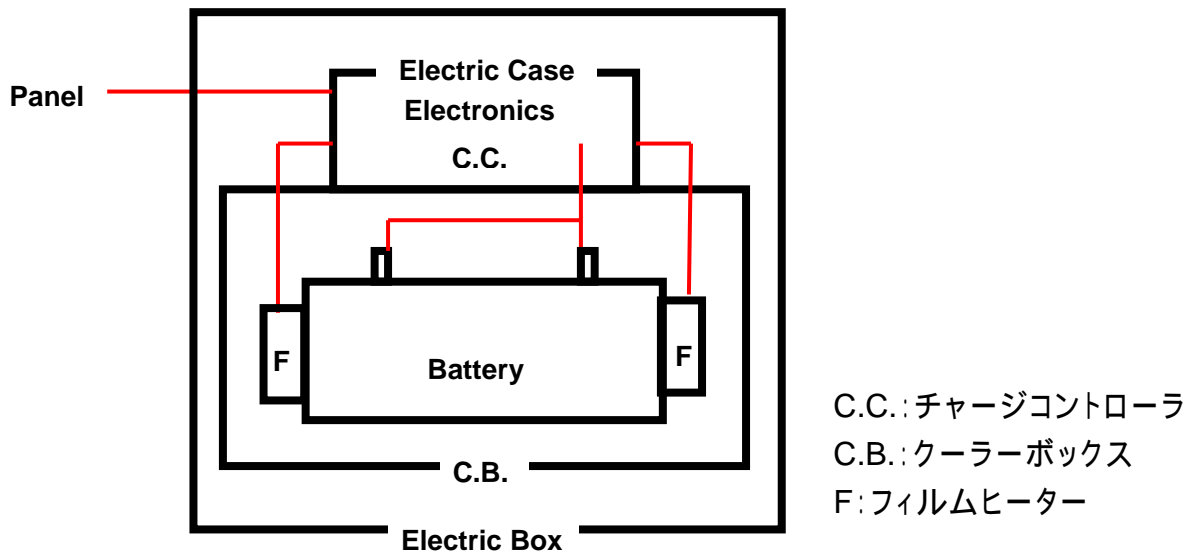


図 2-3 エレキボックス概要図

エレキボックス内は図 2-2,図 2-3 で示されているように、エレキケース、クーラーボックスで構成されている。エレキケースの中に電気回路及びチャージコントローラ、クーラーボックスの中にバッテリーとバッテリー保温用のフィルムケースが入っている。

パネルから送られてきた電力はエレキケース中にあるチャージコントローラへ送られる。チャージコントローラはバッテリーへの過充電を防ぐ役割を担っている。チャージコントロ

ーラを経た電力はエレクトロニクス及びクーラーボックス内のバッテリーに充電される。クーラーボックスはバッテリーの保温目的に用いられている。また、バッテリーの側面には 20[] のフィルムヒーターが 2 枚貼り付けられておりこれもバッテリー保温が目的である。

なお、検出器に設置される太陽電池パネルは KYOCERA 社製 K C -120 J を使用し、南向き仰角 60[deg]に設置する。

次に、実際にバッテリー残留電力量をシミュレートする際に必要になるパラメータについて説明する。

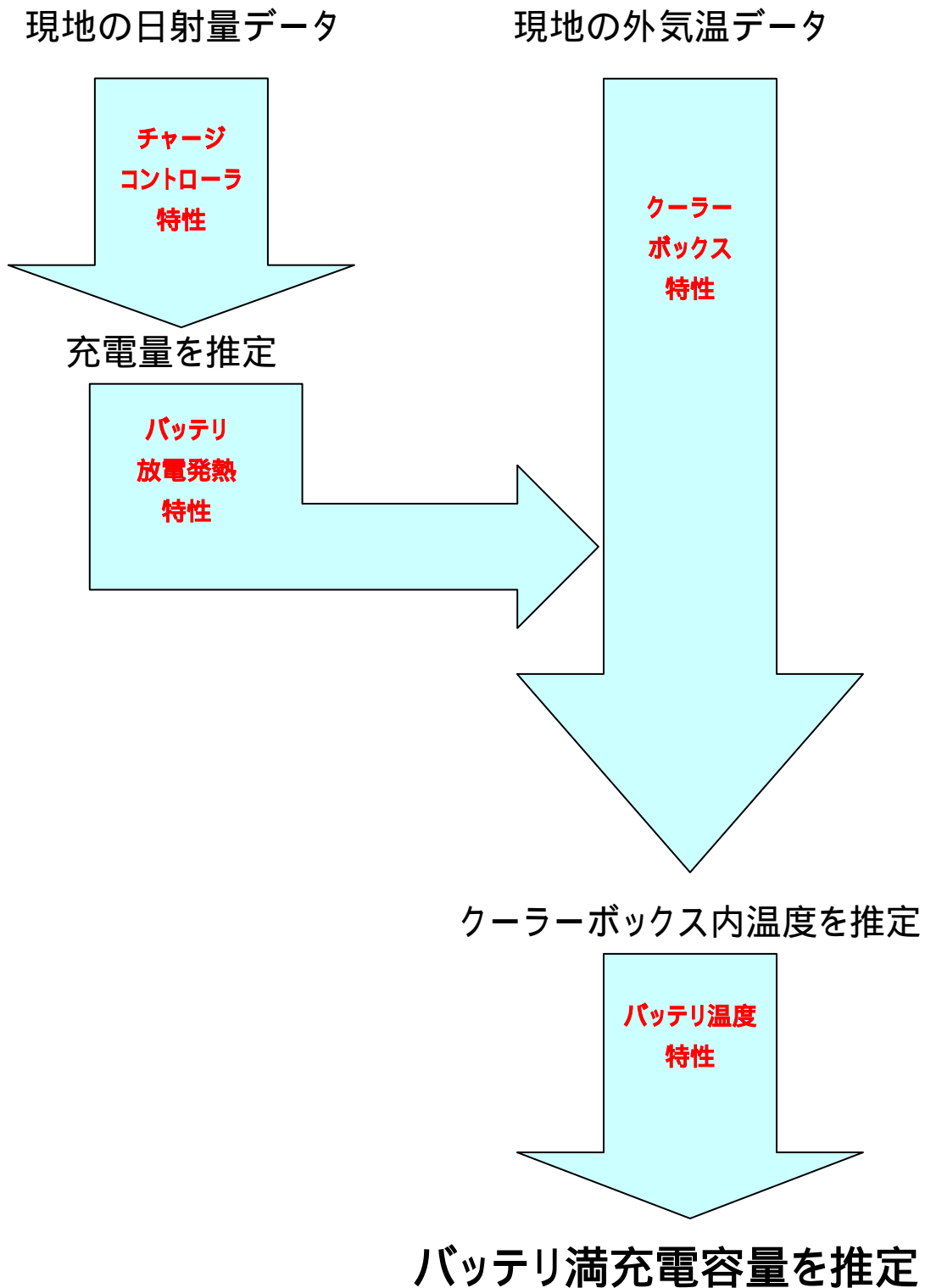


図 2-4 シミュレーションの流れの概要図

図 2-4 でシミュレーションの流れを説明していく。

まず、現地デルタの気象観測施設 CEMP(Community Environmental Monitoring Program)より配信されている日射強度データを用い太陽電池パネルで発電される電力からバッテリーに蓄えられる電力を算出する。ここで実際にバッテリーに充電される電力はチャージコントローラを経たものであるためチャージコントローラの特性を検証し、消費電力を考慮して充電量を推定する。夜間はバッテリーに蓄えられた電力を消費して検出器を稼働させるためバッテリー放電発熱特性を検証する必要がある。

また、現地デルタの気象観測施設 CEMP より配信されている気温データからクーラーボックス内の温度を推定する。これにはクーラーボックスの特性を理解する必要がある。

バッテリー放電発熱特性とクーラーボックスの特性からバッテリー温度を推定し、図 2-1 のバッテリー温度特性から満充電時のバッテリー容量を算出し、チャージコントローラを経た電力と検出器を稼働させるための消費電力を考慮し、バッテリー残留電力量をシミュレートする。

以降、これらのパラメータについて検証していく。

第3章 パラメータ算出実験

3-1 日射強度と太陽光パネル

ここでは日射強度と太陽光パネルの出力について述べる。

以前から先輩や私の卒論で日射強度と太陽光パネルの出力については検証し、およそカタログ値通りに出力されることは確認済みであるが、便宜上ここでも紹介する。

3-1-1 日射強度

日射強度とは、太陽から一平方メートル当たりどのくらいのエネルギーが入射したかというものであり、単位は $[W/m^2]$ である。

日射強度を測定する際に、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 1 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、日射強度である。図 3-2 は本体につけられている日射計である。

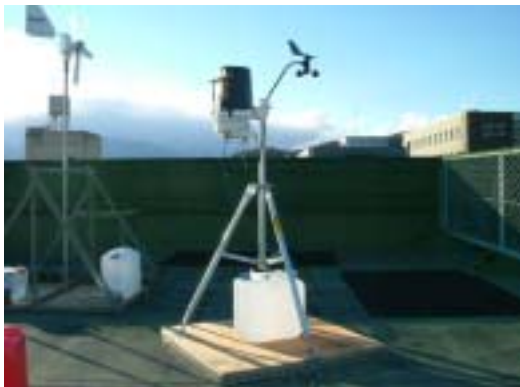


図 3-1 気象観測装置



図 3-2 日射計

観測によって得られた気象データ(気象観測の間隔は1分)は、無線でコンソールへ送られ、1日に2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。

なお、日射計には水準器が備わっており、観測面は水平である(図3)。

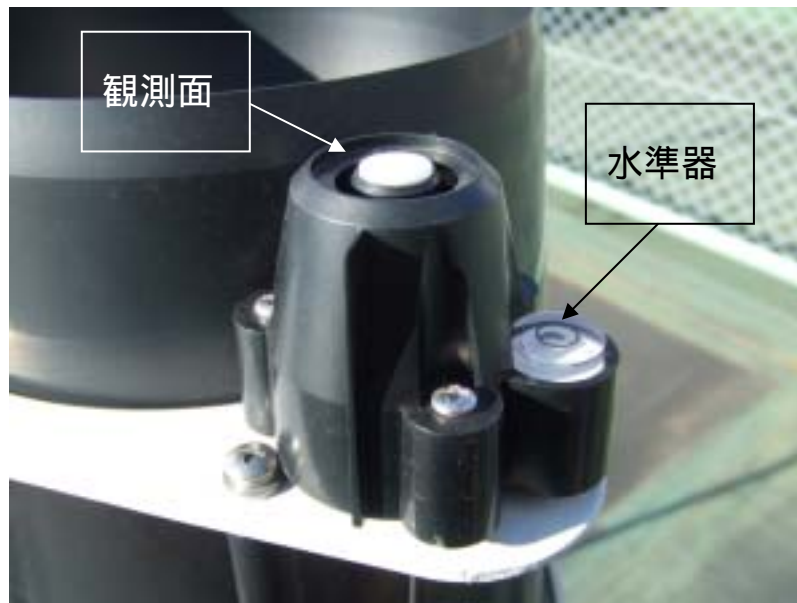
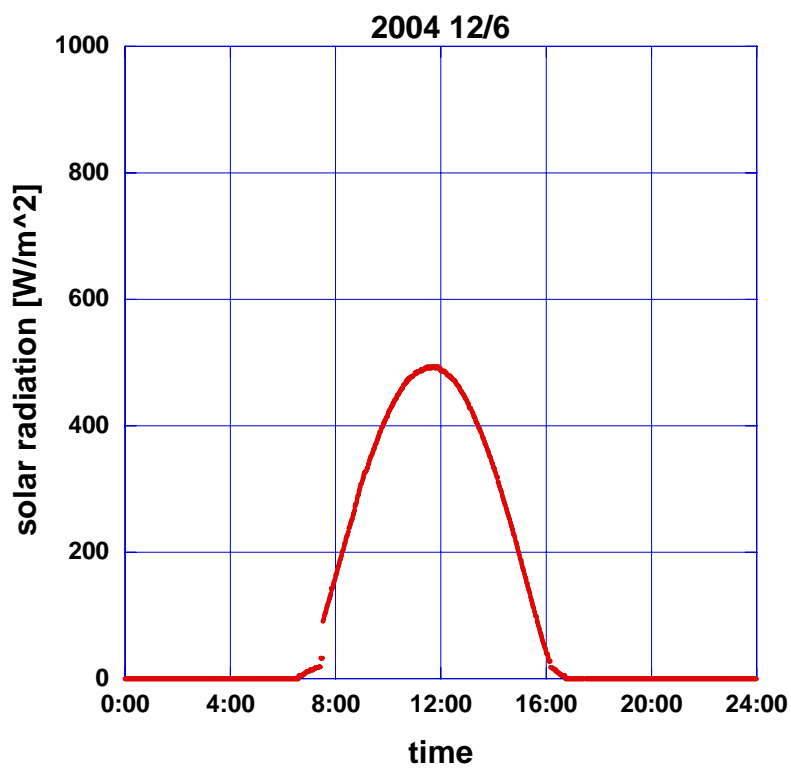
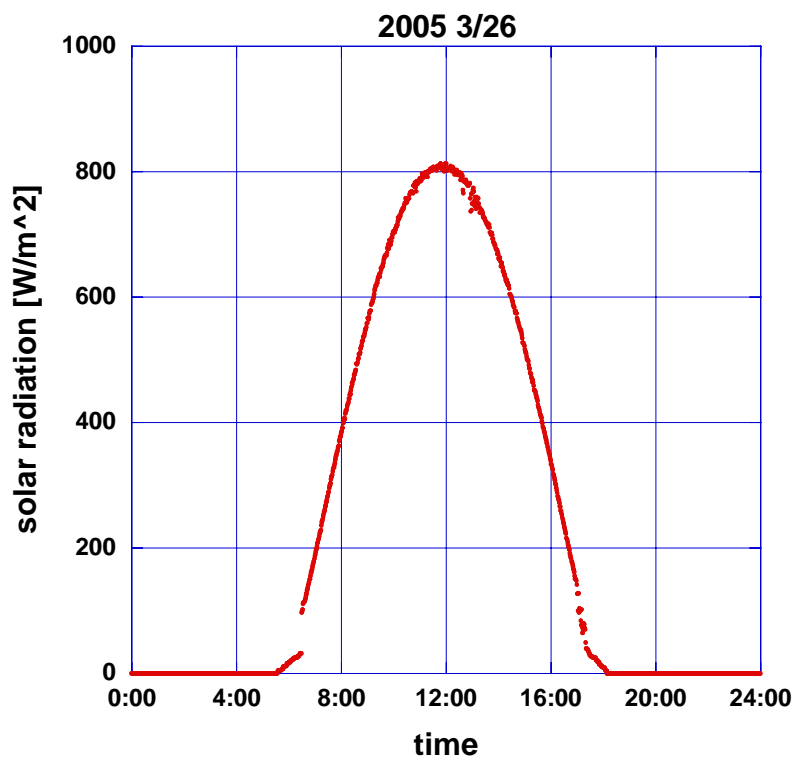


図 3-3 日射計の詳細

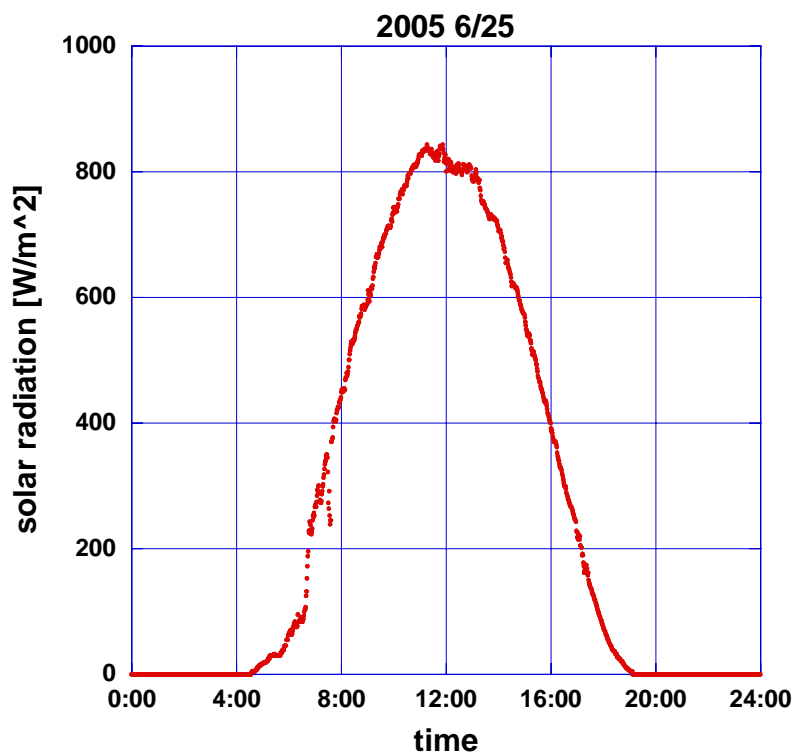
日射計の観測面は水平であるので、太陽高度が高いほど観測面に当たる太陽光線の量は多くなる。また日射計上空の雲や空気の透明度などにより、日射強度は大きく変動する。図 3-4 ~ 3-7 はそれぞれ違う日付の、一日の日射強度の変化を表したものである。またこれら四日は快晴の日を選んだ。



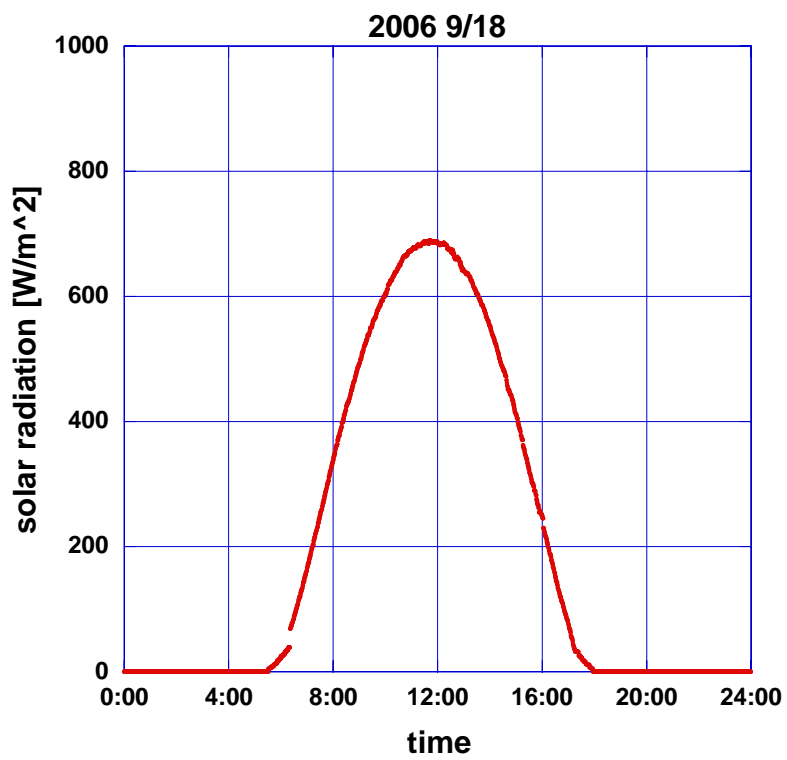
☒ 3-4



☒ 3-5



☒ 3-6



☒ 3-7

これらの図すべてが日の出とともに日射強度が上昇して行き、正午前にピークを迎えた後減少に向かい、日没後はゼロになっている。正午前にピークを迎えるのは、観測地点の甲府が日本標準時の明石（東経 135[deg]）より東に位置するためである。

また 12/6 は冬至に近い日、3/26 は春分に近い日、6/25 は夏至に近い日、9/18 は秋分に近い日であり、それぞれのグラフが四季別の日射強度を示している。太陽高度は冬至で一番低くなり、夏至で最も高く、春分秋分では同高度である。これら 4 つの図を比較してみると、12/6 では日射強度の最高値はおよそ 500[W/m²]、3/26 ではおよそ 800[W/m²]、6/25 ではおよそ 830[W/m²]、9/18 ではおよそ 700[W/m²]というように太陽高度と日射強度が比例の関係にあることがわかる。これは日射計の観測面が水平であるため、太陽高度が高いほど、より多くの太陽光を受光するからである。

この季節変化は日の出から日の入りまでの日射時間の変化にも当てはまる。これら 4 つの図を比べると 12/6 では日の出から日の入りまでの時間が最も短く、6/25 で最長、3/26 9/18 ではほぼ同じ長さである。

参考までに曇り日、一日の日射強度変化を表すグラフを図 3-8,3-9 に示す。

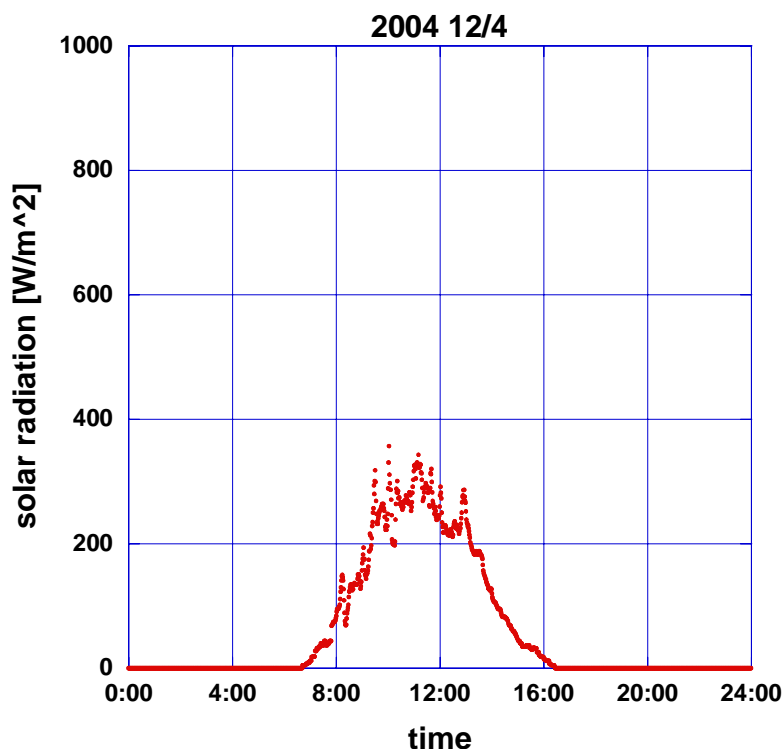
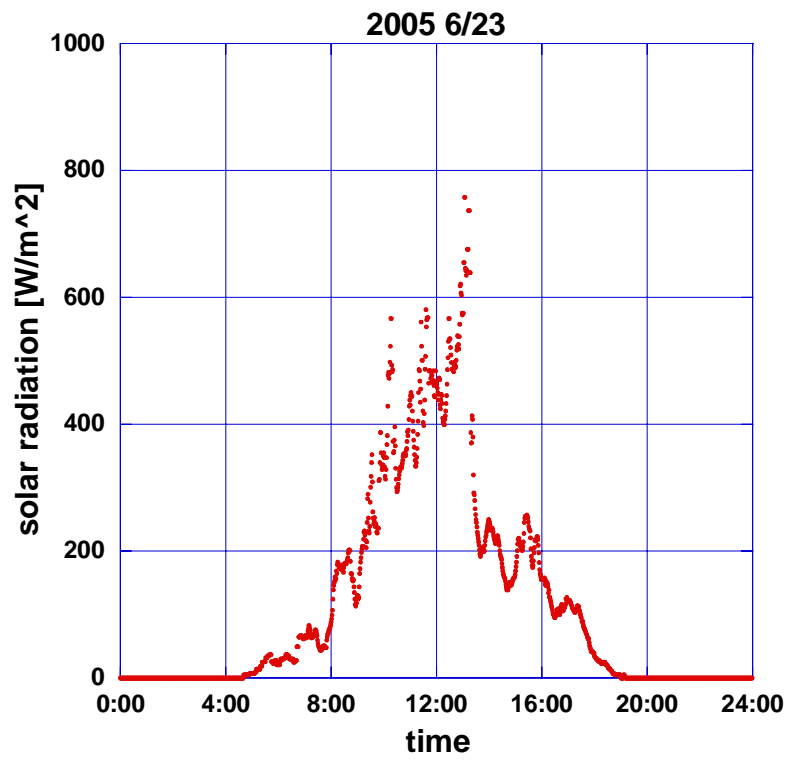


図 3-8



☒ 3-9

3-1-2 太陽光パネル

実際のデルタで使用される太陽光パネルは KYOCERA 社製 KC120J である。今回実験で使用したパネルも同様の KYOCERA 社製 KC120J である(図 10)。なお、今回の実験では真南に向け、仰角 60[deg]に傾けてある。



図 3-10 太陽光パネル(KYOCERA 社製 KC120J)

KYOCERA 社製 KC120J のスペックを以下に記載する(表 3-1)。

表 3-1

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

開放電圧 (Voc) 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 (Isc) 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 (Pmax)、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。

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[]、分光分布：AM1.5、放射照度 1000[W/m²]

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、1[m²]あたりに到達した太陽光エネルギーの強さを表し、単位は[W/m²]を用いる。大気圏外ではおおよそ 1400[W/m²]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 1000[W/m²]程度になり、この 1000[W/m²]という値を、放射照度の基準状態としている。

この KYOCERA 社製 KC120J の太陽パネルの発電出力を検証していく。
以下に、太陽光パネル出力実験のシステムの概要図(図 3-11)について述べる。

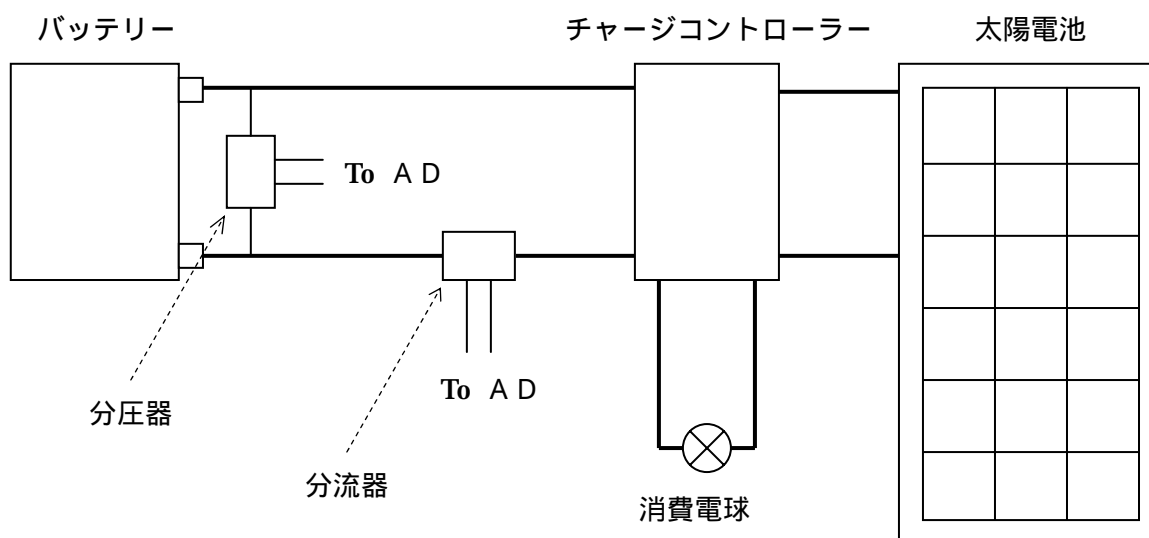


図 3-11 太陽光パネル出力実験のシステムの概要図

太陽電池で発生した電流は充電コントローラーを通して消費電力に使われ、余った電流はバッテリーの充電に使われる。充電コントローラーは、バッテリーが満充電になった場合バッテリーを保護するため、発電電流をカットする機能を持っている。また夜間など発電が行なわれてない時には、バッテリーからの電流を太陽電池への逆流を防ぐという役割がある。

充電コントローラーはモーニングスター社製サンセーバーSS-10L-12Vを使用した。使用した充電コントローラーの仕様を表 2 に示す。

バッテリー端子間には分圧器が接続されていて、バッテリー電圧 = 太陽電池の出力電圧を計測する。その電圧データは AD 変換ボードによって読み込まれ、PC で自動計測される。またバッテリーのマイナス端子と充電コントローラーの間には分流器が接続されており発電電流（プラスの時）、消費電流（マイナスの時）を計測する。発電電流、消費電流は電圧データとして出力されて AD 変換ボードによって読み込まれ、PC で自動計測される。実際の SD の消費電力を想定し、5[W]の電球を充電コントローラーのロード端子に取り付け、常時点灯させている。

バッテリーは密閉型ディープサイクルバッテリーの日本電池社製 S E B -100 を使用した。バッテリーの仕様を表 3 に示す。

表 3-2

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 3-3

■要項表

形 名	電圧 (V)	容量 (Ah)		最大外形寸法 (m/m)				液入重量 (kg)	とって	端 子	
		5時間率	1時間率	長 さ	幅	箱 高	総 高			種 類	向 き
SS-SEB35	12	35	23	238	128	202	227	14.0	おび	テーパー端子	④
SEB35	12	35	23	237	130	192	219	15.0	おび	L端子	③
SEB50	12	50	33	260	173	202	224	19.0	ふたと一体		②
SEB50	12	50	42	330	170	200	237	22.0	おび	L端子	①
SEB100	12	100	65	412	176	212	244	32.0	ふたと一体		②
SEB130	12	130	85	505	182	224	258	44.0	ふたと一体	L端子	①
SEB150	12	150	98	505	182	224	258	49.0	ふたと一体		①

■L型端子解説

電池形式	SEB35/50	SEB50/100	SEB130/150
ボルトナット	M5×1.0	M5×1.25	
L型端子用カバー（別売り）	GB2-1	GB2	GB3

先に述べた気象観測装置で測定した日射強度を用い、太陽電池パネルの出力を検討するわけだが、日射計は水平に設置してあり、太陽電池パネルは仰角 60° に傾けてある。このまま日射強度データを使うことはできないので、気象観測装置で測定した日射強度データに日射面積比を掛け、60[deg]に変換する必要がある。

そのためにまず、太陽位置を求める。これは過去の研究で明らかになっており、観測地の緯度、日時、時間を入力することで太陽の位置(高度、方位角)を求められる。この求められた太陽の位置と太陽光パネルの受光面の向きにより、日射面積を求める。

日射面積とは、太陽との垂直面積のことであり、射影を意味する。

この日射面積を、受光面が仰角 60[deg]の場合と、0[deg]の場合とを計算で求める。本実験の日射計の受光部分は平面であるので、観測された日射強度は日射面積に比例する。よって以下のような比が成り立つ。

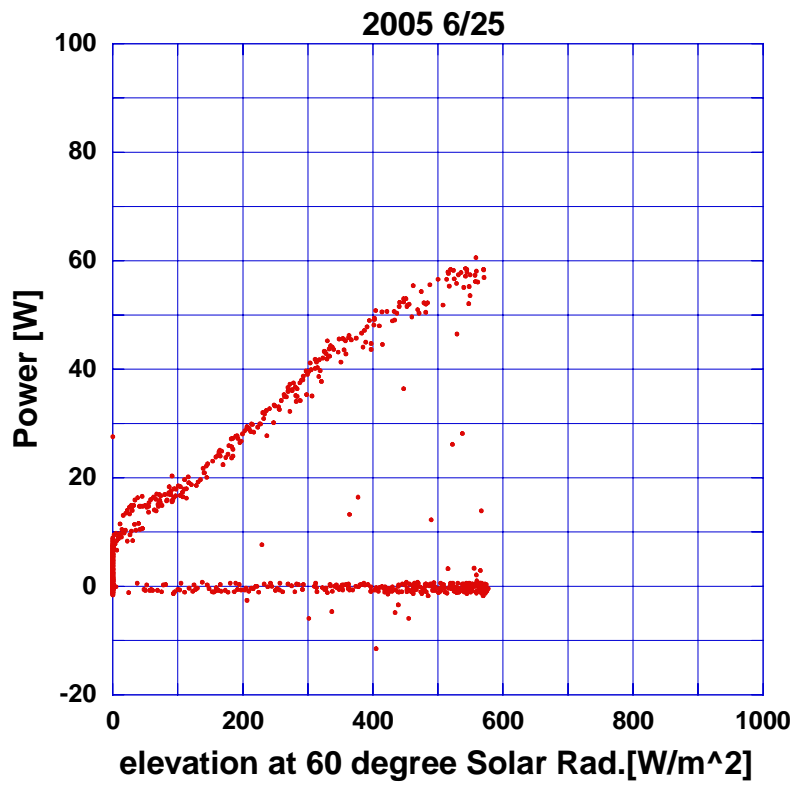
60[deg]の日射面積 : 0[deg]の日射面積 = 60[deg]の時の日射強度 : 0[deg]の時の日射強度

60°の時の日射強度、0°の時の日射強度とは日射計の受光面が水平面との成す角度の状態を言う。0°の時の日射強度は観測によって求められる。求めたい値は60°の時の日射強度であるので式は以下ようになる。

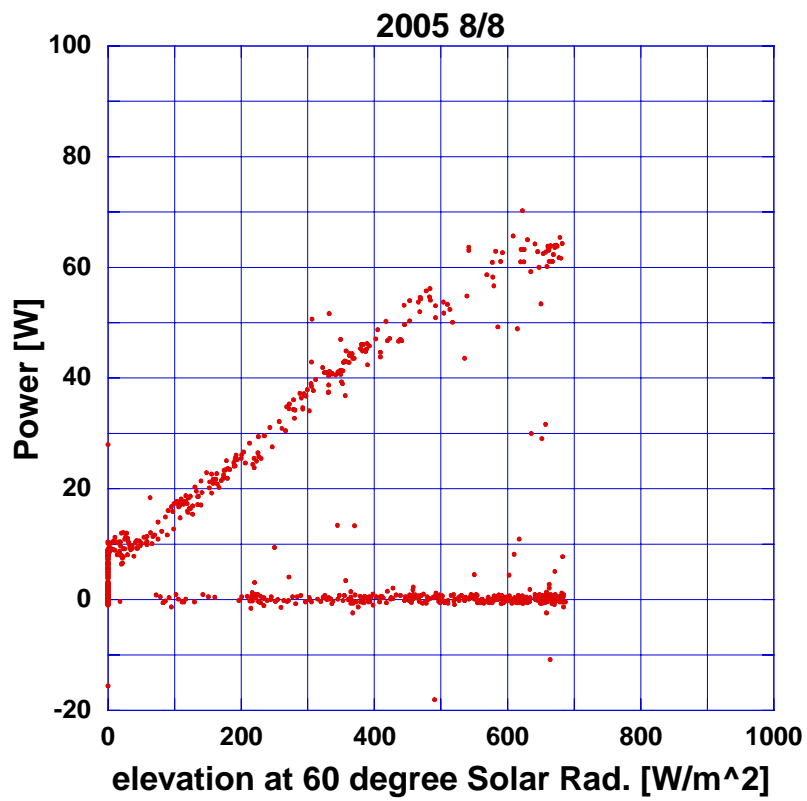
60[deg]の時の日射強度 = (60[deg]の日射面積 ÷ 0[deg]の日射面積) × 0[deg]の時の日射強度

(60[deg]の日射面積 ÷ 0[deg]の日射面積)を変換ファクターと呼び、これが日射面積比である。よってこの計算を行えば、仰角 60[deg]に設置してある太陽電池に当たっている光の日射強度が算出できることになる。

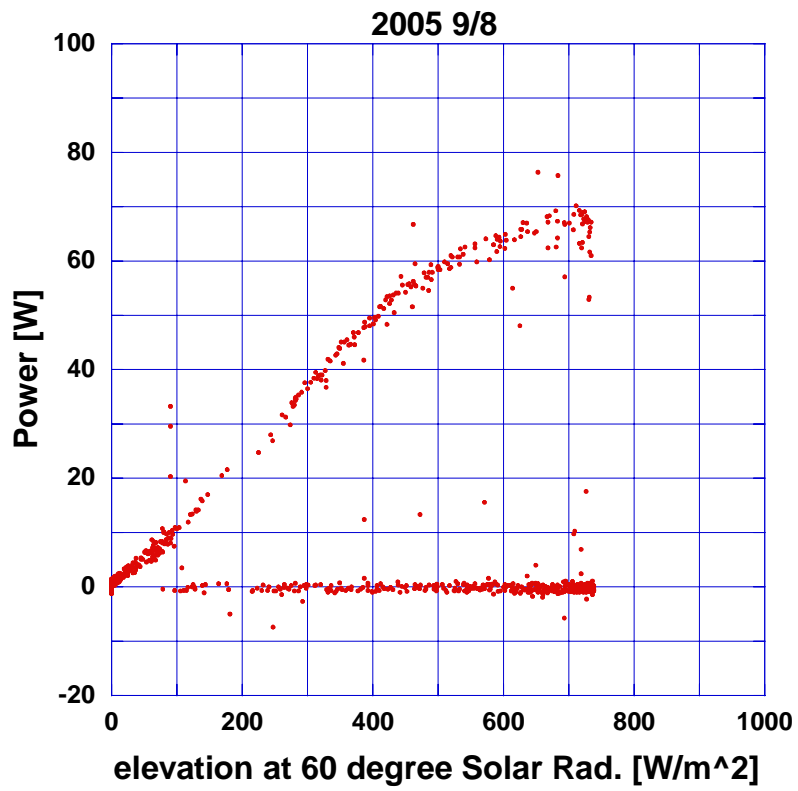
この方法で 60[deg]に換算した日射強度を用い、日射強度と発電電力の相関をとったものを検証する。6月、8月、9月、10月の晴天日を選び一日の日射強度と発電電力との相関をとったものを図 3-12 ~ 3-15 に示す。



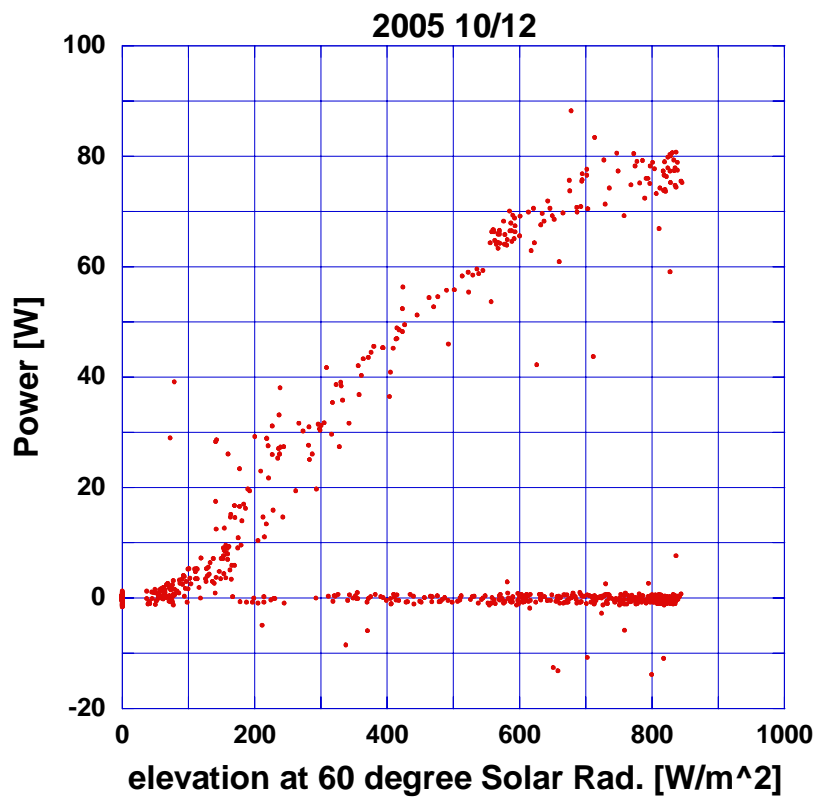
☒ 3-12



☒ 3-13



☒ 3-14



☒ 3-15

電流値（発電電流、消費電流）は一つの電流計で計測されており、また電力消費（5W - 12V電球）は常に行なわれているので、発電電流値は消費電流値分だけ低く計測されている。太陽電池パネルの出力を解析する場合には、電力消費がない状態での発電電流が必要になるので、計測された発電電流値に消費電流値分を足して底上げした電流値を使用している。

また、十分な日射強度があるにもかかわらず、発電電力がゼロ付近の数値を示しているのは、バッテリーが満充電になってしまったため、チャージコントローラーが充電制御を行なったことによるものである。

次に示す図 3-16～3-19 はチャージコントローラーによって充電制御を行った部分(発電電力が 5W以下の点)をカットし、また、満充電になる前の直達日射が当たっている部分だけをピックアップした同一日のグラフである。

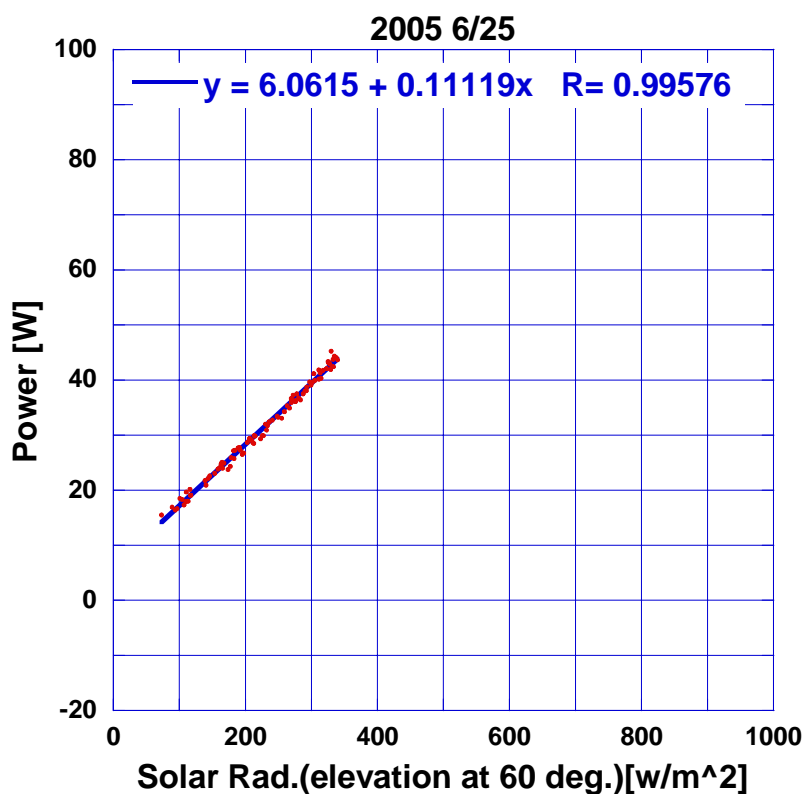
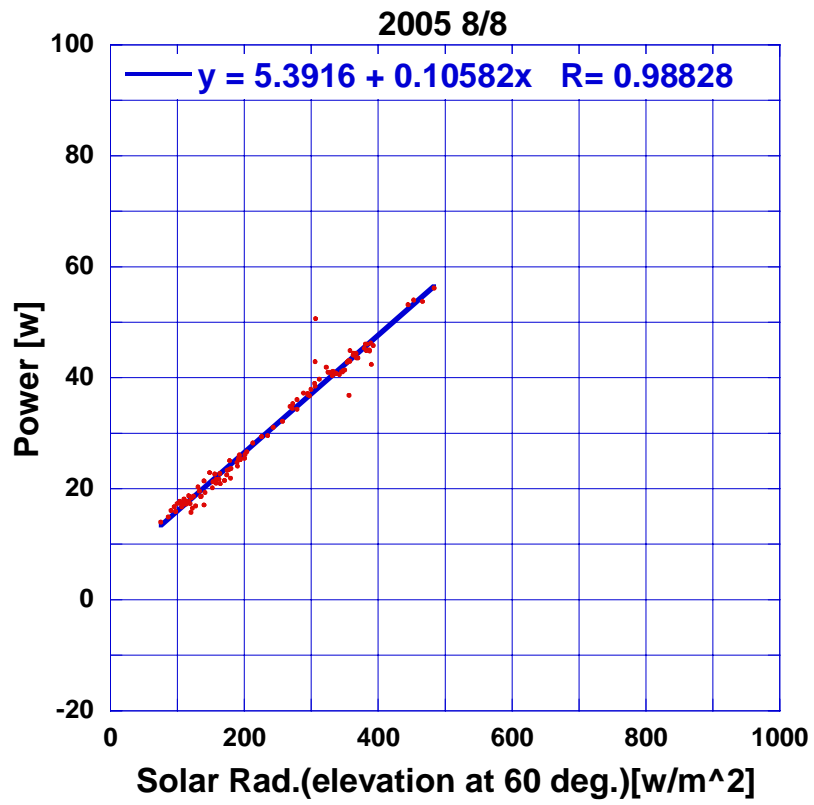
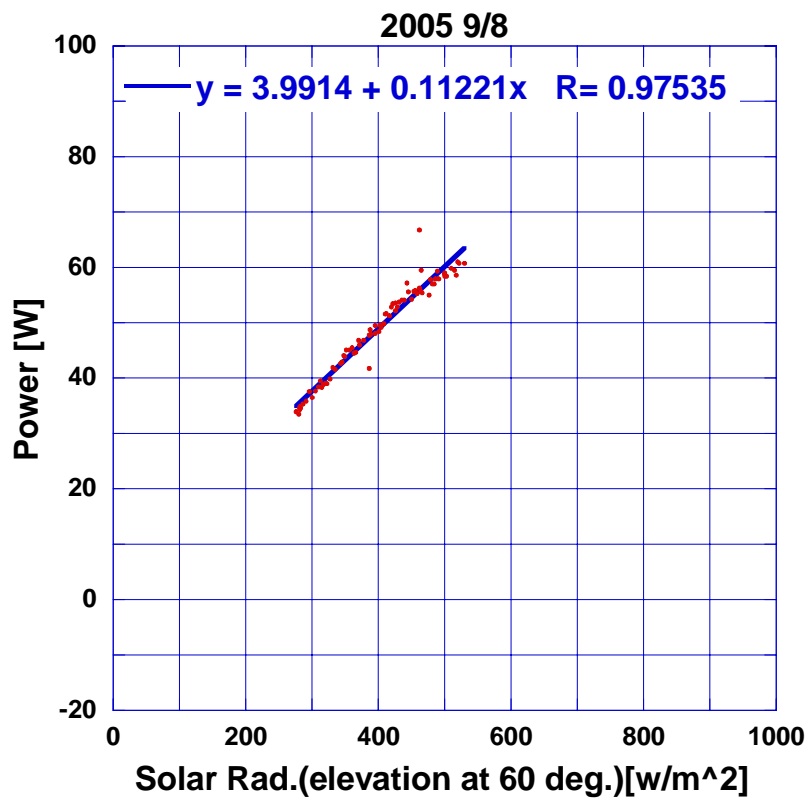


図 3-16



☒ 3-17



☒ 3-18

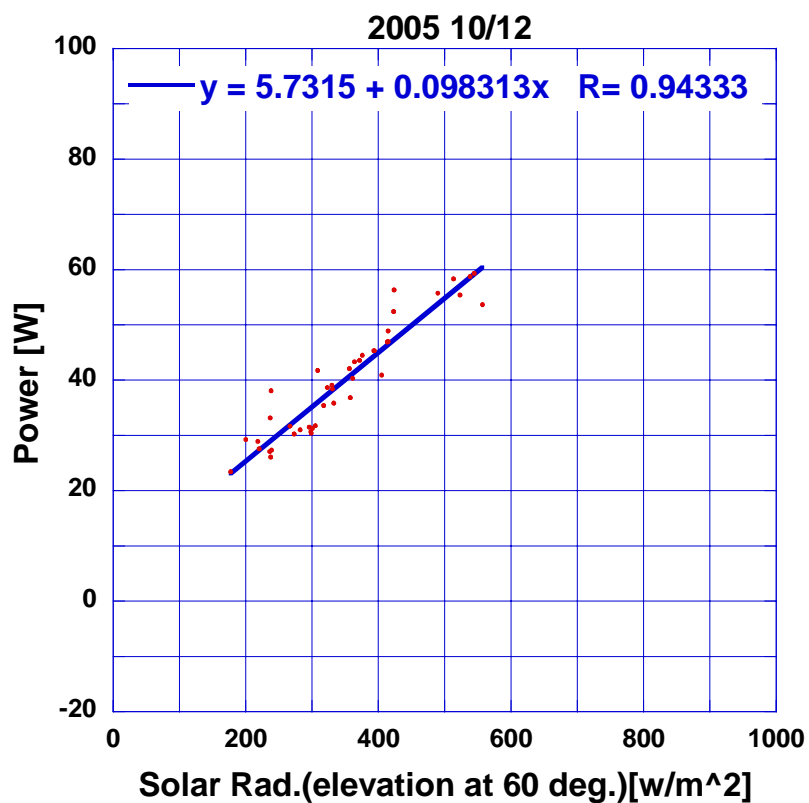


図 3-19

図 16～19 の回帰直線式において日射強度 1000[W/m²]での発電電力を推定すると、仕様
の値である 120[W]に近づく。

これをまとめたものを表 3-4 に示す。

表 3-4

	回帰直線式	1000(W/m ²)での推定値
2005 6/25	$Y = 0.11X + 6.06$	117.2
2005 8/8	$Y = 0.11X + 5.39$	111.2
2005 9/8	$Y = 0.11X + 3.99$	116.2
2005 10/12	$Y = 0.098X + 5.73$	101.0

実験によって得られた最大出力値は仕様の値 120[W]よりも若干低く出ているものの、
±5%の誤差が含まれることを考慮すれば、ほぼ仕様の値が計測されたと言える。

3-2 チャージコントローラ特性

チャージコントローラは、バッテリーが満充電状態になると充電を中断する特性があることは前章で述べた。これは太陽電池パネルによって発電された電力はすべて充電されるわけではないことを意味している。すなわちバッテリーに蓄えられる電力はチャージコントローラを経た電力に依存するわけである。

この章では実際にデルタで使用するチャージコントローラを使用して、太陽電池パネルによって発電された電力がチャージコントローラを経た後、どのような値をとるか検証する。

前章の太陽電池パネルの出力を検証する実験では、モーニングスター社製サンセーバーSS-10L-12Vを使用したが、実際にデルタで使用するチャージコントローラは東京大学宇宙線研究所製作のものを使用する。今回の実験でもこのチャージコントローラを使用した。

以下に今回の実験装置概要(図 3-20)を示す。

3-2-1 実験装置概要

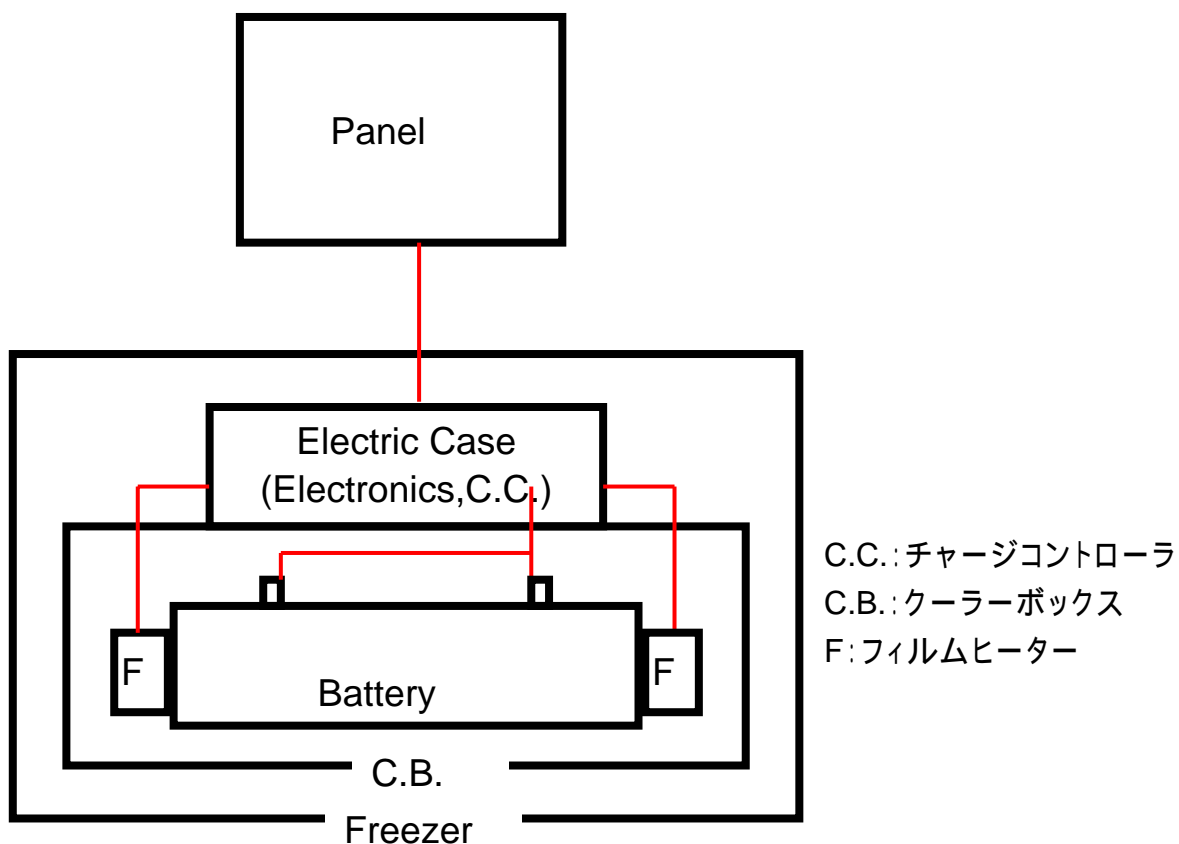


図 3-20 実験概要図

太陽電池パネル(Panel)

本実験で使用した太陽電池パネルは前章と同じ KYOCERA 社製 KC120J である。デルタで使用するものと同じものを、山梨大学の屋上の床に仰角 0[deg]に置いた。これは気象観測装置の日射計のデータをそのまま使用できるようにしたためである。

エレキケース(Electric Case)



図 3-21 エレキケース

このエレキケース(図 3-21)は実際デルタに設置する地表検出器に搭載されるもので、この中に測定用エレクトロニクスとチャージコントローラが入っている。(以降測定用エレクトロニクスを“エレキ”と表す)

エレキから充電電圧、充電電流、バッテリー電圧、バッテリー電流、エレキケース内温度等のデータが 1 秒毎に出力され、PC に送られる。PC には有線でデータが送られ、専用のソフトで出力データを取得している。

バッテリー(Battery)

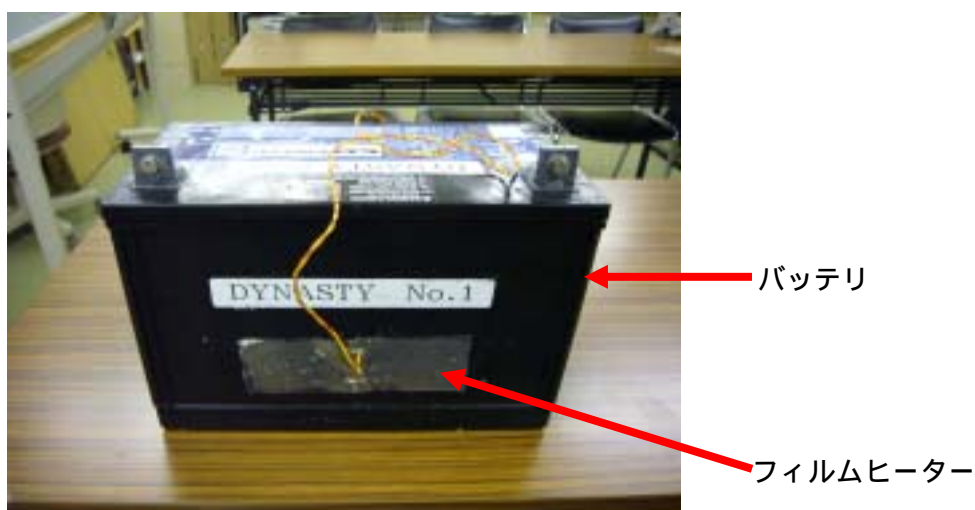


図 3-22 バッテリー及びフィルムヒーター

バッテリー(図 3-22)は DYNASTY 社製 DCS100L(密閉式ディープサイクル)を使用した。これはデルタで使用するバッテリーと同様である。

DYNASTY 社製 DCS100L の仕様を表 3-5 に示す。

表 3-5

型番	DCS100L (密閉式ディープサイクル)		
容量	5 時間容量率	81.0Ah	25
	20 時間容量率	100.0Ah	25
動作可能温度範囲	放電	-40	~ 71
	充電	-23	~ 60
推奨動作温度範囲		23	~ 27

密閉式とは電解液が密閉されているバッテリー方式のことである。密閉されているため電解液の蒸発がなく、液漏れの心配がない。

ディープサイクルとは放電と充電を交互に繰り返して使用される電源として、深い放電にも耐えられるバッテリー方式である。蓄電能力の低下が微小で、深い充放電を繰り返し行えるという特徴を持っている。

5時間率容量とは容量の数値の5分の1の電流を放電し(25[])、10.5[V]まで放電できる時間と電流の積のことであり20時間容量率とは容量の数値の20分の1の電流を放電し(25[])、10.5[V]まで放電できる時間と電流の積のことである。

フィルムヒーター(F)

バッテリーの特性として低温下であるほど蓄えられる電力量が低下し、効率が悪くなることがわかっている。このため実際のデルタの検出器に搭載されるバッテリーには20[]のフィルムヒーターが2枚、並列にバッテリーの側面に貼り付けられている(図3-22)。なお、フィルムヒーターのON/OFFはPC上で操作できる。今回の実験ではフィルムヒーターはONになっている。

クーラーボックス(C.B.)



図 3-23 クーラーボックス

クーラーボックス()はバッテリー温度の変化を緩和するために使用します。今回使用したのは Daiwa 社製 COOL LINE シリーズ GXU-1600 である。これはデルタで使用するクーラーボックスと同様である。Daiwa 社製 COOL LINE シリーズ GXU-1600 の仕様を以下に示す(表 3-6)。

表 3-6

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

冷凍庫(Freezer)

デルタの気温変化は激しく、およそ-20[]から+40[]まで変化する。先にも述べたがバッテリーに蓄えられる電力量はそのときのバッテリー温度に大きく依存する。そのため冷凍庫で模擬的に最低気温付近の状態を実験を行った。

今回使用した冷凍庫は GEAppliances 社製 FHJ3SF(WW)で、温度調整は手動で Level1 ~ 7(-15 ~ -25[])の切り替え可能である。

以下に、使用した冷蔵庫の仕様を示す(表 3-7)。

表 3-7

型式		FHJ3SF(WW)
カラー		ホワイト
有効内容積(L)		96
外形寸法 (mm)	幅	664
	奥行	504
	高さ	835
電気定格 50/60Hz	相・電圧(V)・周波数 (Hz)	単相 100V・50/60Hz
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(level1 ~ 7)
	温度範囲	-15 ~ -24
製品質量(重量)(kg)		32

消費電力

今回の実験で電力消費源となるのは、エレキとフィルムヒーターである。

エレキの消費電力は約 3.5[W]。フィルムヒーターは 20[]が 2 枚並列に接続されているため、10[]の抵抗と同等である。よって、12V-14.4W と認識できる。

3-2-2 日射強度 充電電力

天気が良く、チャージコントローラの特徴がよくわかる日を例に説明していく。

図 3-24,図 3-25 に 2006 年 10 月 18 日、19 日の日射強度に対する充電電力のデータを示す。なお、日射強度は気象観測装置により計測したデータ、充電電力はエレキから出力された充電電圧と充電電流を掛けたデータを使用した。

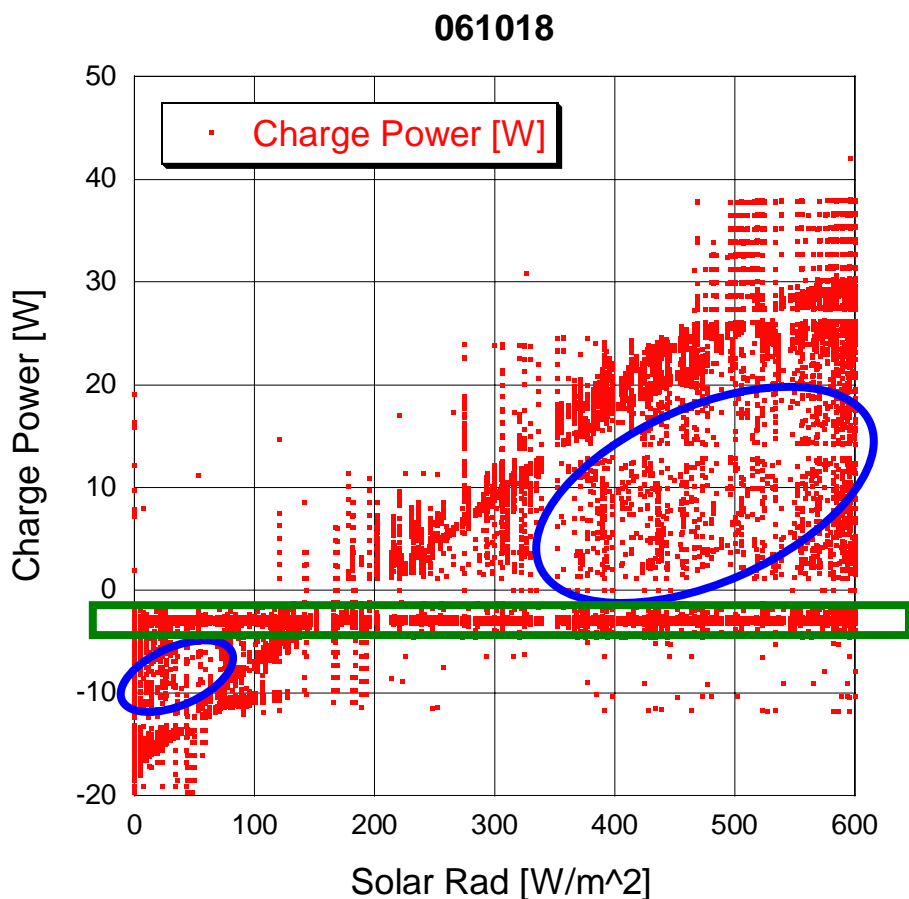


図 3-24

061019

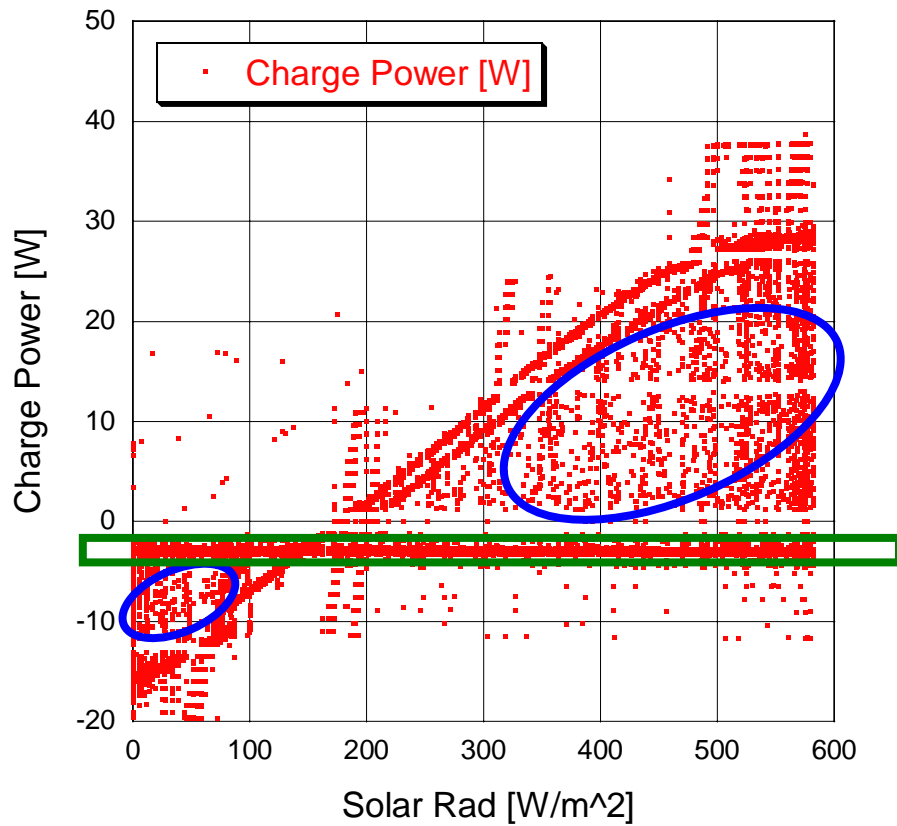


図 3-25

図 3-24,図 3-25 の青色の円で囲まれた部分はソフト制御がまだ不完全で充電電圧、充電電流を測定する際に同期がとれていなく、チャージコントローラが充電を制御している最中のデータを出力したためである。

また、緑色の四角で囲まれた部分はエレキの消費電力値である。チャージコントローラが満充電を認識し、充電をストップしたため、消費源であるエレキの消費電力値が出力されている。

3-2-3 消費電力

エレキから出力される電流値は充電電流と消費電流を同一計器で測定しているため、(充電電流 消費電流)を表している。

この実験では常にエレキケースとフィルムヒーターが ON になっている状態なので充電電流値は消費電流値分だけ低く計測されている。チャージコントローラの充電特性を知る上では消費電力がない状態での充電電力が必要になってくるので、計測された充電電力値に消費分の電力を足して底上げをする。

今回はエレキケースの消費電力 3.5[W]とフィルムヒーターの消費電力 14.4[W]の合計 17.9[W]を底上げした。

図 3-26,図 3-27 に消費電力の無い場合の 2006 年 10 月 18 日、19 日の日射量と充電電力の関係を示す。

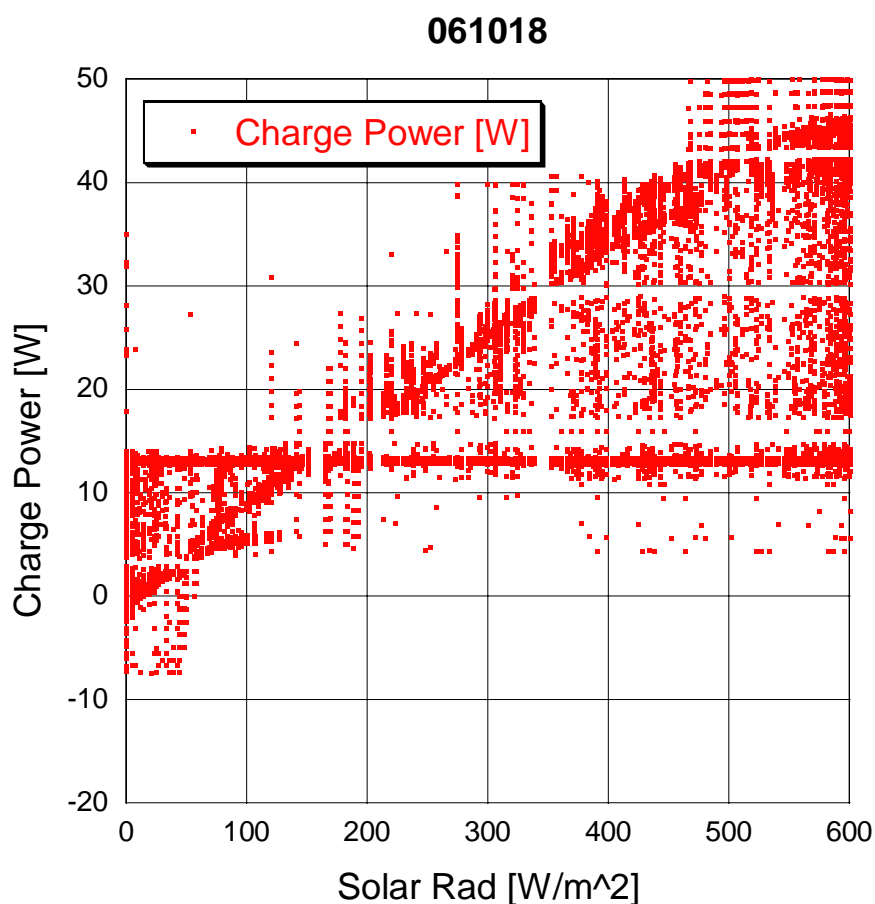


図 3-26

061019

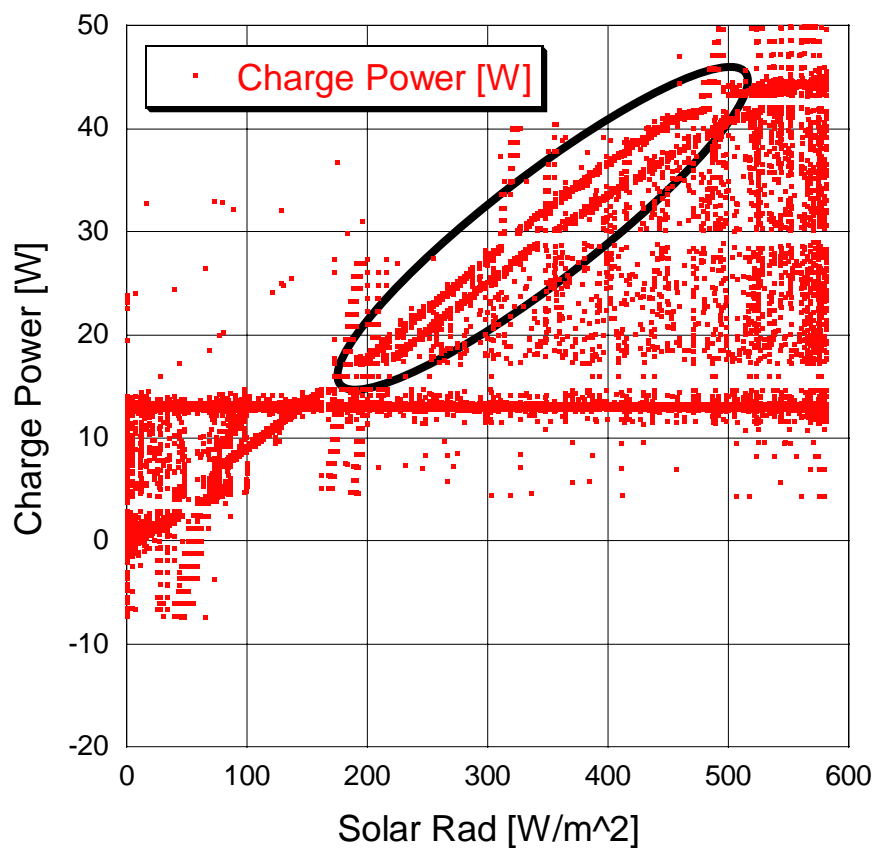


図 3-27

日射強度がゼロのとき、充電電力値がゼロになっており、消費電力分が除外されたことがわかる。

ここで図 3-27 の黒い円の中に注目すると 2 本になっているように見える。図 3-27 は 1 日を通したデータを用いグラフを描いている。

原因として、今回の実験は太陽電池パネルを屋上の床面に仰角 60[deg]に設置していたが、床面が水平ではなく東西に傾斜しておりパネルが水平でなかったことが原因であった。

次に、午前と午後による違いを確認するため色を分けてグラフにしてみる。

3-2-4 午前と午後での違い

図 3-28,図 3-29 に 2006 年 10 月 18 日、19 日のデータから午前(赤)と午後(青)を色分けしたものを示す。

なお、エレキの消費電力はここでは必要ないので削除した。

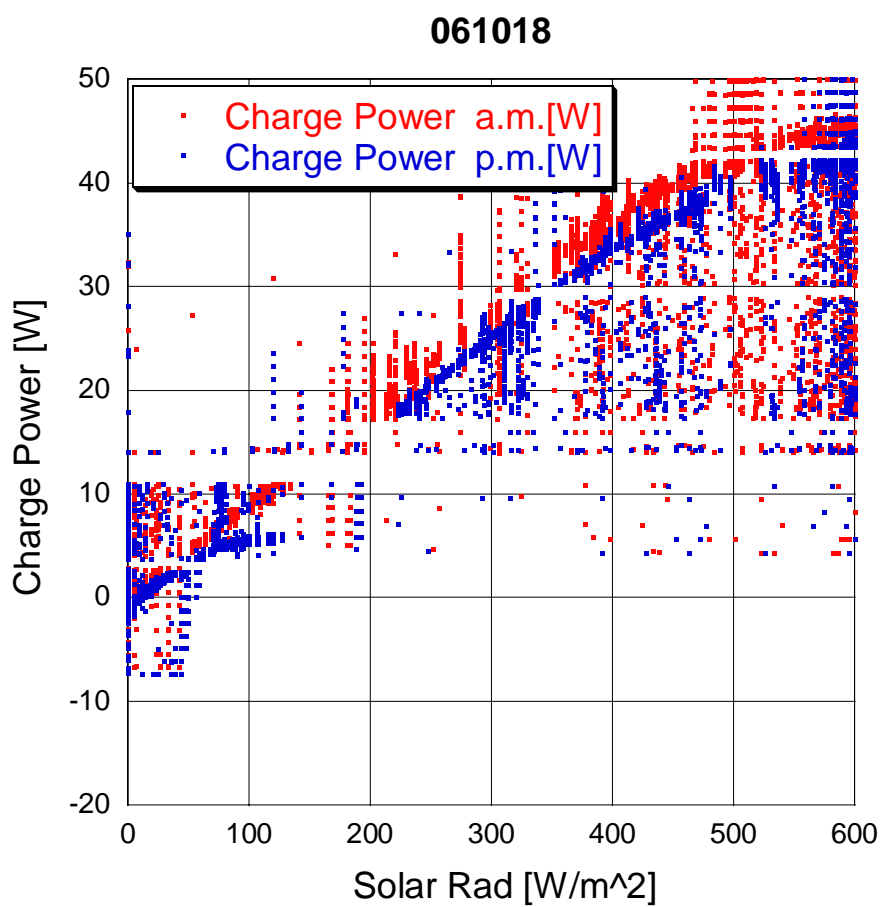


図 3-28

061019

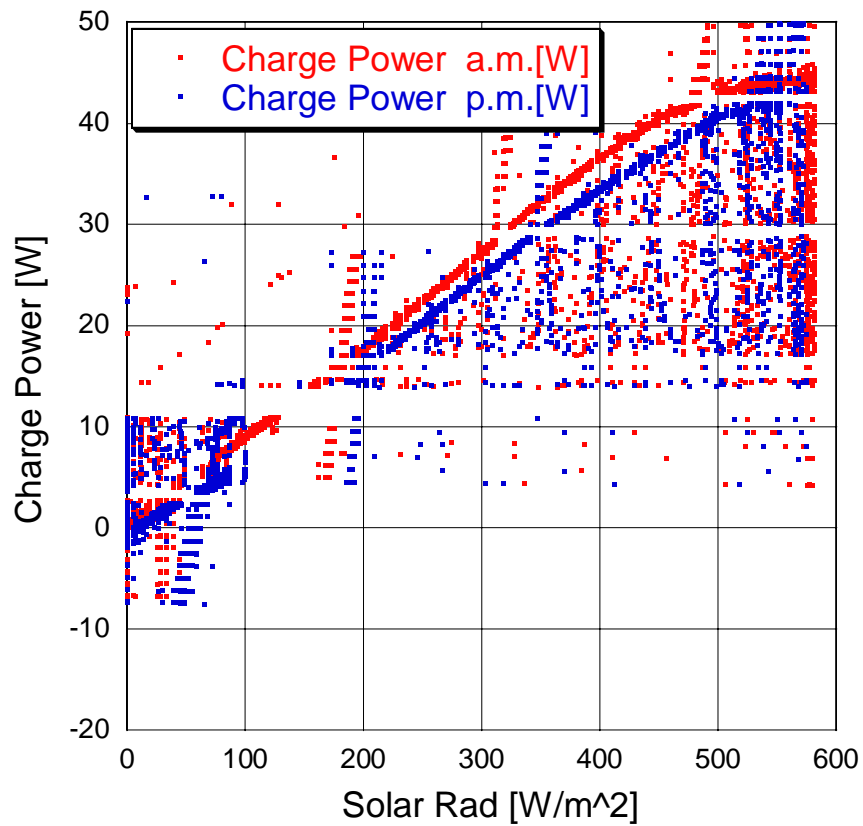


図 3-29

日射強度は気象観測装置により計測したデータ、充電電力はエレキから出力された充電電圧と充電電流を掛けたデータを使用している。図 3-28,図 3-29 から太陽電池パネルが東に若干傾いており日射計は水平を維持しているため、午前の方が午後に比べて充電される電力が大きく出ていると推測される。実際に計測した結果 0.4[deg]東に傾いていた。

3-2-5 充電電力

日射強度に対する充電電力を具体的に検証していく。

先にも述べたがチャージコントローラはバッテリーが満充電状態になると充電を中断する特性がある。これは太陽電池パネルによって発電された電力がすべて充電されるわけではないことを意味している。すなわちバッテリーに蓄えられる電力はチャージコントローラを経た電力に依存するわけである。

ここでは実際にチャージコントローラを経た後の電力値を検証することでチャージコントローラの特性を理解する。

図 3-28, 図 3-29 のデータを使用していくが、先にも述べたように太陽電池パネルが東に傾いていたため、今回はその 2 本のラインの中心に線を引いた。

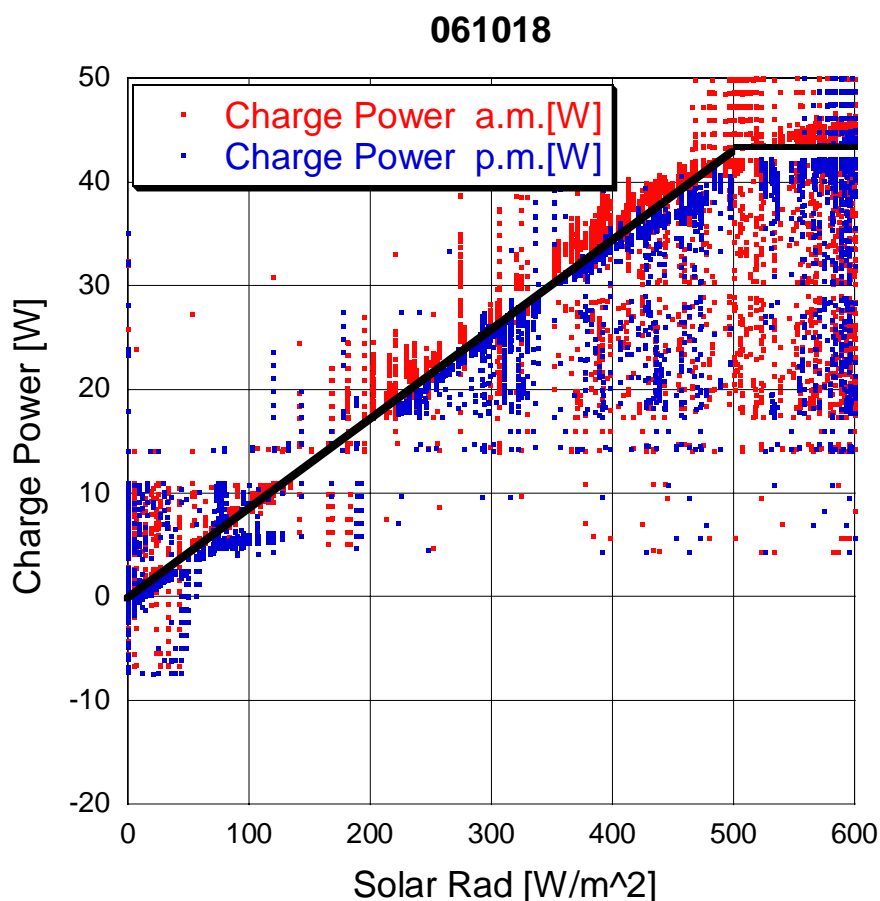


図 3-30

061019

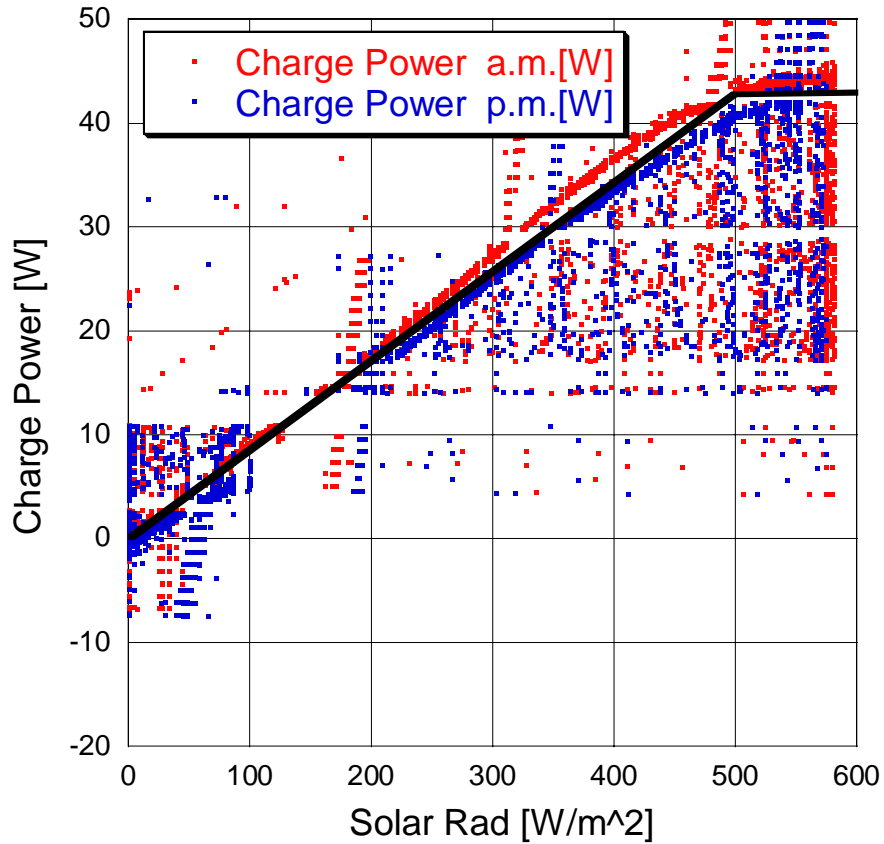


図 3-31

図 3-30, 図 3-31 から日射強度が $500[\text{W}/\text{m}^2]$ 以下の時は日射強度に対し充電電力はリニアに伸びていき、 $500[\text{W}/\text{m}^2]$ に達したあとはその充電電力値のまま横ばいになっていることがわかる。

$500[\text{W}/\text{m}^2]$ のときの充電電力はおよそ $42.5[\text{W}]$ の値をとっているため

$$R \leq 500[\text{W}/\text{m}^2] \text{ のとき} \quad P = \frac{42.5}{500} R \quad \text{-----} (3-1)$$

$$R > 500[\text{W}/\text{m}^2] \text{ のとき} \quad P = 42.5$$

R : 日射強度

P : 充電電力

と近似できる。

3-2-6 現地での充電電力の推定

ここでは実際に地表検出器が設置されるデルタの日射強度を使って、充電電力を推定していく。

まず、地表検出器に搭載される太陽電池パネルは南向き、仰角 60[deg]に設置されるため 3-1 で述べた日射強度の換算を行う必要がある。ここで使用するデルタの日射強度のデータは現地デルタの気象観測施設 CEMP のデータで、水平に設置された日射計で計測された値である。

図 3-32 に 2004 年 1 月 1 日～3 日のデルタでの日射強度を青線で示す。

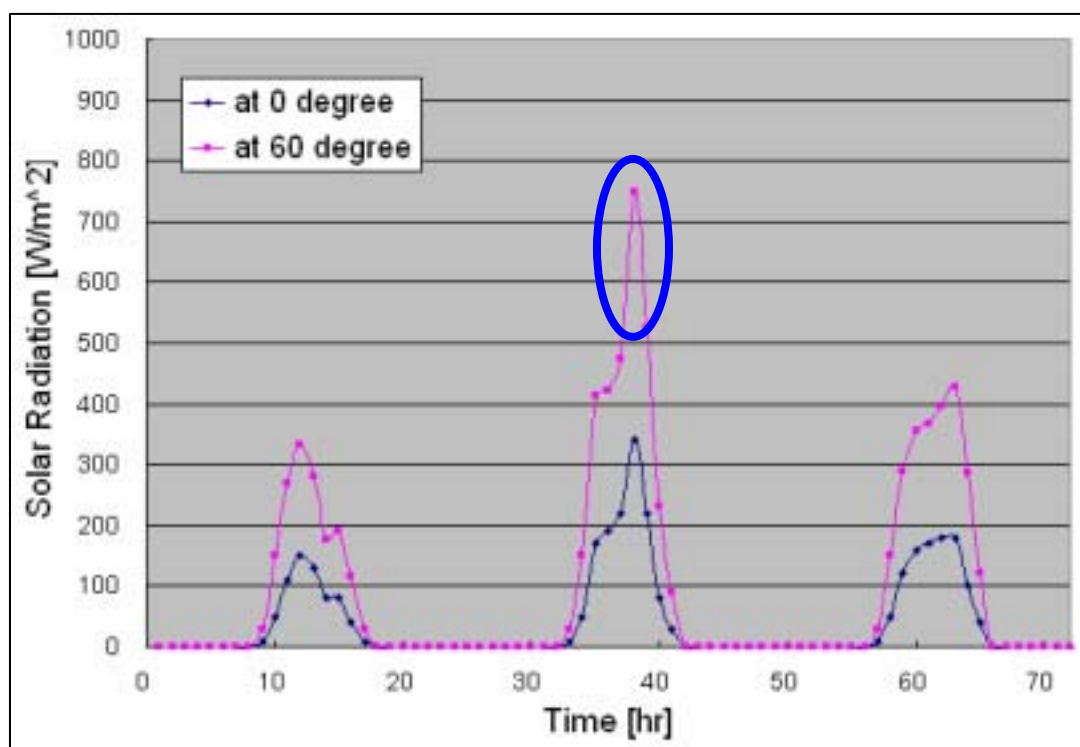


図 3-32

図中の赤線は仰角 0[deg]の日射強度を仰角 60[deg]に換算したものである。

ここでは、赤線の仰角 60[deg]に換算された日射強度から式(3-1)を使用して充電電力を推定していく。

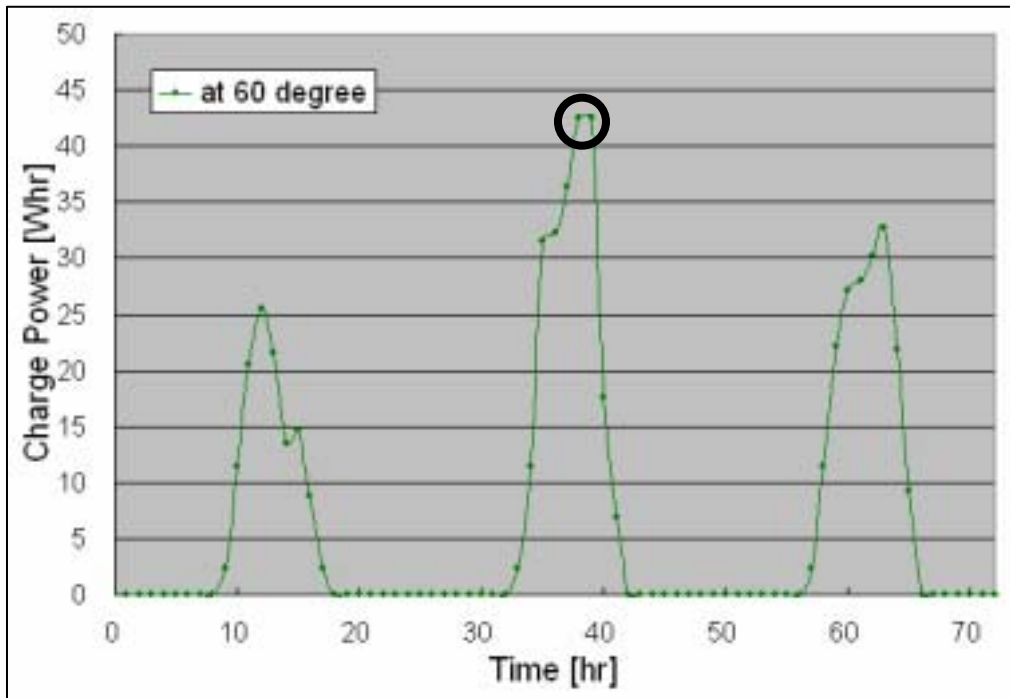
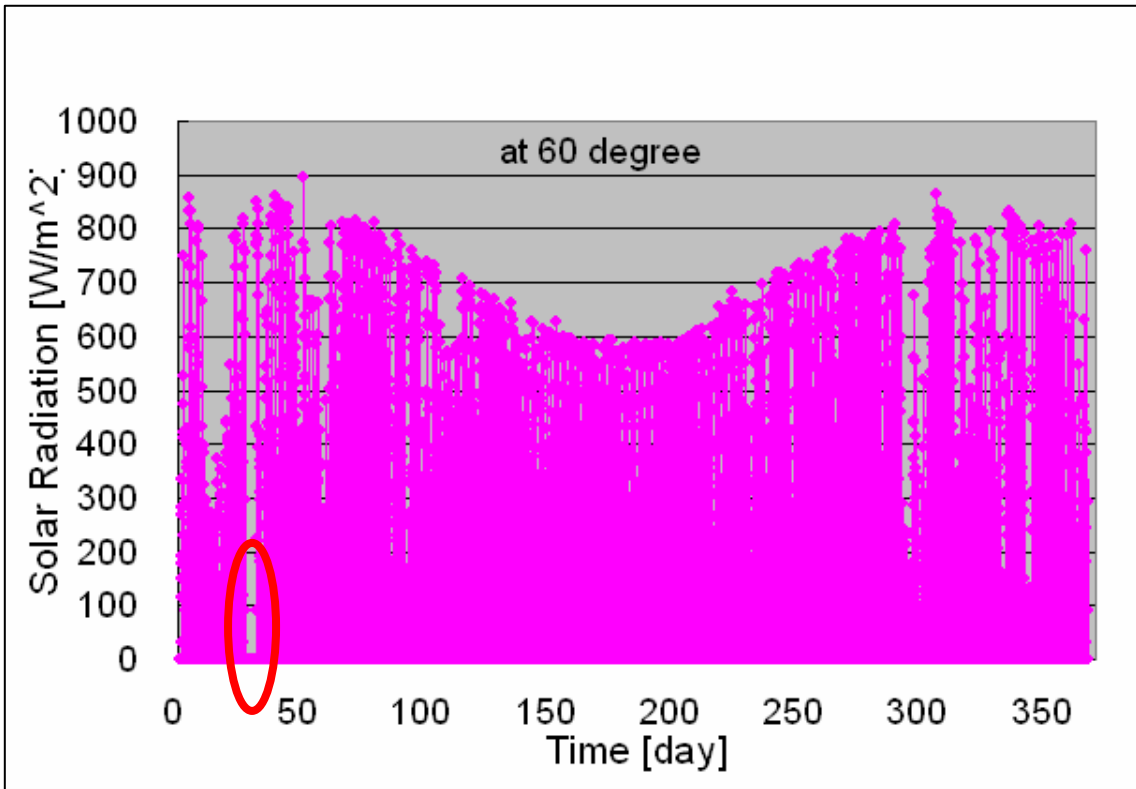


図 3-33

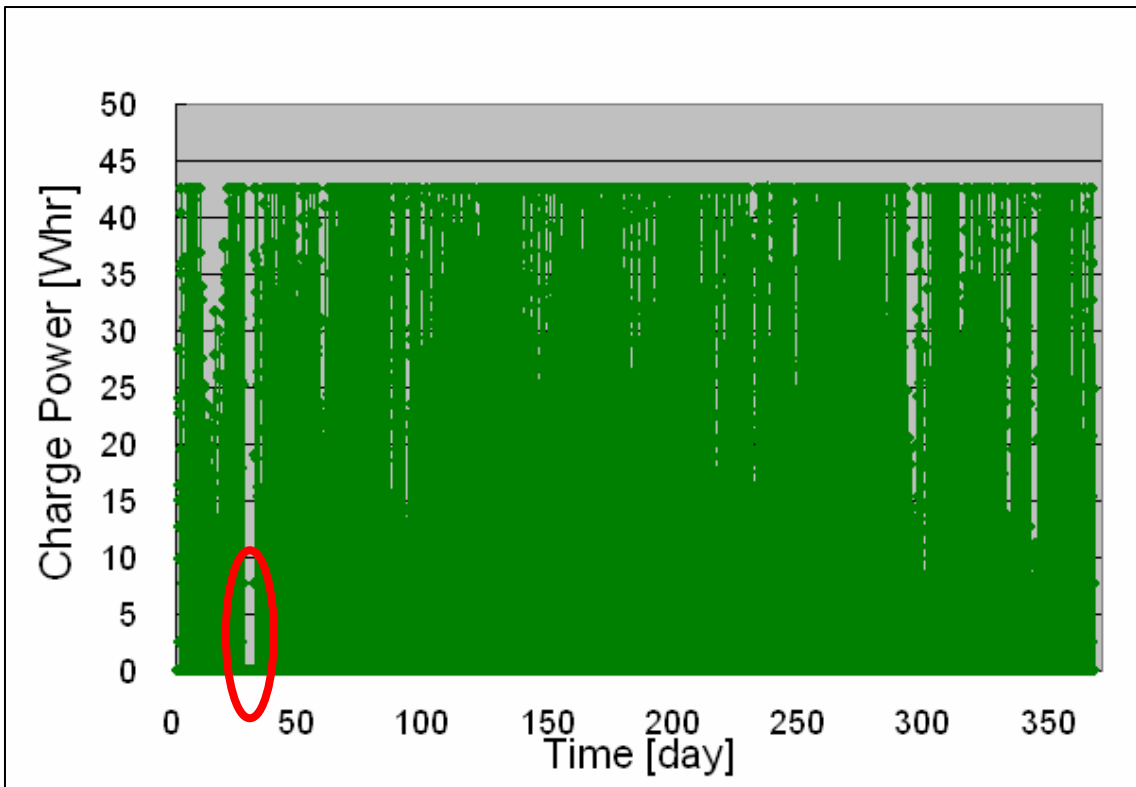
図 3-33 は式(3-1)から同一日の充電電力を推定したものである。実際にはバッテリーに蓄電される際にロスをすると考えられるが、図 3-33 では考慮していない。

図 3-33, 図 3-34 の青く円で囲んだ部分は日射強度が $500[\text{W}/\text{m}^2]$ より大きくなった時間帯である。このとき、式(3-1)より充電電力が $42.5[\text{W}]$ より大きくなっていないことがわかる。

このように 2004 年を 1 年間通して推測してみる。



☒ 3-34



☒ 3-35

図 3-34 は仰角 60[deg]に換算された 2004 年の日射強度であり、図 3-35 は推定された充電電力である。

元来、冬のほうが日射強度は弱く、その上気温も低いためバッテリーに蓄えられる電力量が少なくなる。これを防ぐため冬に最も効率が良い 60[deg]という角度で設置することになったため、60[deg]での日射強度は冬が大きく、夏は小さい値を示していることがわかる。また、図 3-35 から 1 年を通して十分な充電量が得られていることがわかる。なお、赤く円で囲んだ部分は気象データが欠損している。

3-3 クーラーボックス

実際の検出器に搭載するバッテリーはクーラーボックスに入れる。これはバッテリーの性質上、温度が下がるとバッテリー容量が減るためである。現地デルタでは冬になると氷点下 20[]に達し、バッテリー効率が著しく落ちるため、クーラーボックスに入れ、温度変化を緩和させる。

ここではクーラーボックスの特性を解析し、温度変化がどの程度抑えられるか考察する。クーラーボックスの温度下降特性を 3-3-1 で、温度上昇特性を 3-3-2 で述べる。

3-3-1 温度下降特性

0[]以下の外気温を冷凍庫を使って実現させる。

冷凍庫は GEAppliances 社製 FHJ3SF(WW)を使用し、温度調整は手動で Level1 ~ 7(-15 ~ -25[])の切り替えで行う。

冷凍庫内にバッテリーが入ったクーラーボックスを入れ、冷凍庫内とクーラーボックス内の温度変化を観察する。なお、温度測定には ThermoManager(KN ラボラトリーズ)を用い、5 分間隔に冷凍庫内蓋、冷凍庫底、クーラーボックス内蓋、クーラーボックス下部、バッテリー上部の温度を測定した。

以下に M1 の富田君が行った解析結果を示す。

$$\Delta T = T_0 \exp\left(-\frac{1}{\tau} t\right) \quad \text{————(3-2)}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta T : \text{温度変化後のクーラーボックス内外の温度差[]} \\ T_0 : \text{温度変化前のクーラーボックス内外の温度差[]} \\ \tau : \text{時定数[hr]} \\ t : \text{経過時間[hr]} \end{array} \right.$$

クーラーボックス内部の温度は外気温と内部温度の差に依存する。上記の式(3-2)は、ある時間経過後のクーラーボックス内外の温度差は、時間経過前の内外の温度差の指数関数で表されることを意味している。

次に、時定数は外気温の変化速度によって変化するため、冷凍庫の Level を 1 から 7 まですご段階ずつ一定時間毎に変化させ(スイッチ間隔)、温度を測定する実験を行った。

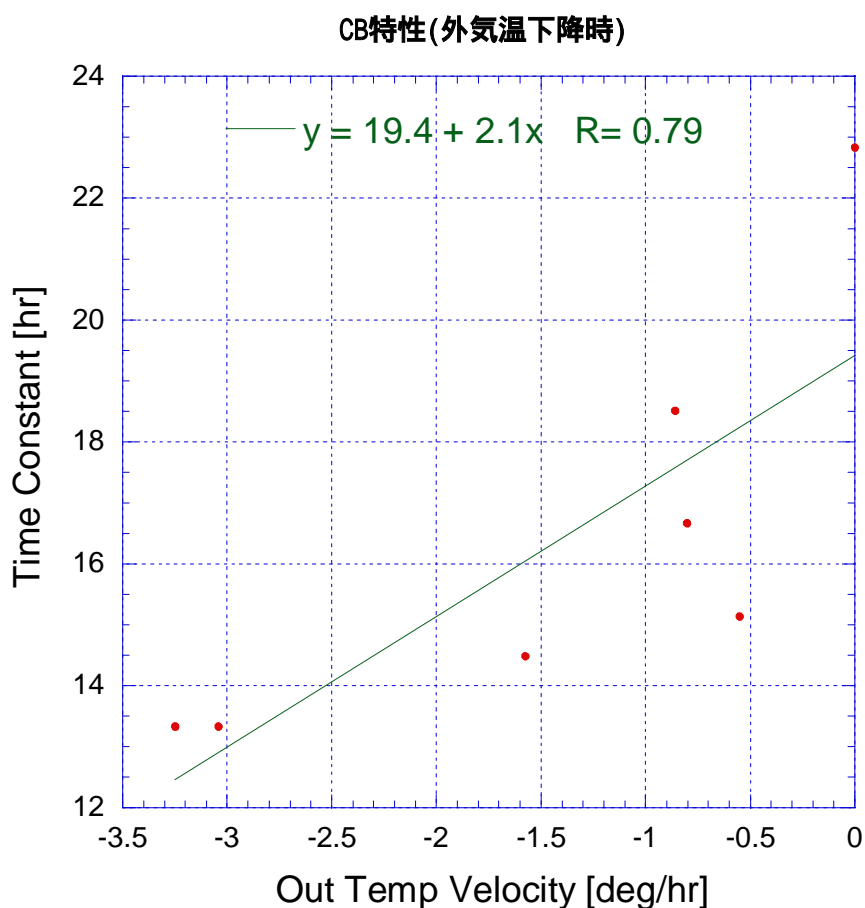


図 3-36 外気温速度変化に伴う時定数の変化

図 3-36 は外気温の変化速度でクーラーボックス内外の温度差の時定数を表したものである。

一定の温度($v=0$)のときの時定数は約 23[hr]であり、温度が下降変化を大きくしていくと時定数は小さくなっていく。1 時間で冷凍庫内温度を 3[]下げると時定数は約 3[hr]程度になる。

図 3-36 から

$$\tau = 19.4 + 2.1v \quad \text{_____ (3-3)} \quad v: \text{外気温度速度 [/hr]}$$

といえる。

これにより上記の式(3-3)は

$$\Delta T = T_0 \exp\left(-\frac{1}{19.4 + 2.1v} t\right) \quad \text{_____ (3-4)}$$

となることがわかる。ただし、この式は外気温が下降する場合に限る。

次に式(3-4)の信憑性を確認するために実験を行った。

冷凍庫内にバッテリーが入ったクーラーボックスを入れ、冷凍庫内とクーラーボックス内の温度変化を観察した。今回の実験では冷蔵庫温度(外気温)は一定にし、そのときのクーラーボックス内の温度の下降具合を観察した。

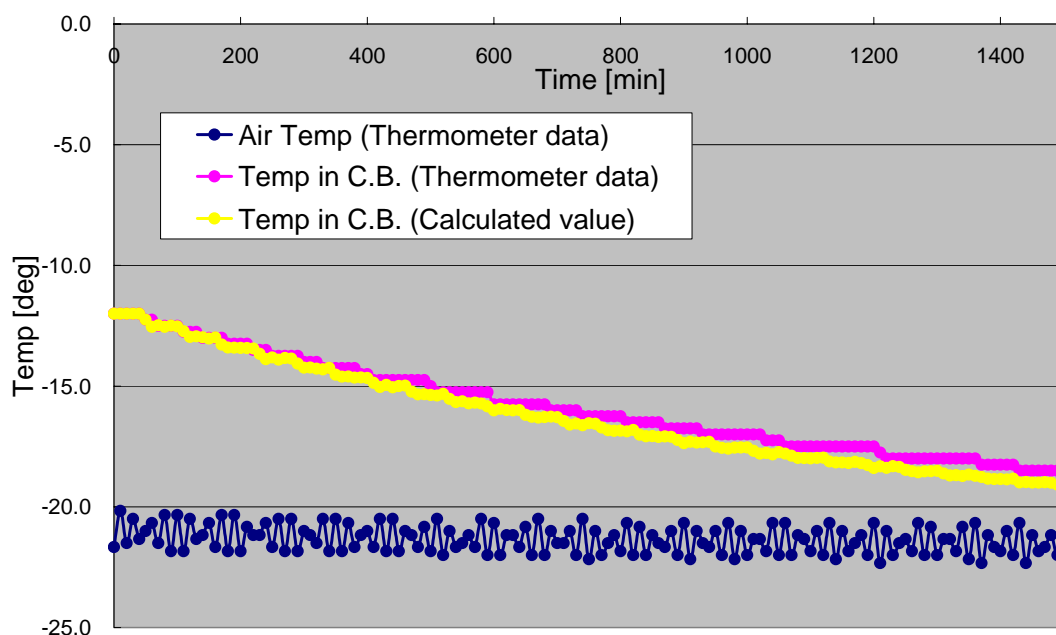


図 3-37 計測温度と計算温度

図 3-37 で紺色は冷蔵庫内温度、ピンク色はクーラーボックス内温度を示し、黄色は計算によって得られたクーラーボックス内温度を示している。

時間が経つとともにクーラーボックス内の計測温度と計算温度にズレが生じている。これは図 3-36 の外気温速度 $0 [\text{hr}]$ のときの回帰直線とプロットのズレによるものであると考えられる。現地において、外気温速度 $0 [\text{hr}]$ というのはほぼ存在しなく、常に外気温は変化し続けているので今回のこのズレというのはあまり問題ではないと考えられる。

3-3-2 温度上昇特性

時定数を求める実験は外気温が下降する場合しか行っていないので、外気温が上昇する場合には図 3-36 の y 軸に線対称になると仮定した。

仮定した外気温上昇時のものを図 3-38 に示す。

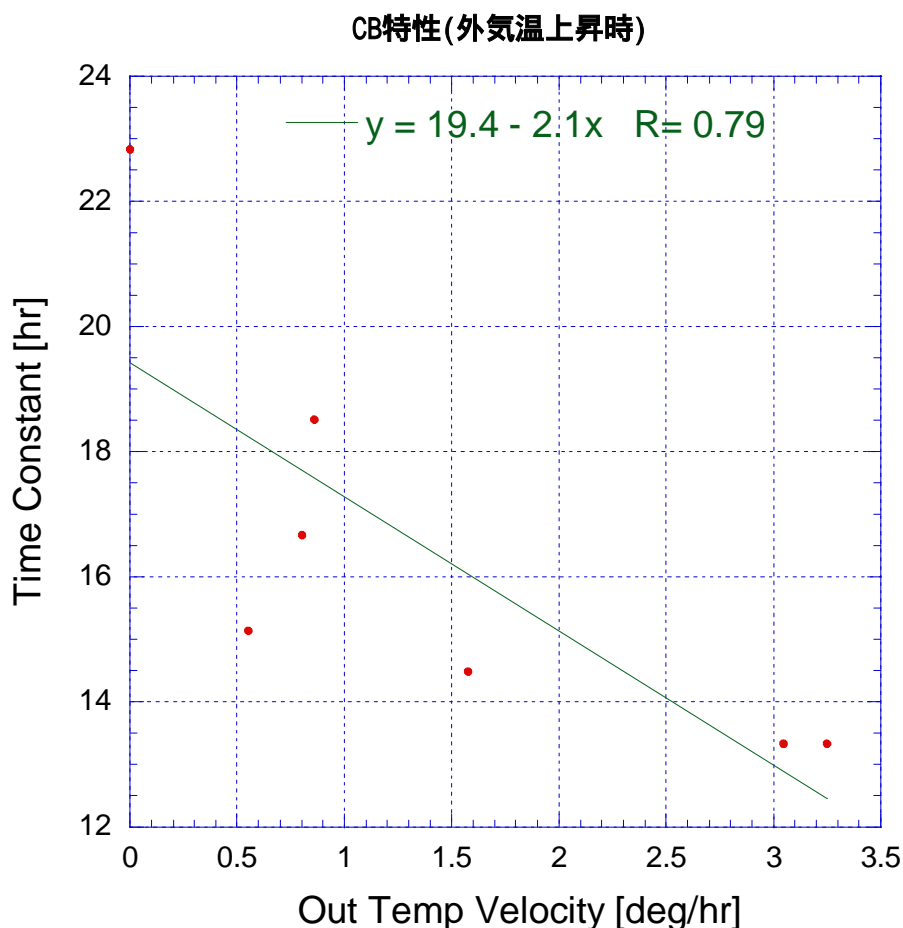


図 3-38 外気温速度変化に伴う時定数の変化(仮定)

このときの時定数及び T の式は次の通りである。

$$\tau = 19.4 - 2.1v \quad \text{---(3-5)} \quad v: \text{外気温速度 [/hr]}$$

$$\Delta T = T_0 \exp\left(-\frac{1}{19.4 - 2.1v} t\right) \quad \text{---(3-6)}$$

式(3-6)の信憑性を確認するために、冷凍庫内にバッテリーが入ったクーラーボックスを入れ、冷凍庫を OFF にし、温度上昇してきたときのクーラーボックス内の温度を測定した。

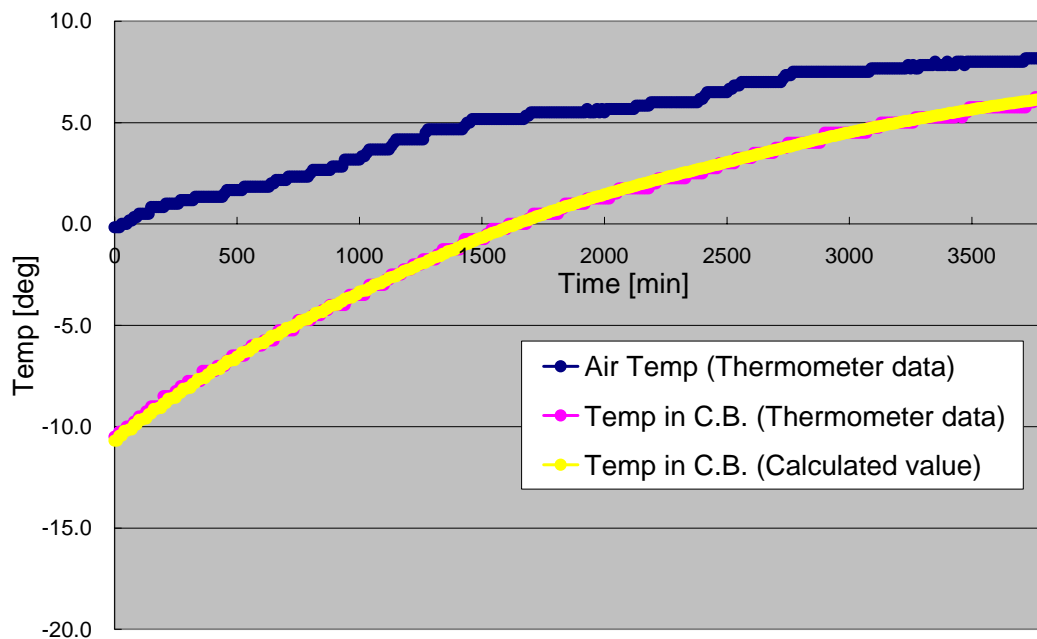


図 3-39 計測温度と計算温度

図 3-37 で紺色は冷蔵庫内温度、ピンク色はクーラーボックス内温度を示し、黄色は計算によって得られたクーラーボックス内温度を示している。

冷凍庫は 0[]から 6 時間かけて 8[]まで上昇している。このときクーラーボックスは約-10[]から約 6[]まで上昇している。式(3-6)を使って求められたクーラーボックス内の推定温度を黄色で示した。

今回の結果は計測温度と計算温度が非常に良く一致している。これは外気温速度が主に 0.1~0.3[/hr]であり、図 3-35 から回帰直線とプロットのズレが少ない範囲を用いたため、このような結果になったと考えられる。また、外気温速度 0[/hr]の部分もあるが、短時間であり、さほど内部温度に反映していないのではないかとと思われる。

3-3-3 現地での内部温度の推定

前述の温度下降特性、温度上昇特性を用い、実際の現地での気温データを使ってクーラーボックス内温度を推定する。

まず、外気温の変化速度のとり方に注意しなければならない。

これは過去に外気温が激しく変化した場合とほとんど変化しなかった場合において、クーラーボックス内の温度の変化に違いが見られると考えられるからである。本実験では、ある時間でのクーラーボックス内の温度の推定に、以下の外気温速度を検討した。

- ・ 過去 1 時間の外気温速度
- ・ 過去 2 時間の外気温速度の平均値
- ・ 過去 3 時間の外気温速度の平均値
- ・ 過去 2 時間の外気温速度の最小自乗値
- ・ 過去 3 時間の外気温速度の最小自乗値

それぞれについてデルタの気温データ(05/01/01 ~ 05/01/03)で検証してみる。

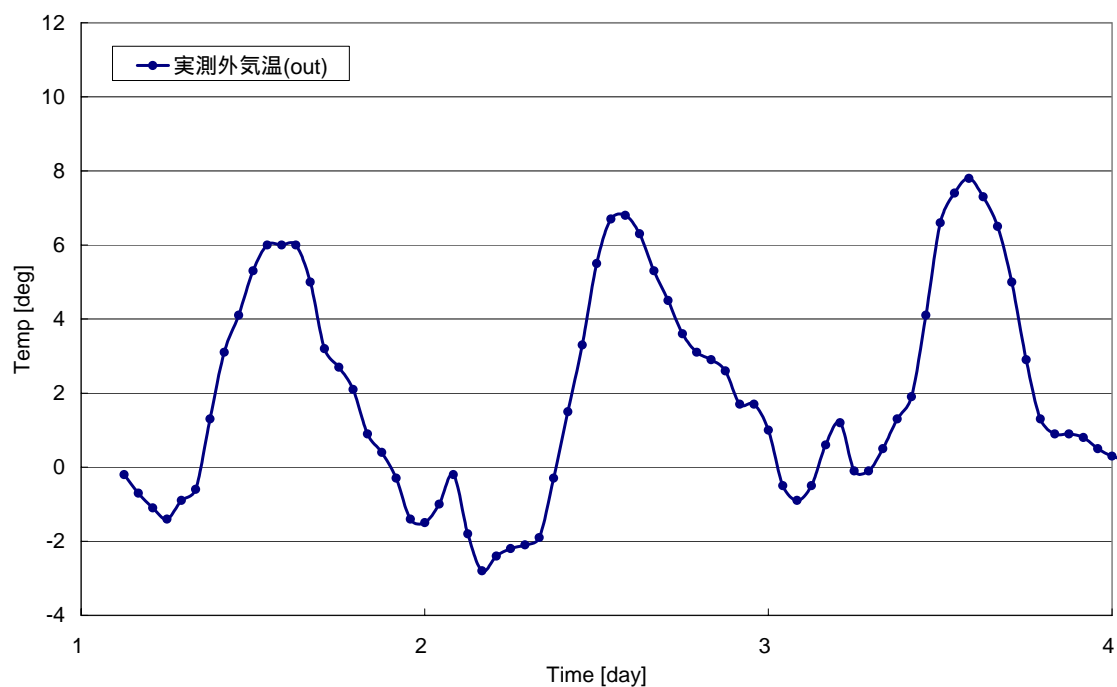


図 3-40 デルタの外気温

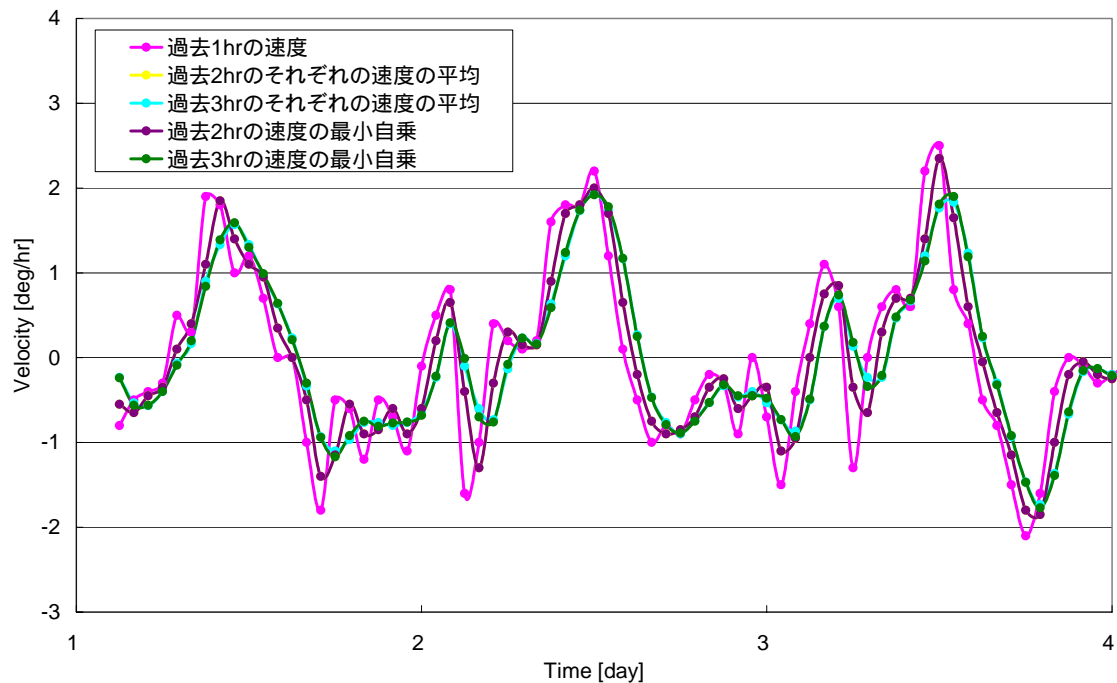


図 3-41 デルタの外気温速度

図 3-40 のデルタの外気温から求めた外気温速度を図 3-41 に表した。

図 3-41 からわかるように、過去 1 時間で外気温速度を求めると速度変化が激しいことがわかる。逆に過去 3 時間のそれぞれの速度の平均と過去 3 時間の速度の最小自乗は緩やかな変化である。これは過去の時間を長くすればするほど外気温の変化、すなわち温度上昇、温度下降を平均してしまうことになり、結果、気温速度は変化しにくくなってしまふことを意味している。

なお、“過去 2[hr]のそれぞれの速度の平均(黄色)”と“過去 2[hr]の速度の最小自乗(紫色)”および“過去 3[hr]のそれぞれの速度の平均(水色)”と“過去 3[hr]の速度の最小自乗(緑色)”はほぼ一致しているため、グラフからはそれぞれ紫色と緑色しか見てことができない。

次に、この外気温速度から式(3-3)および式(3-5)を用い、時定数を求めてみる。

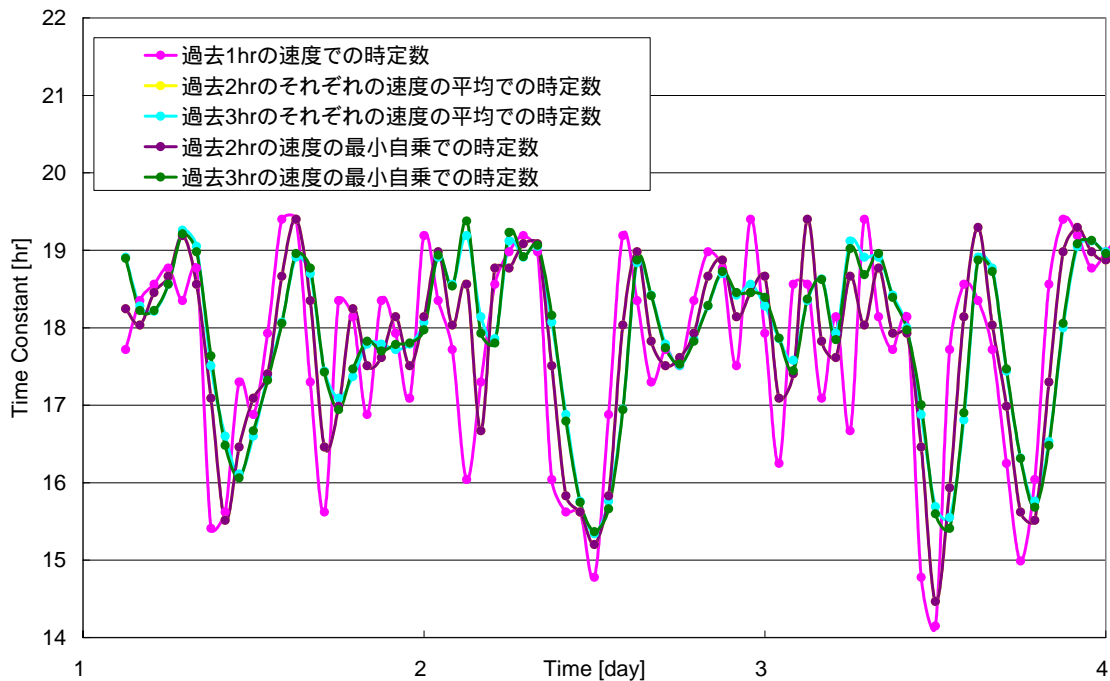


図 3-42 時定数

時定数も外気温速度と同様なことがいえる。気温速度が緩やかな変化であれば、式(3-3)および式(3-5)から比例関係にある時定数も緩やかな変化になる。

なお、外気温速度と同様、“過去 2[hr]のそれぞれの速度の平均での時定数(黄色)”と“過去 2[hr]の速度の最小自乗での時定数(紫色)”および“過去 3[hr]のそれぞれの速度の平均での時定数(水色)”と“過去 3[hr]の速度の最小自乗での時定数(緑色)”はほぼ一致しているため、グラフからはそれぞれ紫色と緑色しか見てことができない。

これらの時間のとり方に実際のクーラーボックス内温度はどれくらい影響を受けるかを検討した。この時定数から式(3-4)および式(3-6)を用い、クーラーボックス内温度の推定を行った。

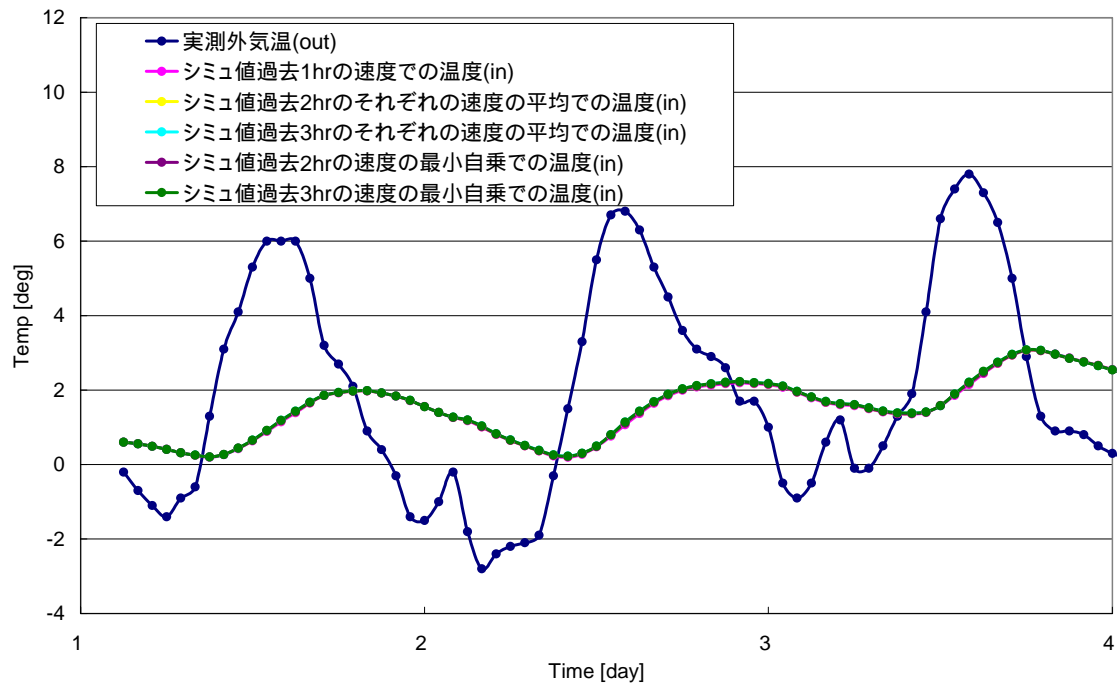


図 3-43 外気温(実測値)とクーラーボックス内温度(推定値)

図 3-43 からわかるように、時間のとり方(過去 1~3 時間)で推定温度値が変化することはなく、すべて一致している。これはクーラーボックス内温度が外気温に追いつこうとする速度よりも外気温自体の変化速度の方がはるかに大きく、影響も大きく受けるためだと考えられる。

これにより、クーラーボックス内温度を求めるための外気温速度はどれを用いても問題ないことがわかった。

今回のシミュレーションでは過去 1 時間の外気温速度を用いて、クーラーボックス内温度を推定していく。

3-4 バッテリー放電発熱特性

ここでは、放電に伴うバッテリーの発熱について説明する。

元来バッテリーに対し充放電を行うと発熱現象が生じる。これは化学反応による反応熱とセル内部で抵抗損による自己発熱があり、これらによりセル温度が上昇することが原因と考えられる。

本実験では放電発熱のみを対象に発熱を検証していく。充電の際の発熱は今回考慮しないものとする。これは後述するが、放電の際の発熱の影響が残されたままの状態で充電されるため発熱効果が顕著に現れず、考慮しなくても差し支えないものと考えられるからである。

次に実験装置の概要を説明する。

3-4-1 実験装置概要

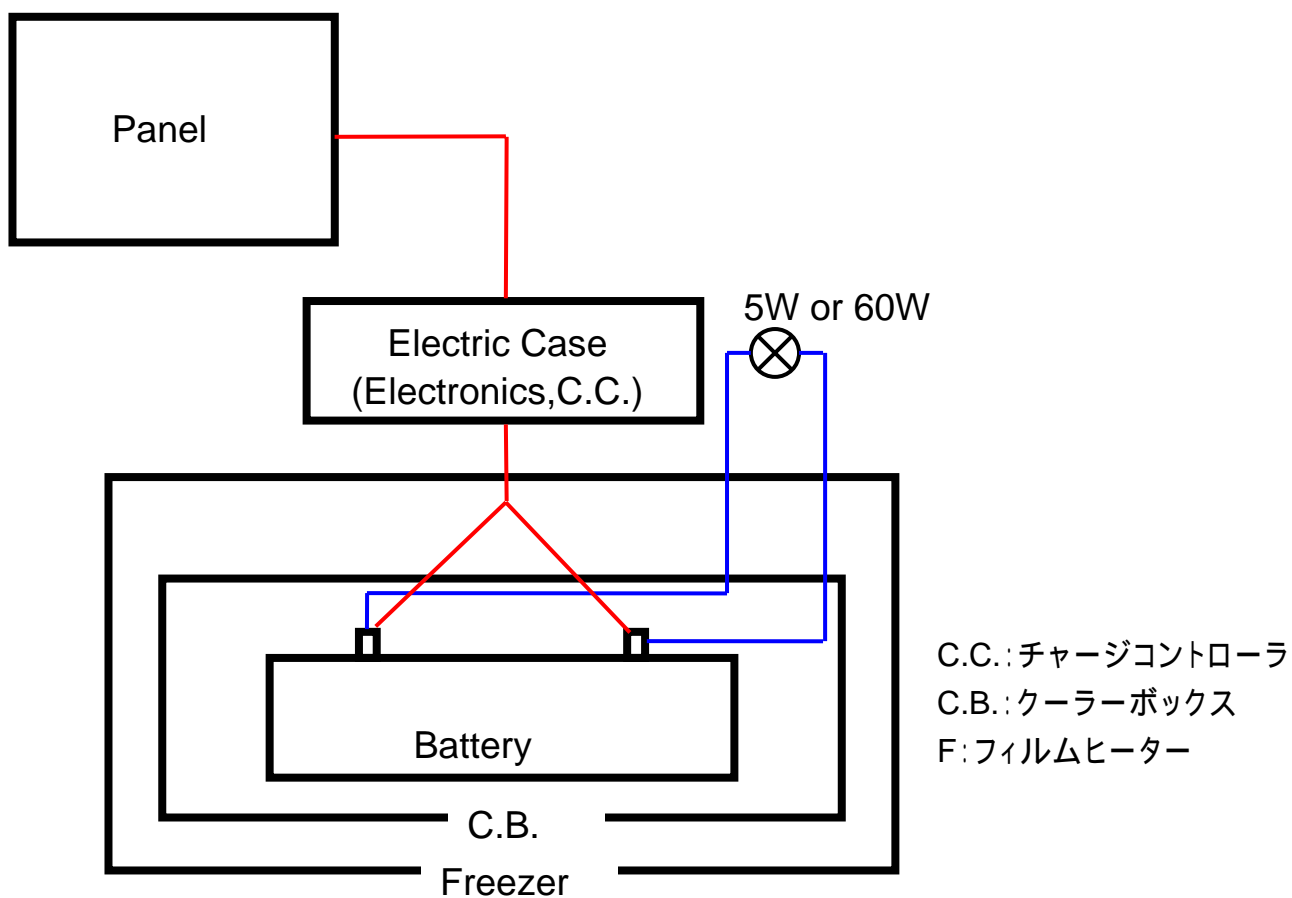


図 3-44 実験装置の概要図

図 3-44 は本実験の装置概要図であり、装置の主な構成はチャージコントローラ特性の実験と同様であるが、今回はエレキケースを外に冷凍庫外に出し、フィルムヒーターを使用しない。これはバッテリー以外の熱源を排除するためである。

実験方法として、太陽電池パネルで、発電された電力がチャージコントローラを経てバッテリーに充電される。また、充電していない時間帯に 5[W]と 60[W]の消費電球をバッテリーに繋げることで放電の際の発熱を測定する。この際、発熱の様子を測定しやすくするために冷凍庫の温度は-25[] (level7)に保つ。また温度測定には ThermoManager(KN ラボラトリーズ)を用い、10 分間隔に 冷凍庫内蓋、 冷凍庫底、 冷凍庫中層、 バッテリー上部の温度を測定した(図 3-45)。なお、この温度計はボタン状の素子で温度情報を記録することが可能である。なお、0.5[]単位のデータで出力し、温度精度は±1[](-30~+60[])である。

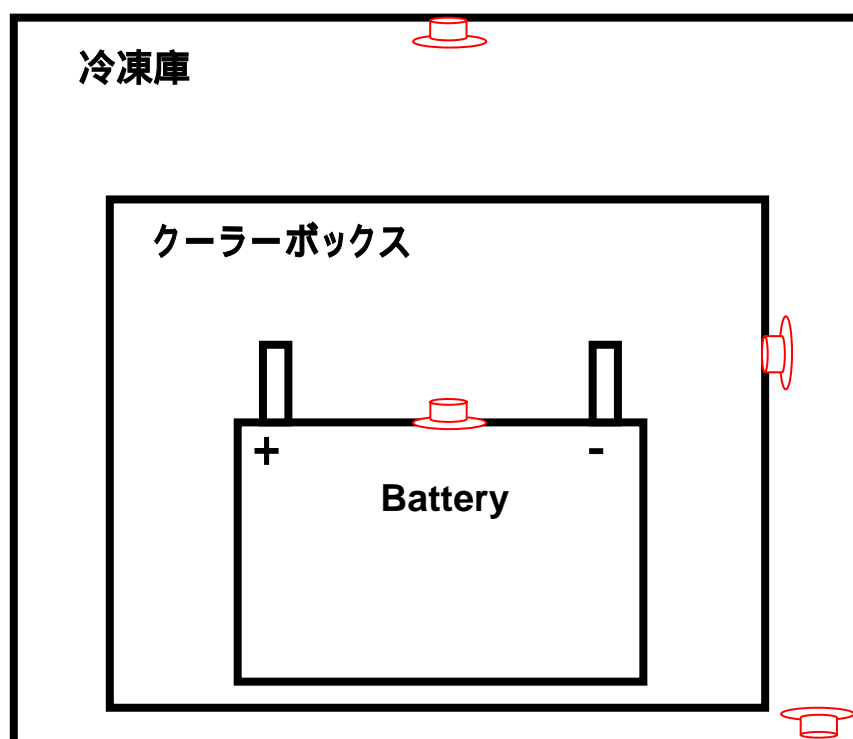


図 3-45 温度計設置場所

太陽電池パネル、エレキケース、バッテリー、クーラーボックス、冷凍庫はチャージコントローラ特性実験と同じものを使用した。

3-4-2 消費電力に伴う発熱

この実験では放電に伴う発熱だけに着目してデータ収集を行うため、充電していない時間帯に電球で消費させ、そのときのバッテリー温度(温度計の設置場所)変化を考察する。

消費電力は 12V-5W 電球と 12V-60W 電球を使用した。また、エレキケースは常に稼働し続けているため約 3.5[W]は消費していることになる。よって 5[W]電球を接続させると $5[W]+3.5[W]=8.5[W]$ 、60[W]電球を接続させると $60[W]+3.5[W]=63.5[W]$ 消費することになる。

図 3-46,図 3-47 に、5[W]電球と 60[W]電球を接続させたときのバッテリー上の温度の推移を示す。

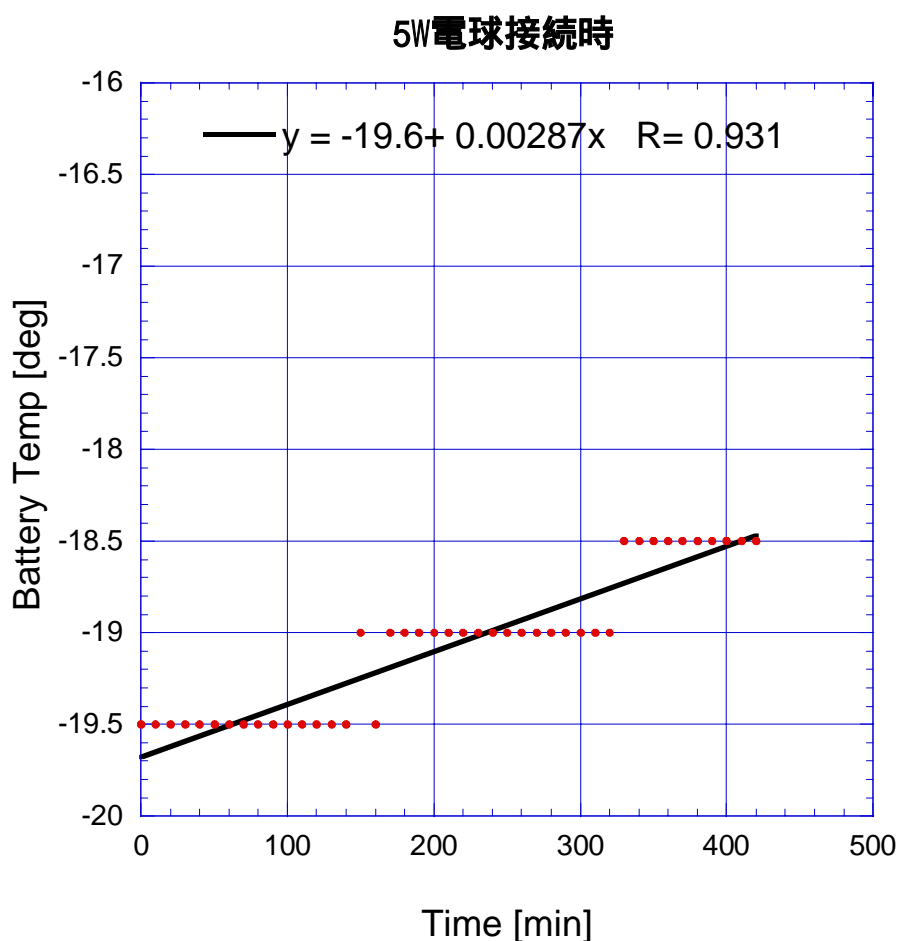


図 3-46 5[W]消費接続時のバッテリー温度変化

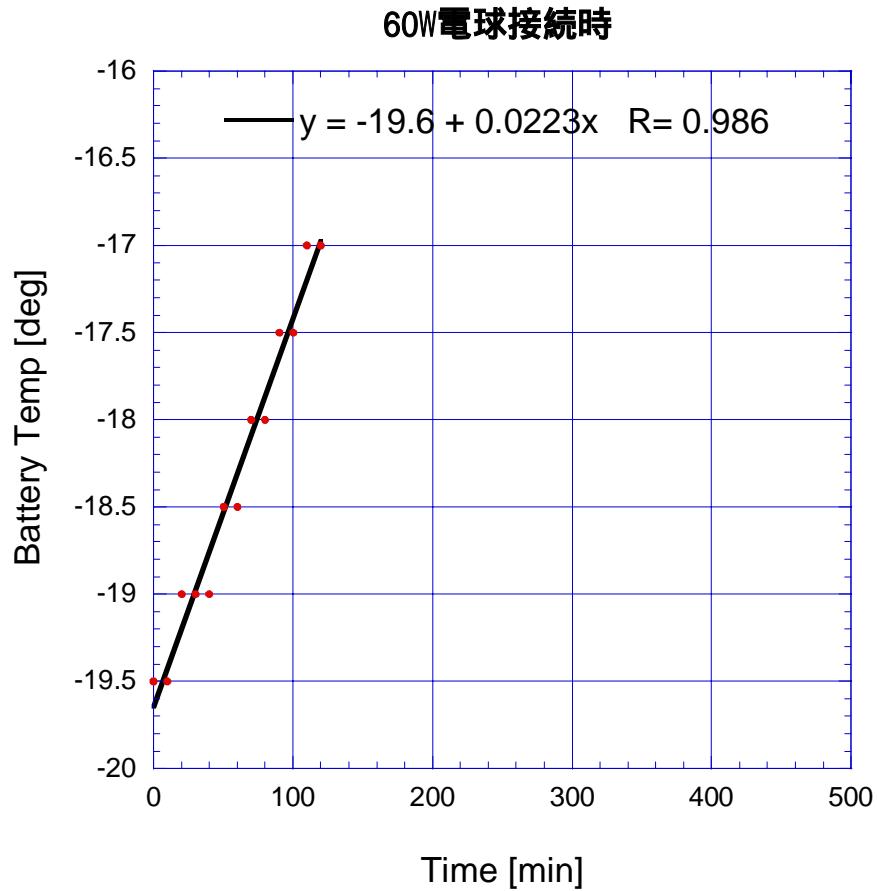


図 3-47 60[W]消費接続時のバッテリー温度変化

図 3-46, 図 3-47 から

5[W]消費のとき $\frac{\Delta Temp}{Time} = 0.0029 [\text{ / min}] = 0.17 [\text{ / hr}]$

60[W]消費のとき $\frac{\Delta Temp}{Time} = 0.0223 [\text{ / min}] = 1.34 [\text{ / hr}]$

_____ (3-7)

の式(3-7)を求めることができる。

式(3-7)から消費電力と温度上昇率の相関をとった。

ここでは消費電力として常に稼働しているエレキケースの消費分を電球消費に加えている。つまり 5[W]電球を接続させると $5[W]+3.5[W]=8.5[W]$ 、60[W]電球を接続させると $60[W]+3.5[W]=63.5[W]$ 消費することになる。図 3-48 に消費電力に対する温度変化の結果を示す。

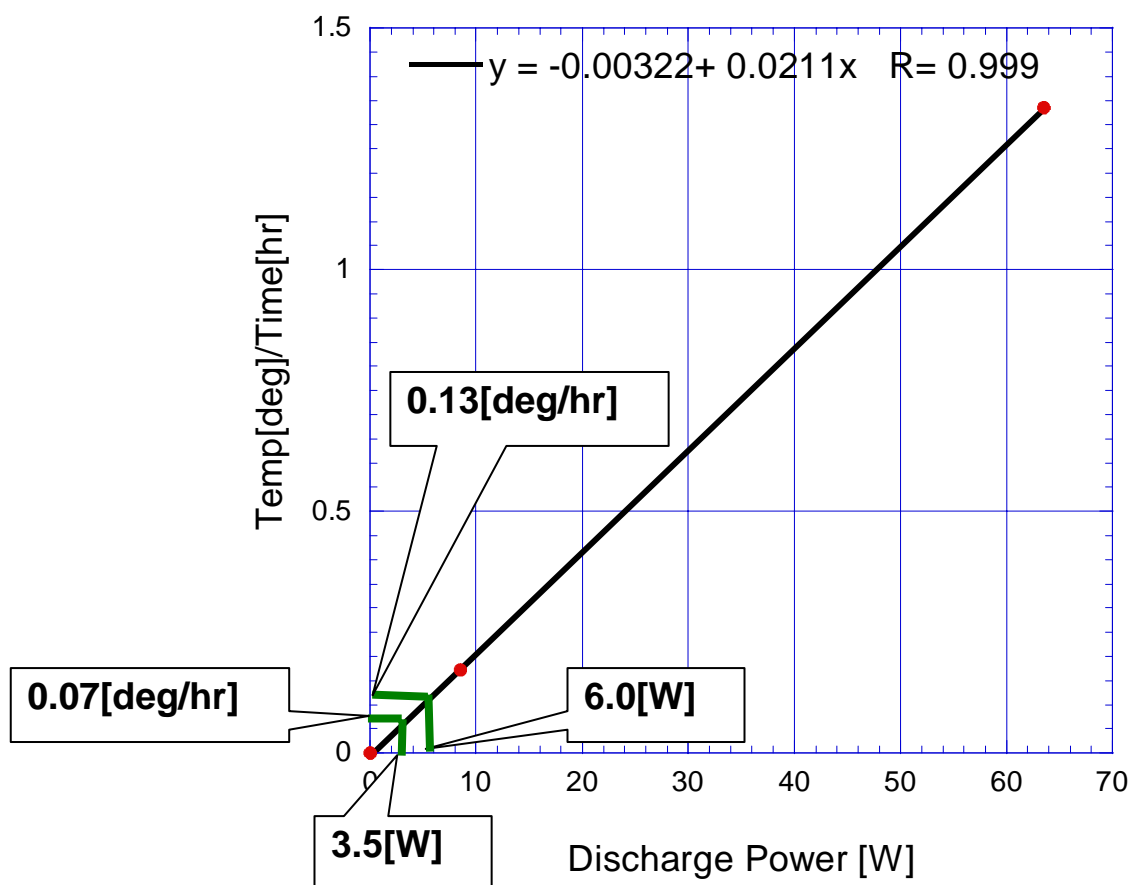


図 3-48 消費に伴うバッテリー温度上昇率の推移

ほぼ比例の関係になっていることがわかる。

図 3-48 から

$$\frac{\Delta Temp}{Time} = 0.0211P - 0.0032 \quad \text{-----} (3-8)$$

$\frac{\Delta Temp}{Time}$: 時間経過後の温度上昇[/hr]

P : 放電電力[W]

の式が導き出せる。

本実験では消費電球を接続していないときには、消費源はエレキケースのみで 3.5[W]であるので、放電のみを行っている時間帯では図 3-48 より 0.07[/hr]の温度上昇が起こることがわかる。また、現地で実際に地表検出器を稼働させる際には約 6[W]の消費になるので、図 3-48 より 0.13[/hr]の温度上昇が起こることが予想される。

3-4-3 一日の温度推移

2007年1月1日の本実験の結果について述べる。

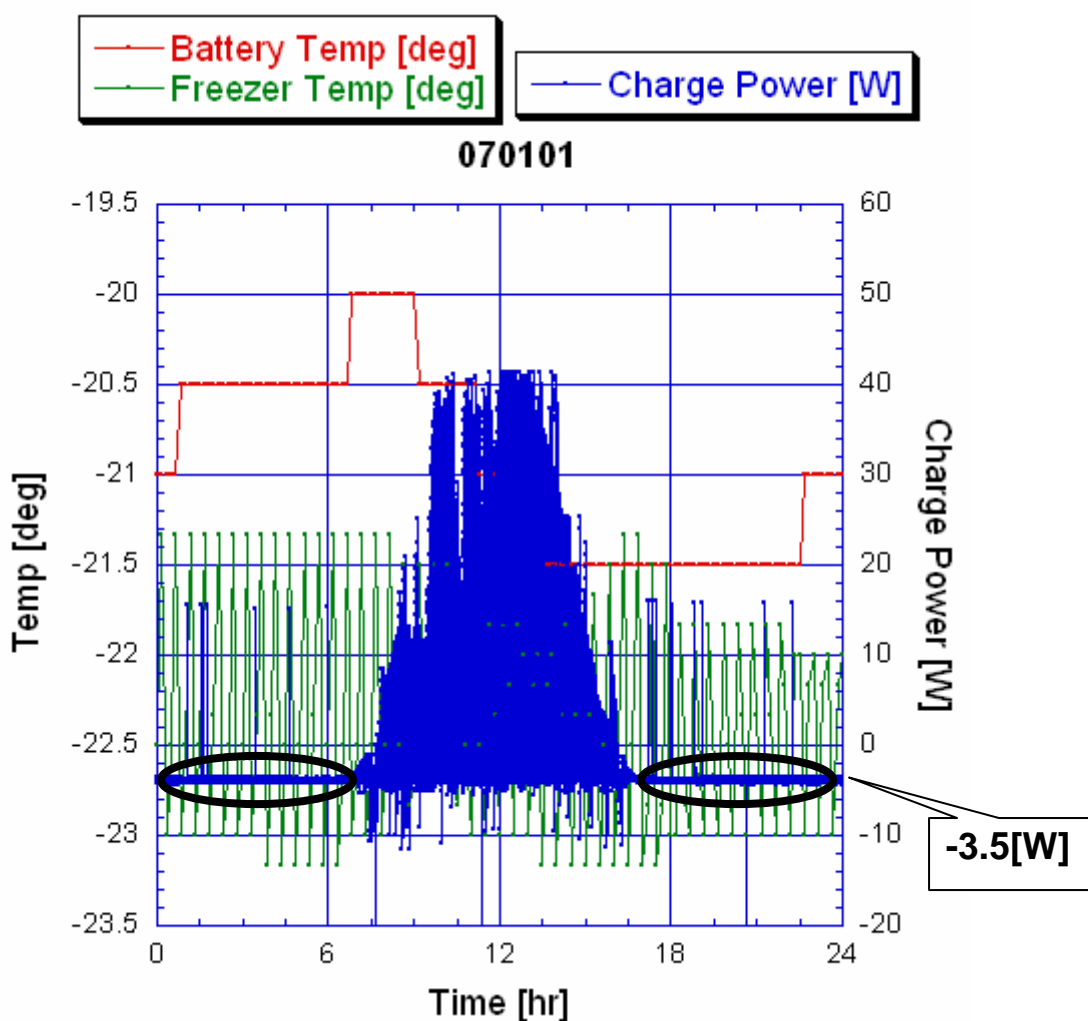


図 3-49

図 3-49 はバッテリー上部の温度(赤)、冷蔵庫内温度の平均(緑)、充電電力(青)を時間経過でみたグラフであり、左側に温度目盛、右側に充電電力が示されている。

充電電力が負の値(-3.5[W])を示している時間帯(黒く囲んだ部分)は日が出ていない時間帯で、エレキの消費をバッテリーの電力で賄っている。日が出て、充電量が正の値を示す時間帯では太陽パネルで発電された電力をそのままエレキの消費にあて、その余った電力をバッテリーに充電している。しかし、実際にはごく短時間でバッテリーは満充電状態になってしまい、それ以降の発電量は捨てられることになる。これらのことからバッテリーに充電さ

れる際は、化学反応による反応熱とセル内部で抵抗損による自己発熱による発熱がみられるはずであるが、消費電力による発熱は24時間連続してあるが、充電電力による発熱はごく短時間であるためバッテリー温度を考える上で考慮しなくてもよいのではないかと考えられる。また、本実験では外気温、すなわち冷凍庫温度を一定にしているが、実際のデルタでは外気温変化が激しく、短時間の充電発熱よりも外気温変化のほうが断然大きいので充電発熱は無視できると考えられる。

なお、冷凍庫内温度が激しく変化しているのはON/OFFを繰り返して温度を維持しているためである。

図 3-49 から充電発熱が-3.5[W]を示している時間帯ではエレキの消費はバッテリーから電力を賄っているため、バッテリーの温度は上昇していることがわかる。また、太陽電池パネルの充電電力が正の値をとっている時間帯では、エレキの消費は太陽電池パネルから直接賄っているため、バッテリーからの消費電力は無く、バッテリーへの充電のみであるが、バッテリーの温度上昇はみられない。このことからバッテリーへの充電発熱は殆どないことがわかったので充電発熱は考慮しなくてもよいと判断した。

なお、エレキの消費を太陽電池パネルから直接賄っている時間帯(太陽電池パネルの充電電力が正)は、発熱源がなく、冷凍庫内温度が低いではその温度の影響でバッテリー温度の低下がみられる。この温度低下はクーラーボックスの性能に依存している。

3-4-4 バッテリー温度の推定

以上のことからバッテリー温度を計算によって導き出す。計算方法について説明する。

まず、充電電力と消費電力を比較し、消費電力のほうが大きい場合には式(3-8)より導き出された温度上昇分の値をバッテリー温度に加えていく。また、充電電力のほうが大きい場合には、エレキの消費にバッテリーは使用されないため温度上昇は発生せず、外気温に追いつこうとする。このときバッテリー放電発熱は無視し、先述したクーラーボックス特性を用いて求めたクーラーボックス内温度をそのまま使用し、バッテリー温度を求める。

図 3-50 に 2007 年 1 月 1 日～3 日の測定温度およびバッテリー温度の推定値を示す。

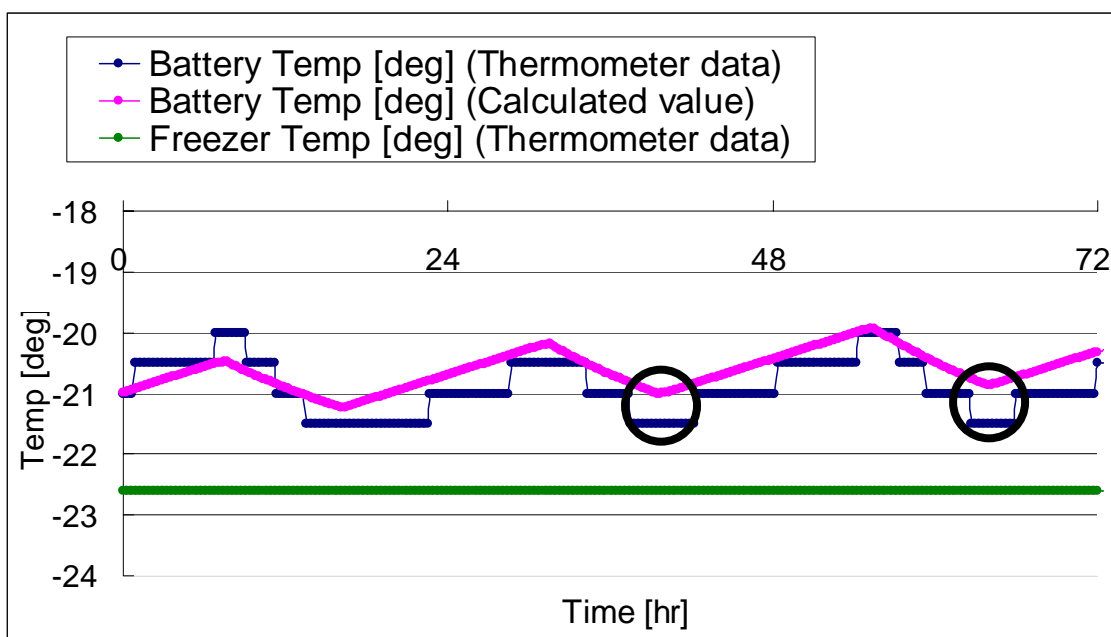


図 3-50

図 3-50 は横軸が時間、縦軸が温度となっている。紺色がバッテリー上部の実測値、ピンク色がバッテリー温度の推定値、緑色が冷凍庫温度の 3 日間の平均温度である。冷凍庫温度は ON/OFF を繰り返し、変化が激しいため、3 日間の平均の $-22.6[]$ を使用してバッテリー温度を算出している。

図 3-50 から実測値と推定値はほぼ一致しているように思われる。ただ温度低下から温度上昇に移行する(図 7 の黒円)温度に約 $0.5[]$ の違いがみられる。この原因として、温度低下にはクーラーボックス特性を用いたが、この特性はクーラーボックス内温度を求める際には問題ないがバッテリー自体の温度を求めるにはバッテリーの熱容量を考慮しなければならず、厳密には不適切であったことが挙げられる。また、今回温度測定に用いた ThermoManager は $\pm 1[]$ の温度精度であり、 $0.5[]$ は誤差範囲内であると考えられる。

3-5 エレキ発熱とバッテリー放電発熱

ここでは3-4で述べたバッテリー放電発熱とエレキの発熱を合わせて検討する。

実際の検出器に搭載するエレキの入っているエレキケースはクーラーボックスの上に載っている。エレキは電気回路の集合体であり、常時熱を発しているためエレキケースを通してクーラーボックス内に熱が伝わる可能性がある。ここではクーラーボックス上にエレキケースを乗せ、クーラーボックス内のバッテリーを使用することでエレキ発熱とバッテリー放電発熱を考慮し、バッテリー温度を検証する。

次に実験装置の概要を図3-51に示す。

3-5-1 実験装置概要

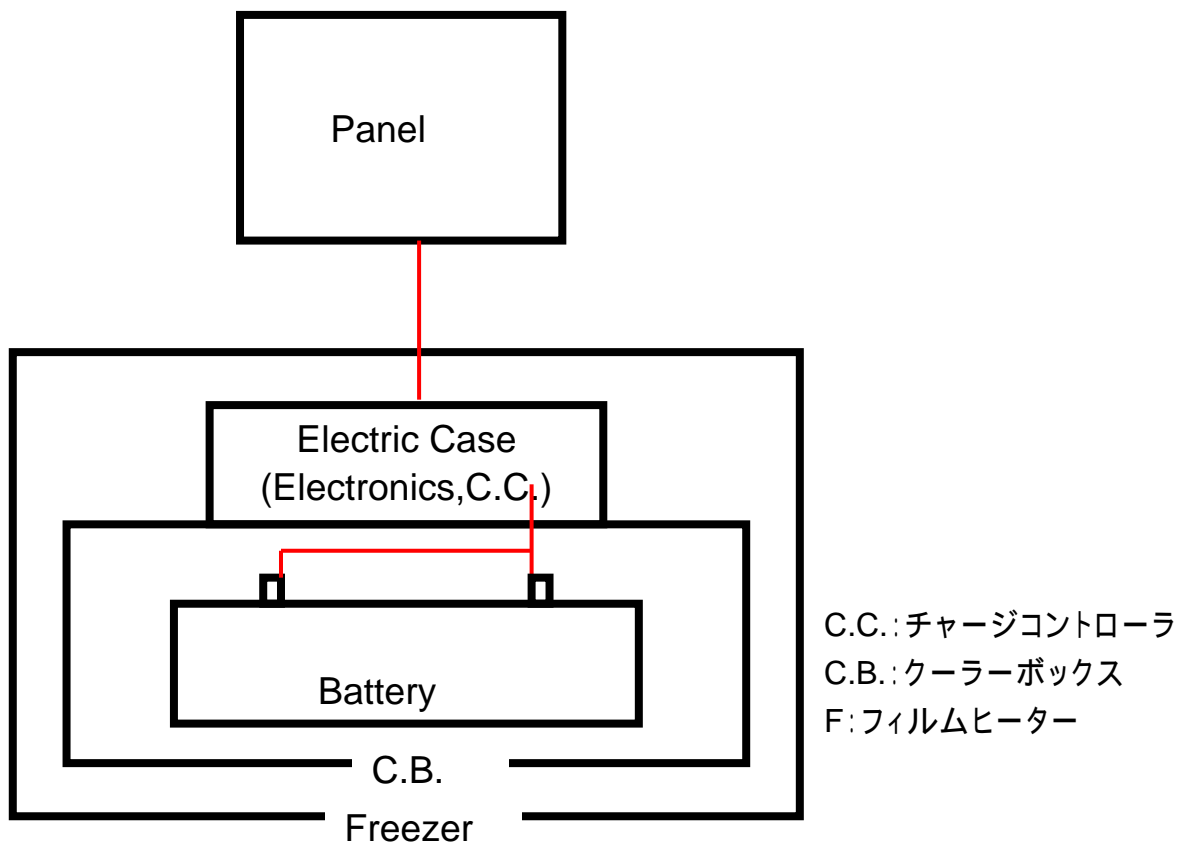


図 3-51 実験装置概要図

太陽電池パネル、バッテリー、クーラーボックス、冷凍庫は先述のバッテリー放電発熱試験の装置をそのまま使用し、クーラーボックス上にエレキケースを固定し、温度計の設置場所も図 3-52 に示すように同様にした。なお、今回の試験でもフィルムヒーターは使用しない。これはエレキおよびバッテリー以外の熱源を排除するためである。

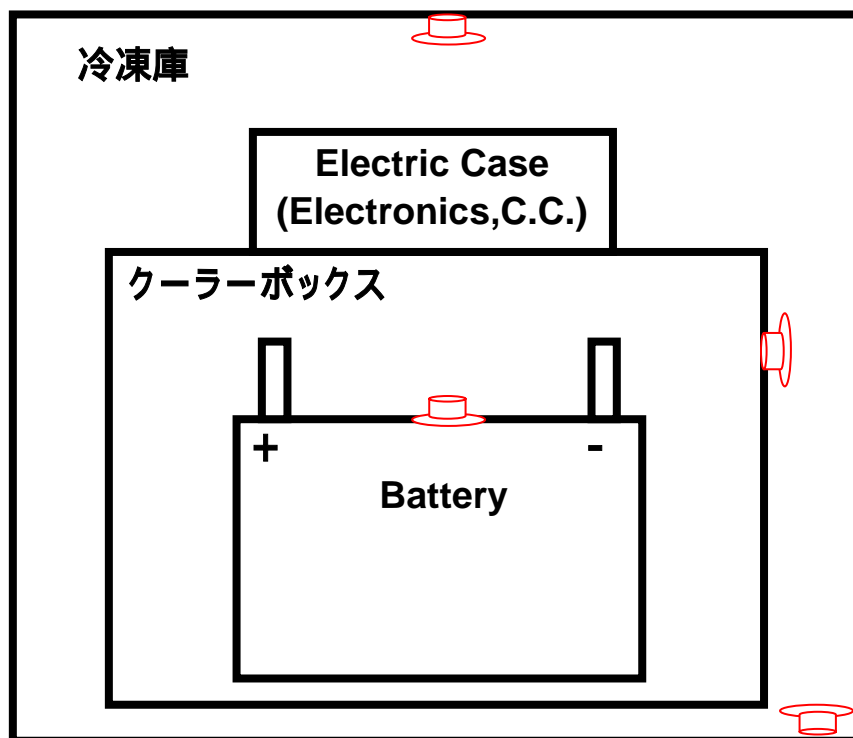


図 3-52 温度計設置場所

3-5-2 一日の温度推移

図 3-53 に 2007 年 1 月 14 日の実験結果を示す。

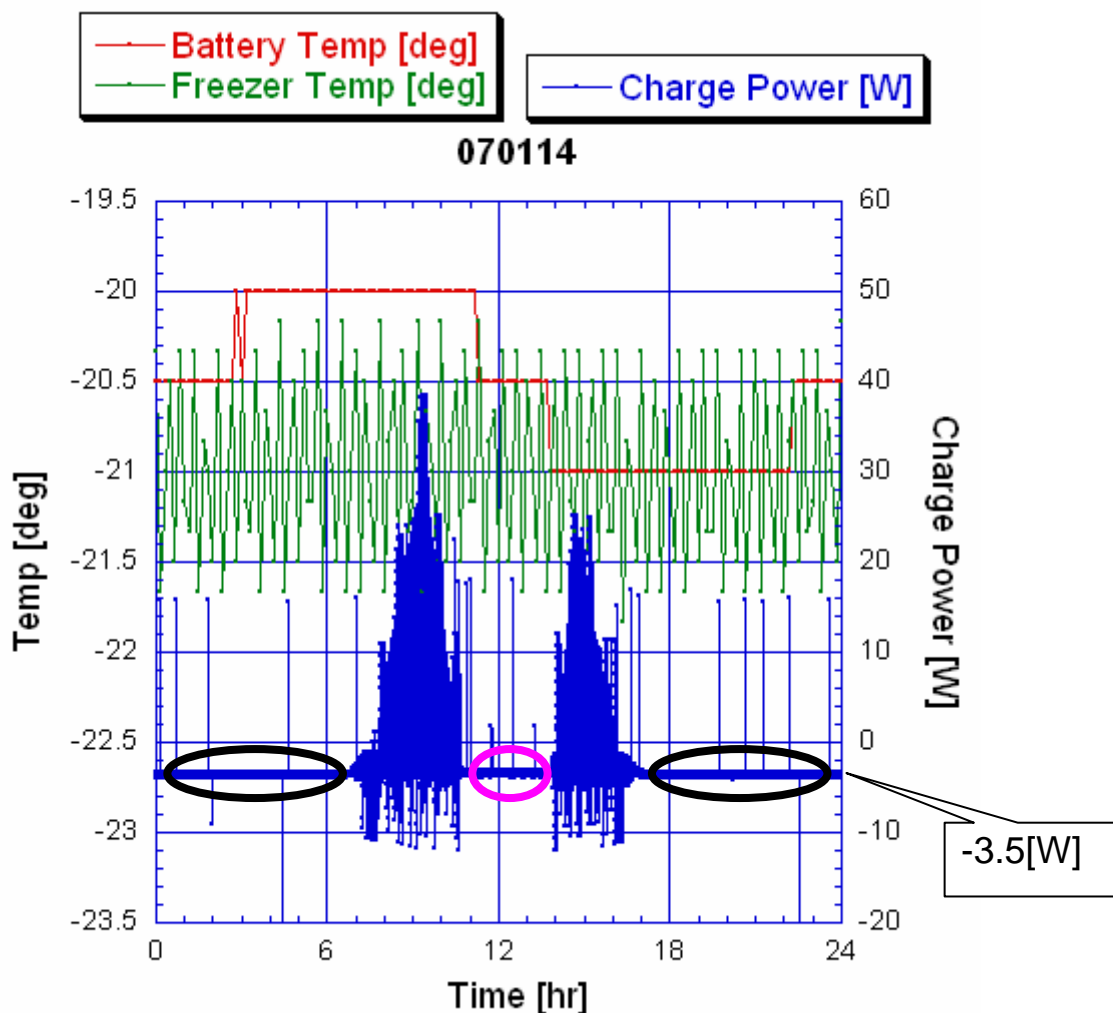


図 3-53

図 3-53 はバッテリー上部の温度(赤)、冷蔵庫内温度の平均(緑)、充電電力(青)を時間経過でみたグラフであり、左側に温度目盛、右側に充電電力が示されている。

3-4 バッテリー放電発熱特性と同様、充電電力が負の値(-3.5[W])を示している時間帯(黒く囲んだ部分)は日が出ていない時間帯で、エレキの消費をバッテリーの電力で賄っている。日が出て、充電電力が正の値を示す時間帯では太陽パネルで発電された電力をエレキの消費にあて、余った電力をバッテリーに充電していく。

ピンク色で囲んだ時間帯はバッテリーが満充電になっており、チャージコントローラにより充電を制御されている状態であるため、消費電力分の-3.5[W]の値を示している。

図 3-53 のバッテリー温度は 3-4 のバッテリー放電発熱のみを考慮した時(図 3-49)と大差のな

い結果になった。ただし、冷凍庫内温度の平均値は3-4のバッテリー放電発熱のみを考慮した時より約1.5[]高くなっている。これは熱源であるエレキケースがクーラーボックスの上に乗っており、その影響を温度計が読み取っていると予想される。そこで冷凍庫内温度を温度センサーの設置場所別にみていく。

3-5-3 冷凍庫内の温度分布

以下に 冷凍庫内蓋、 冷凍庫底、 冷凍庫中層で計測した温度データを 3-4 バッテリー放電発熱特性の実験結果と比較する。

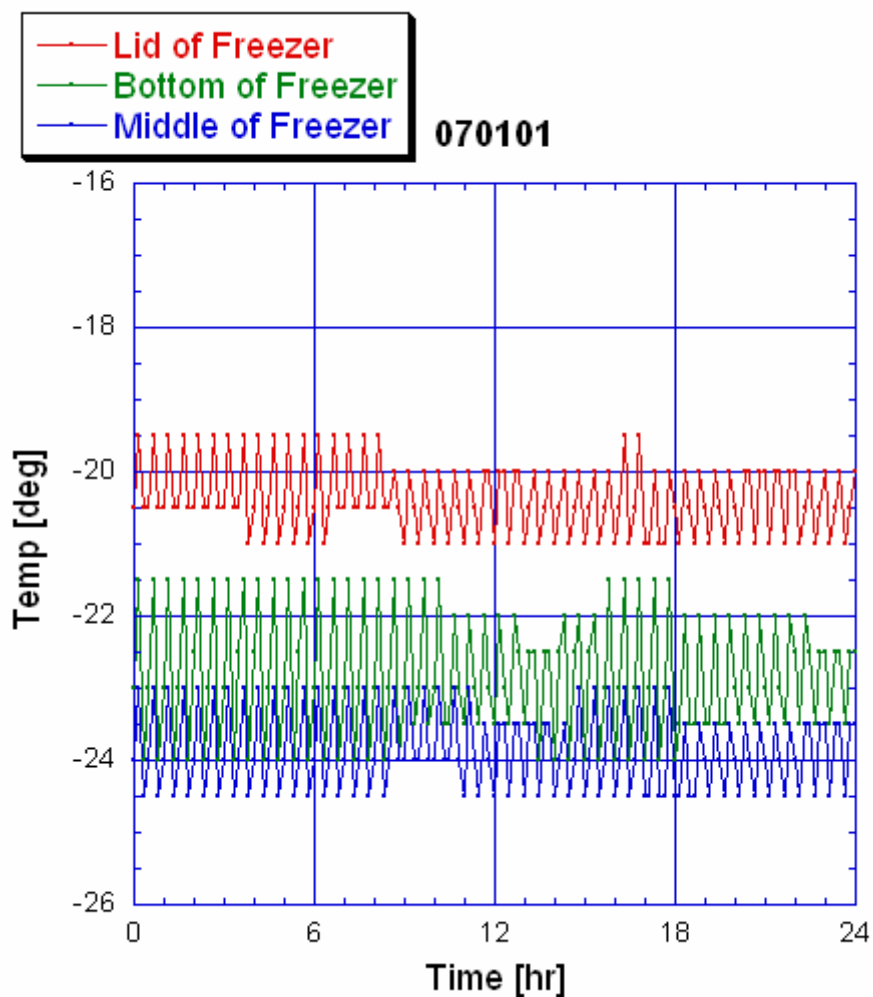


図 3-54 バッテリー発熱のみ

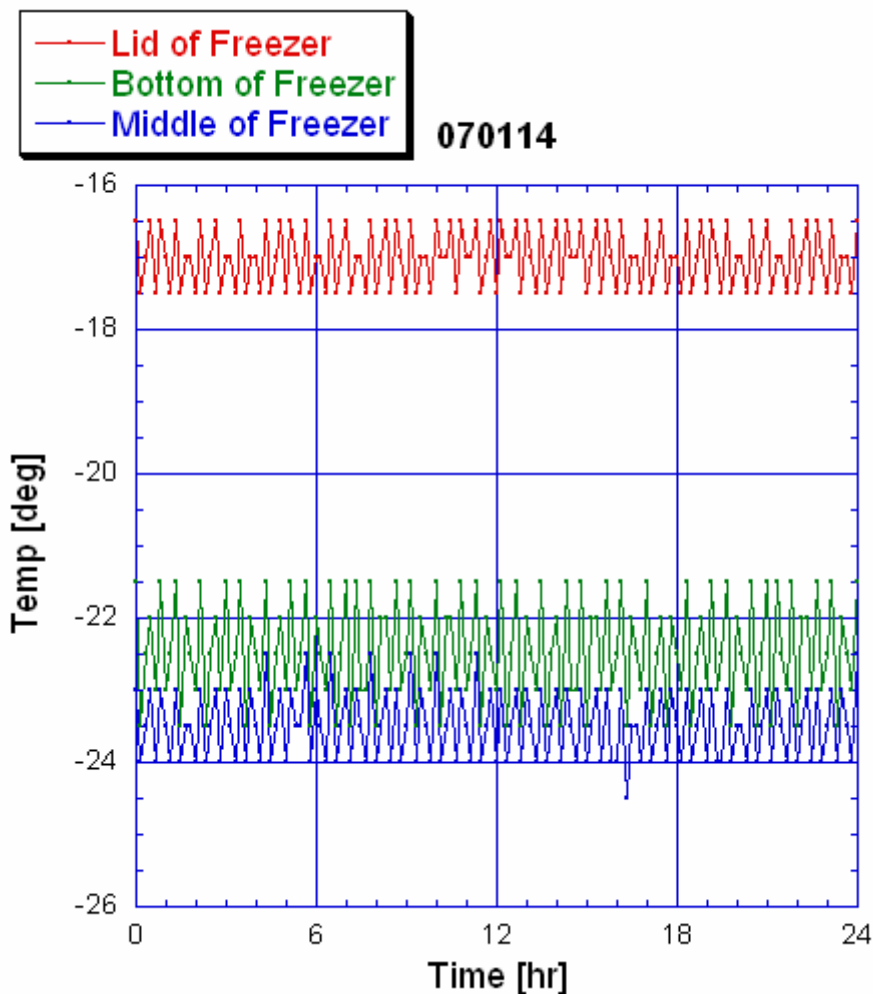


図 3-55 エレキケース発熱+バッテリー発熱

図 3-54 は 3-4 バッテリー放電発熱特性で得た冷凍庫内温度の詳細であり、図 3-55 は本実験で得た冷凍庫内温度の詳細である。それぞれ、赤：冷凍庫内蓋、緑：冷凍庫底、青：冷凍庫中層で得た温度データを時間経過に伴いプロットした図である。

図 3-54,3-55 から、冷凍庫底(緑プロット)、冷凍庫中層(青プロット)で測定した温度データは同じような値を示しているにも関わらず、冷凍庫内蓋(赤プロット)で測定した温度は図 3-54 に比べ、図 3-55 のほうがおよそ 3.5[]高いことがわかる。これは図 3-52 からわかるように、冷凍庫内蓋で測定している温度センサーはエレキケースに近く、エレキケースの発熱の影響を受けやすいことが予想される。

これらのことからエレキの発熱はクーラーボックス内にはあまり影響を及ぼさないが、冷凍庫内へ熱を放散させて大きな温度勾配が生じていることがわかる。

実際には冷凍庫の設定は Level7 にしているため、冷凍庫上部以外の温度は変化しておらず、エレキケースに近い冷凍庫内蓋で計測したセンサーだけが影響を受けている。すなわ

ち、エレキの発熱はクーラーボックス内に影響しないことがわかった。

3-5-4 バッテリー温度の推定

3-4 バッテリー放電発熱特性で用いたバッテリー温度の求め方で、実際に計測したバッテリー温度と比較してみる。すなわち、熱源はバッテリー発熱のみを考慮し、エレキの発熱からの影響は無いものとする。なお、冷凍庫内温度は3-4 バッテリー放電発熱特性の実験のときと同じく-22.6[]とする。

図 3-56 に 2007 年 1 月 14 日～16 日の測定温度およびバッテリー温度の推定値を示す。

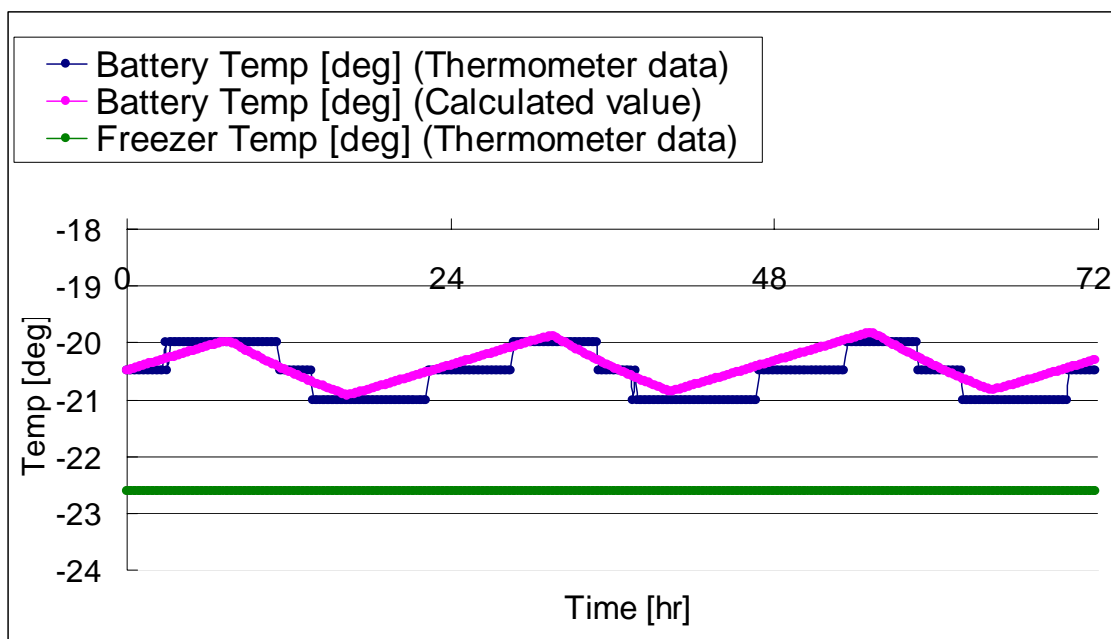


図 3-56

図 3-56 は横軸が時間、縦軸が温度となっている。紺色がバッテリー上部の実測値、ピンク色がバッテリー温度の計算値、緑色が冷凍庫温度である。

図 3-56 からバッテリー温度の推定値と実測値はほぼ一致していることから、エレキ発熱のクーラーボックス内への影響は無視しても問題ないことが証明された。

以上のことからエレキケースの発熱は本研究のシミュレーションでは考慮しないものとする。よってバッテリー温度を求める上で考慮するパラメータは、3-3 クーラーボックス特性、3-4 バッテリー放電発熱特性とする。

第4章 シミュレーション方法

ここでは具体的にどのようにパラメータを利用し、バッテリー残留電力量を算出していく方法について図4-1を参照し述べる。

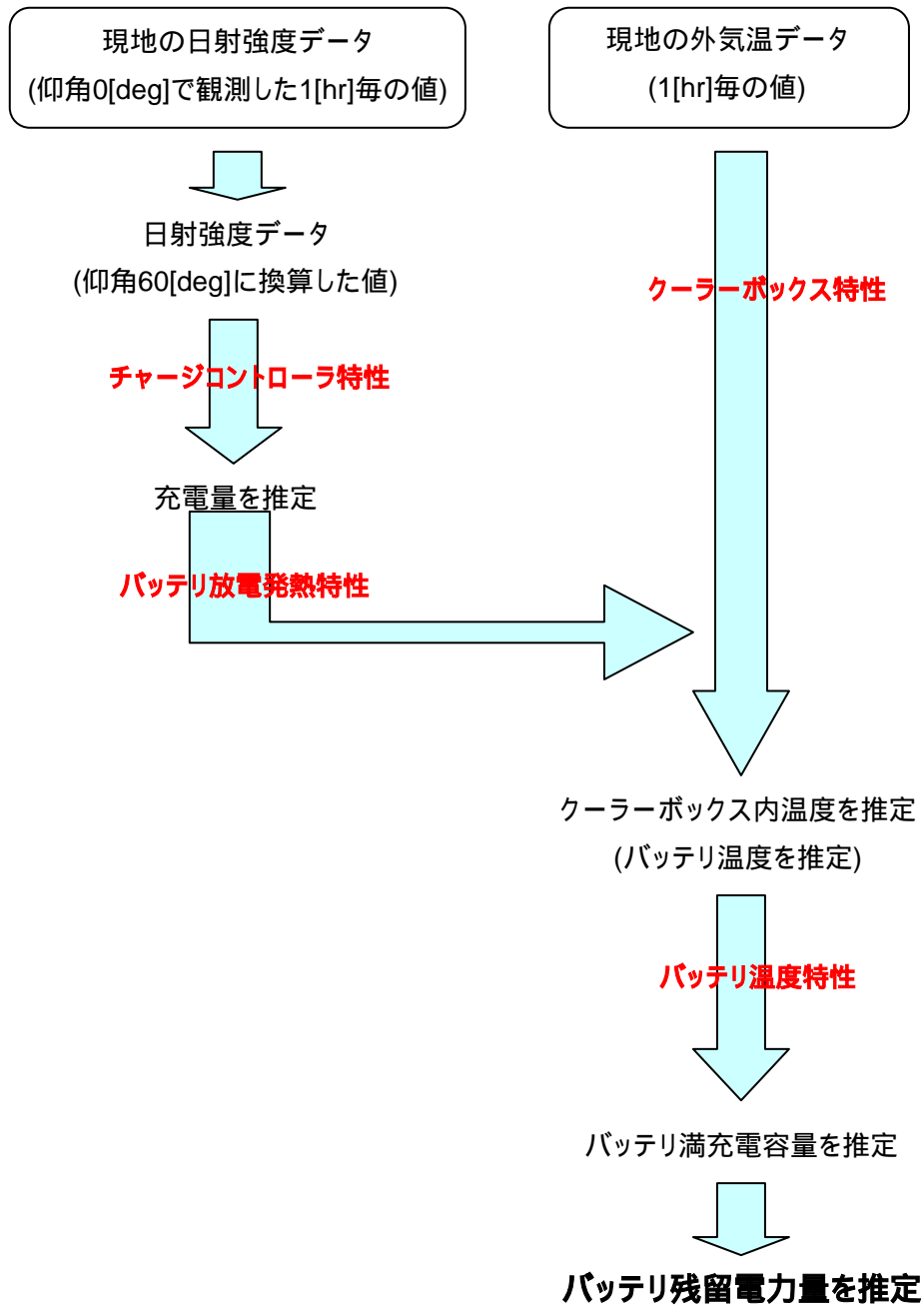


図4-1 シミュレーションの具体的な流れ

まず、使用機材について説明する。

本シミュレーションでは以下の機材を使用したときを仮定しており、各々の仕様を説明する。

太陽電池パネル

KYOCERA 社製 KC120J を使用。公称出力は日射強度 $1[\text{kW}/\text{m}^2]$ で $120[\text{W}]$ 。南向き仰角 $60[\text{deg}]$ に設置。

チャージコントローラ

東京大学宇宙線研究所製作のものを使用。3-2 で検証済み。

バッテリー

DYNASTY 社製 DCS100L(密閉式ディープサイクル)を使用。
容量は5時間容量率で $81.0[\text{Ah}]$ 、20時間容量率で $100.0[\text{Ah}]$ 。

クーラーボックス

Daiwa 社製 GXU-1600 を使用。3-3 で検証済み。

次に、シミュレーションの流れを説明する。

まず、インターネットで配信されているデルタの気象観測施設 CEMP の 1 時間毎の日射強度データに日射面積比を掛け、仰角 60[deg]での日射強度に換算する。太陽光発電パネルは仰角 60[deg]に設置されているため、60[deg]に換算された日射強度を用いる。

チャージコントローラ特性

太陽光発電パネルによって発電された電力はチャージコントローラを経てバッテリーに充電されるため、3-2 のチャージコントローラ特性で検討した式(4-1)を用い充電電力を推定する。

$$\begin{aligned} R \leq 500[\text{W}/\text{m}^2] \text{ のとき} & \quad P = \frac{42.5}{500} R \quad \text{-----} (4-1) \\ R > 500[\text{W}/\text{m}^2] \text{ のとき} & \quad P = 42.5 \end{aligned}$$

R:日射強度
P:充電電力

式(4-1)は日射強度が 500[W/m²]以下のとき、日射強度に対してリニアに充電電力は増加し、500[W/m²]を超えると 42.5[W]で横ばいになることを示している。

クーラーボックス特性

次に、デルタの気象観測施設 CEMP の 1 時間毎の気温データから気温変化速度を求める。本シミュレーションでは過去 1 時間の気温変化速度を用いる(3-3 参照)。

求められた気温変化速度からクーラーボックス内温度を式(4-2),(4-3)を使って推定する。

外気温速度 ≤ 0 のとき

$$\Delta T = T_0 \exp\left(-\frac{1}{19.4 + 2.1v} t\right) \quad \text{-----} (4-2)$$

外気温速度>0 のとき

$$\Delta T = T_0 \exp\left(-\frac{1}{19.4 - 2.1v}t\right) \quad \text{-----(4-3)}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta T : \text{温度変化後のクーラーボックス内外の温度差[} \quad] \\ T_0 : \text{温度変化前のクーラーボックス内外の温度差[} \quad] \\ v : \text{外気温速度[} \quad /hr] \\ t : \text{経過時間[} hr] \end{array} \right.$$

バッテリー放電発熱特性

式(4-1)で求めた充電電力と常時消費である電力を比較し、消費電力のほうが大きい場合には式(4-4)より導き出された温度上昇率から温度上昇分の値をクーラーボックス内温度に加えていく。また、充電電力のほうが大きい場合には、消費にバッテリーは使用されないため温度上昇は発生せず、外気温に追いつこうとする。このときは先述したクーラーボックス特性を用い、バッテリー温度を推定していく。

なお、3-5 で述べたようにエレキの発熱はクーラーボックス内温度に影響を及ぼさないとわかったため、本シミュレーションではエレキケースの発熱は考慮しないものとする。

$$\frac{\Delta Temp}{Time} = 0.0211P - 0.0032 \quad \text{-----(4-4)}$$

$$\frac{\Delta Temp}{Time} : \text{時間経過後の温度上昇[} \quad /hr]$$

$$P : \text{放電電力[W]}$$

バッテリー温度特性

こうして求められたバッテリー温度から式(4-5)を用い、バッテリー満充電容量を求める。

$$\begin{aligned} \text{till } 11.0[\text{V}] \quad Q &= -0.12T^2 + 13.92T + 767.76 \\ \text{till } 11.2[\text{V}] \quad Q &= -0.12T^2 + 13.27T + 753.46 \\ \text{till } 11.4[\text{V}] \quad Q &= -0.09T^2 + 11.75T + 712.65 \quad \text{-----(4-5)} \\ \text{till } 11.6[\text{V}] \quad Q &= -0.03T^2 + 9.71T + 638.92 \\ \text{till } 11.8[\text{V}] \quad Q &= -0.07T^2 + 9.82T + 531.43 \\ \text{till } 12.0[\text{V}] \quad Q &= -0.08T^2 + 9.20T + 382.14 \end{aligned}$$

Q : 取り出し可能な電力量 [Whr]

T : バッテリーの温度 []

ここで求めたバッテリー満充電容量は満充電の際に取り出せる容量のことである。この容量はバッテリー温度によって逐一変化する。

実際にバッテリーの残量電力量を求める際には充電電力から消費電力を引いた値をバッテリー電力量とし加算していき、仮にその値がそのときのバッテリー満充電容量よりも大きい際にはバッテリーは満充電とみなし、式(4-4)で求めたバッテリー満充電容量をバッテリー残留電力量とする。バッテリー満充電容量より小さいときには充電電力から消費電力を引いた値を逐一バッテリー電力量に加算していき、その値をバッテリー残留電力量とする。充放電の際には100[%]電力が移動できるわけではない。これは充放電の際にバッテリーの内部抵抗による抵抗損が原因と考えられ、本研究では充放電あわせて10[%]の電力ロスをするとして仮定した。すなわち充放電効率を90[%]とする(2005年度卒業論文「バッテリー耐久試験システムについて」大石泰也 参照)。

また、消費電力は合計で約6[W]である(1-5 参照)と予想されているが、今回は多く見積もって7[W]とし、シミュレーションに用いた。

これらのパラメータを用いて、バッテリー残留電力量をシミュレートしていく。ここではバッテリー電圧値11.0[V]、11.2[V]、11.4[V]、11.6[V]、11.8[V]、12.0[V]まで使用した場合のバッテリー残留電力量を求める。

シミュレーションは1時間ごとに各パラメータを算出する。具体的に、チャージコントローラ特性の式4-1で求めた充電量から消費電力を引いた値に充放電効率を掛け、バッテ

りに蓄えていく。このとき バッテリー温度特性の式(4-5)で求めたバッテリー満充電容量を超える場合には余った電力は捨てることにする。またバッテリー満充電容量は クーラーボックス特性と バッテリー放電発熱特性で求めたバッテリー温度を用い、 バッテリー温度特性の式(4-5)から求める。

第5章 シミュレーション結果

5-1 日射強度と外気温

ここではまず、本シミュレーションのインプットデータとなる仰角 0[deg]で観測された日射強度と外気温を紹介する。

これらはデルタの気象観測施設 CEMP からインターネットで配信されている1時間ごとのデータである。

2004年、2005年、2006年の3年間のデータを図5-1,5-2,5-3にそれぞれ1年分ずつ示す。

なお、日射強度、外気温共に2004年1/27 13:00~1/31 11:00、2006年3/9 18:00~3/14 19:00の期間はデータが欠損している。

日射強度

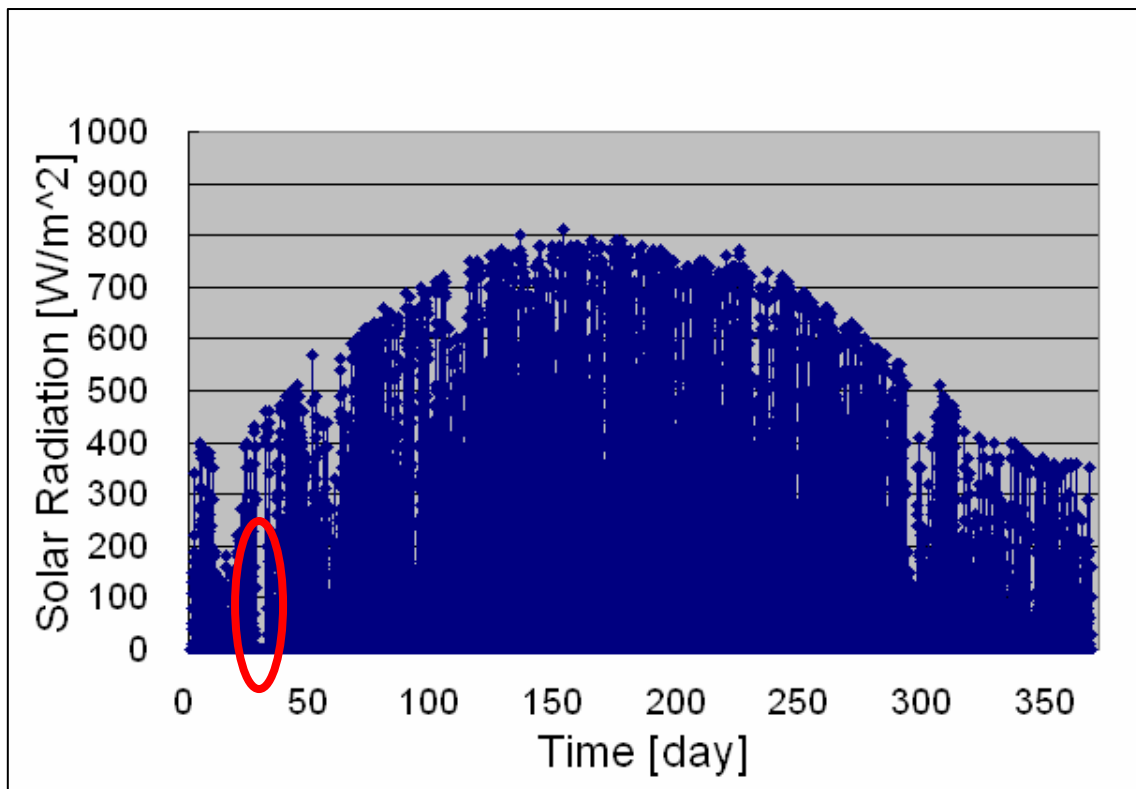


図5-1 2004年 日射強度

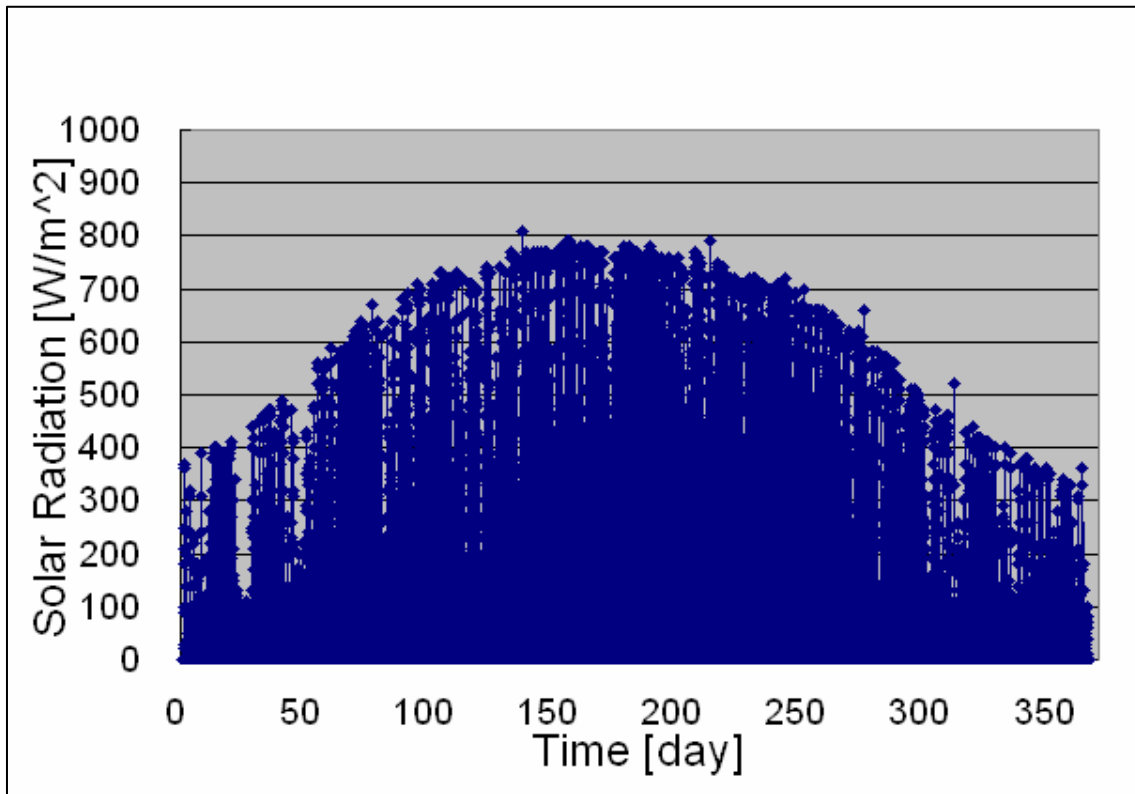


图 5-2 2005 年 日射強度

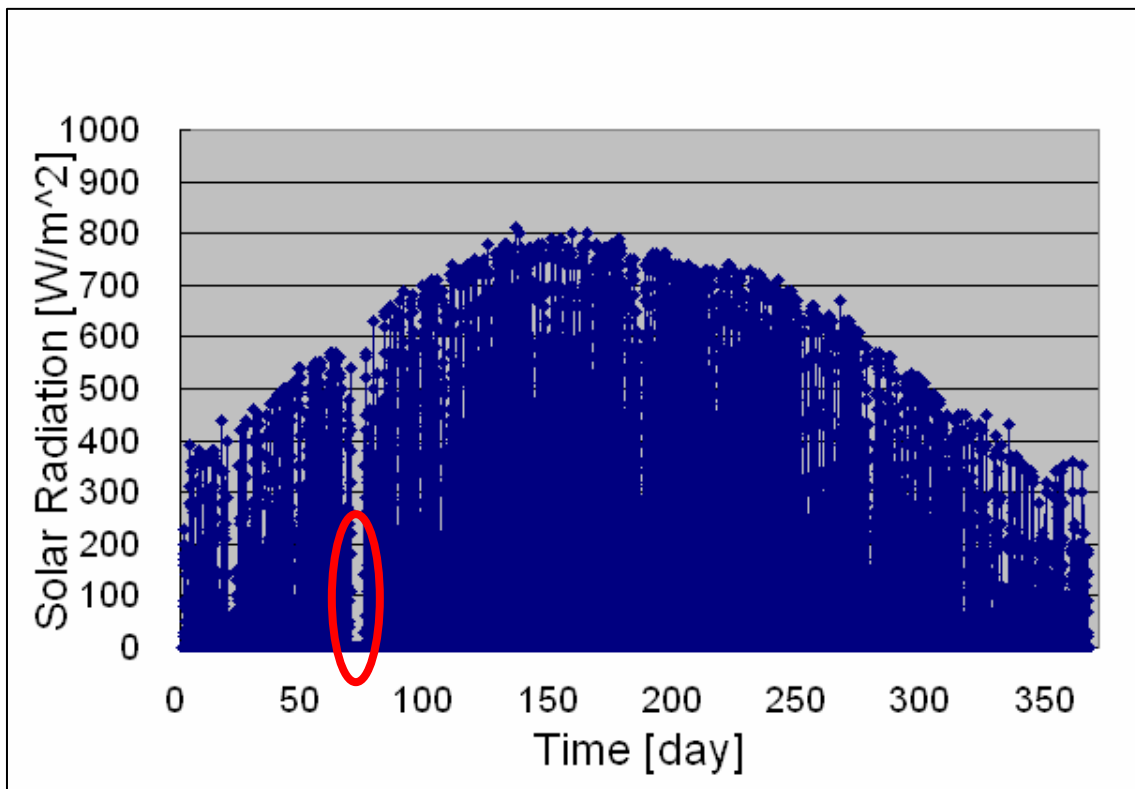


图 5-3 2006 年 日射強度

図 5-1,5-2,5-3 は横軸を時間、縦軸を日射強度として年間通してみたグラフである。

仰角 0[deg]での日射強度であるため、6月から7月にかけて夏場に最も高く、800[W/m²]近くの値を示している。これは太陽の南中高度が夏に最も高くなり、日射計に入ってくる光の強度が大きくなるためである。またその逆に、1月、12月の冬の太陽高度は低く、晴れていても日射強度は約 400[W/m²]で止まってしまう。夏場を頂点とした山型なグラフになる。これは 2004 年、2005 年、2006 年のどの年でも同様のことがいえる。

なお、赤い円で囲んだ部分はデータ欠損期間である。

外気温

次に、2004 年、2005 年、2006 年の外気温の推移をみる。

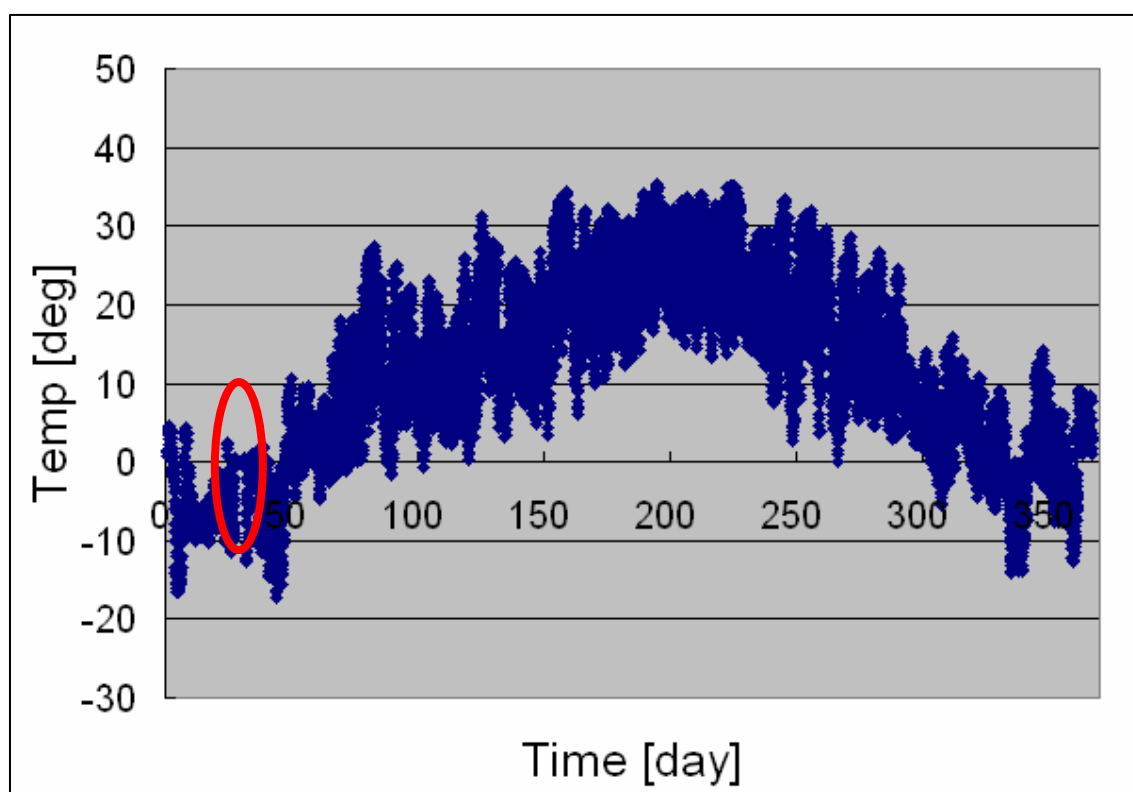


図 5-4 2004 年 外気温

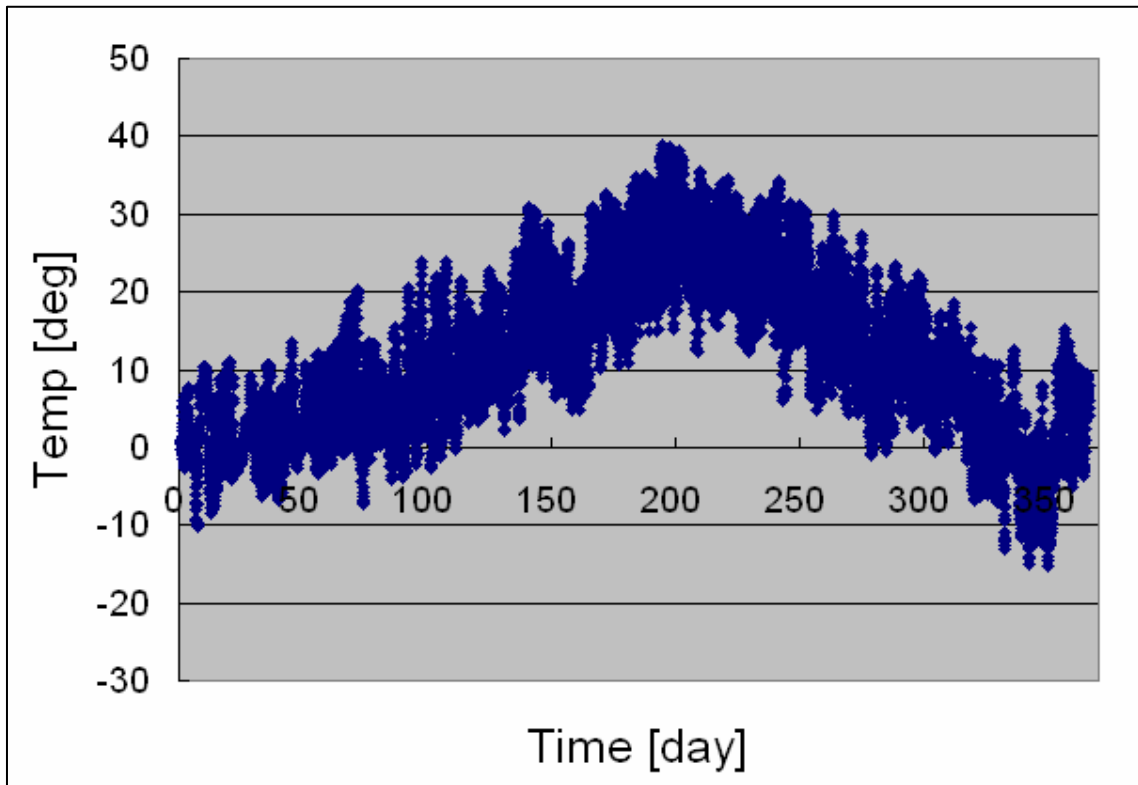


图 5-5 2005 年 外气温

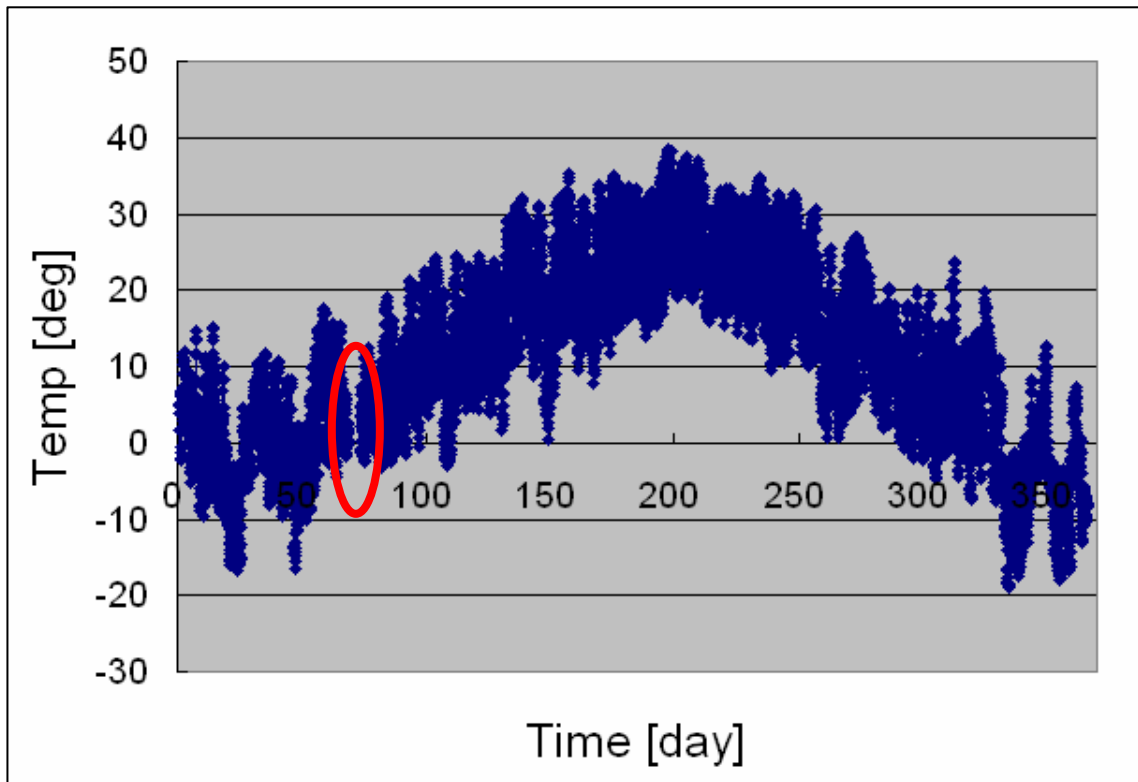


图 5-6 2006 年 外气温

図 5-4,5-5,5-6 は横軸を時間、縦軸を気温にして年間通してみたグラフである。

最高気温の時期は 7 月がピークで 35 ~ 40[]に達する。冬場の最低気温は-25 ~ -15[]になることがわかる。日射強度に比べ若干ばらつきはあるものの、夏場を頂点とした山型なグラフになる。日射強度のグラフと同様、赤い円で囲んだ部分はデータ欠損期間である。

これら日射強度と外気温のデータからシミュレーションを行い、最終的にバッテリー残留電力量を算出する。

5-2 充電電力の推定

ここでは日射強度のデータから充電電力を求める。

デルタ気象台の気象観測施設 CEMP からインターネットで配信されている仰角 0[deg]で測定された日射強度を用いるのだが、太陽光パネルは仰角 60[deg]に設置されているためデータを換算する必要がある。

先に述べたように垂直面積比を掛けることによって仰角 60[deg]での日射強度を推定する。

0[deg]での日射強度データと推定した 60[deg]の日射強度の 1 日毎の例を図 5-7(2004 年 3 月 20 日)、図 5-8(2004 年 6 月 21 日)、図 5-9 (2004 年 9 月 23 日)、図 5-10(2004 年 12 月 21 日)に示す。また 2004 年通年の 0[deg]での日射強度を図 5-11 に、60[deg]での日射強度を図 5-12 に示す。

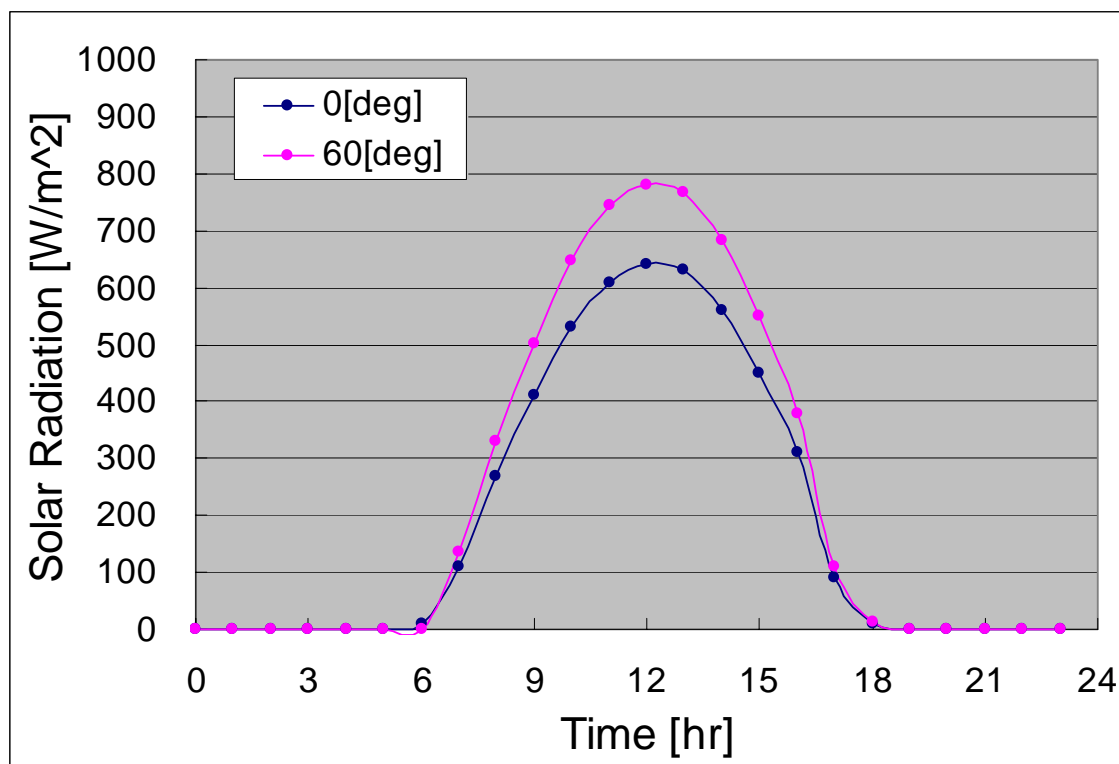


図 5-7 2004/3/20 の日射強度

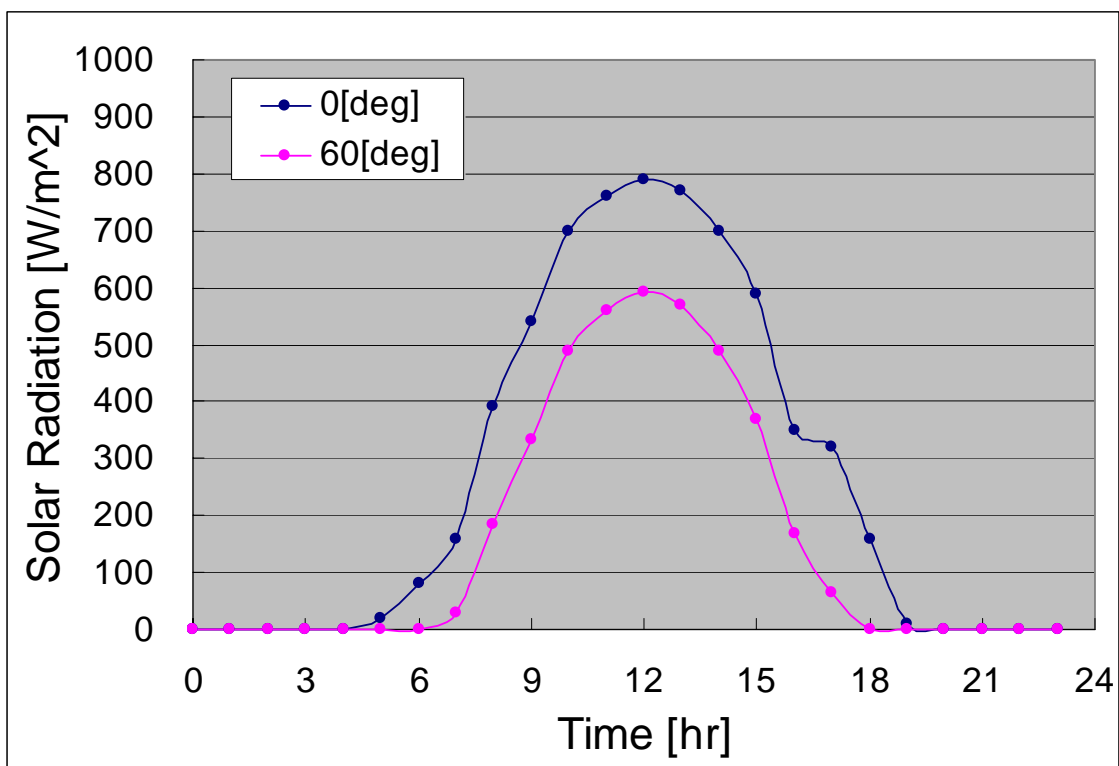


図 5-8 2004/6/21 の日射強度

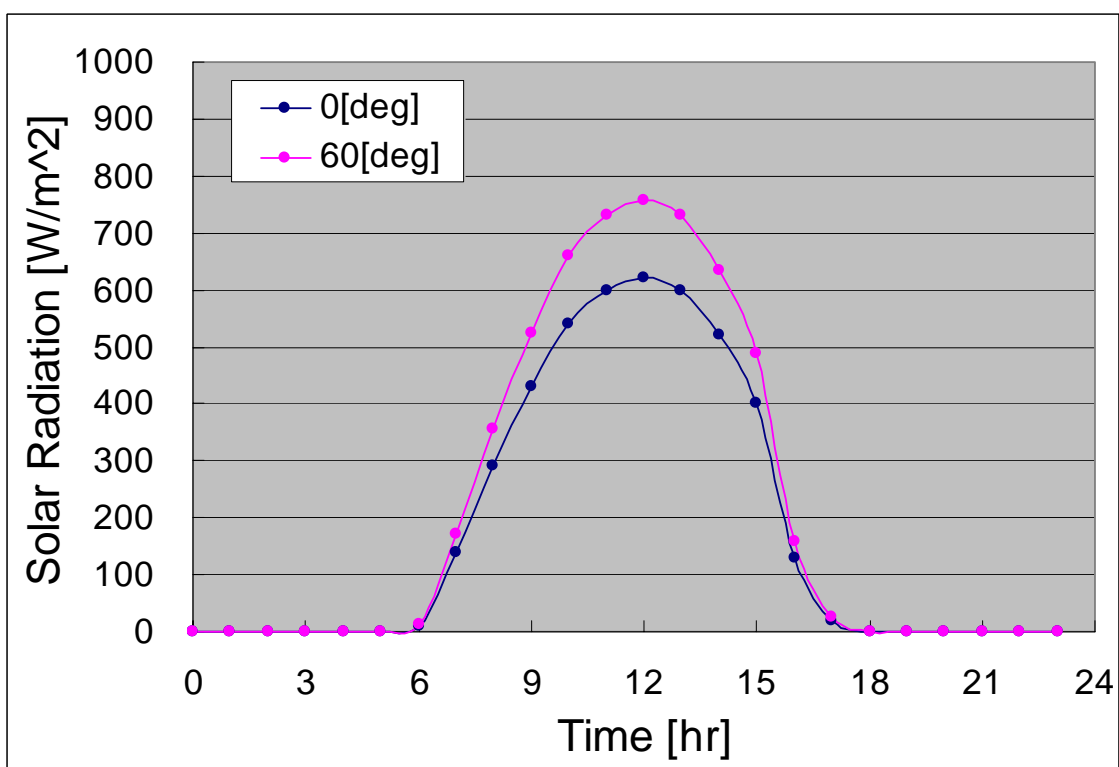


図 5-9 2004/9/23 の日射強度

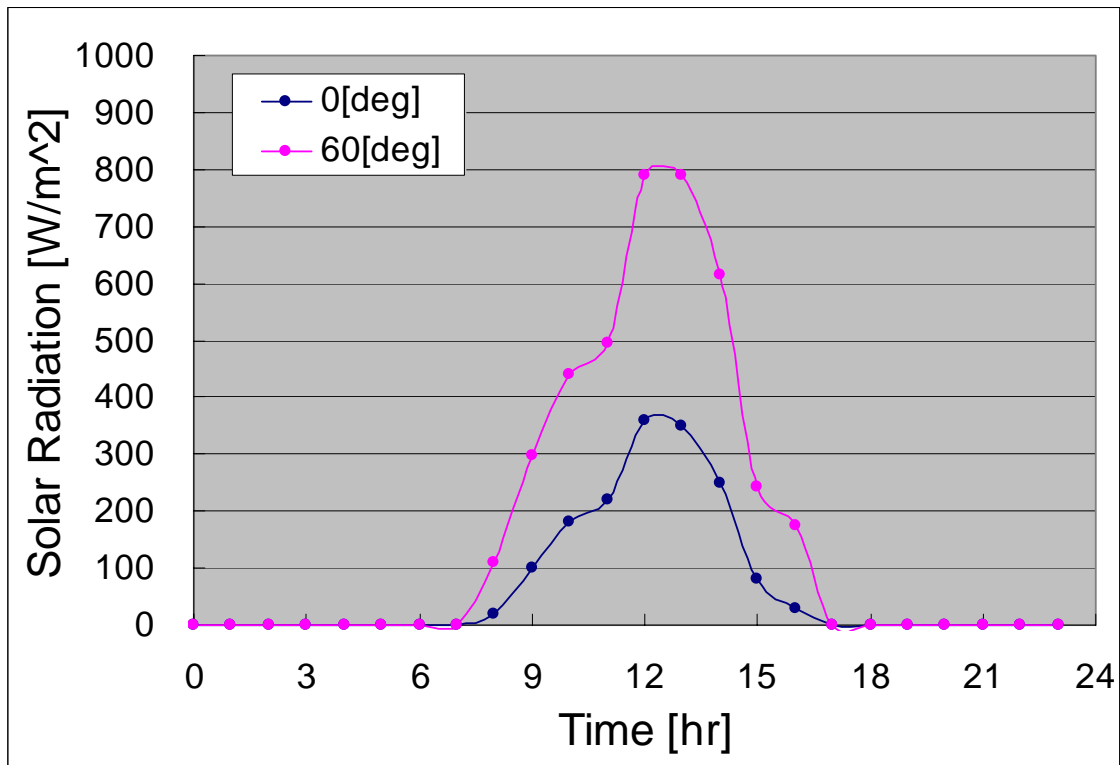


図 5-10 2004/12/21 の日射強度

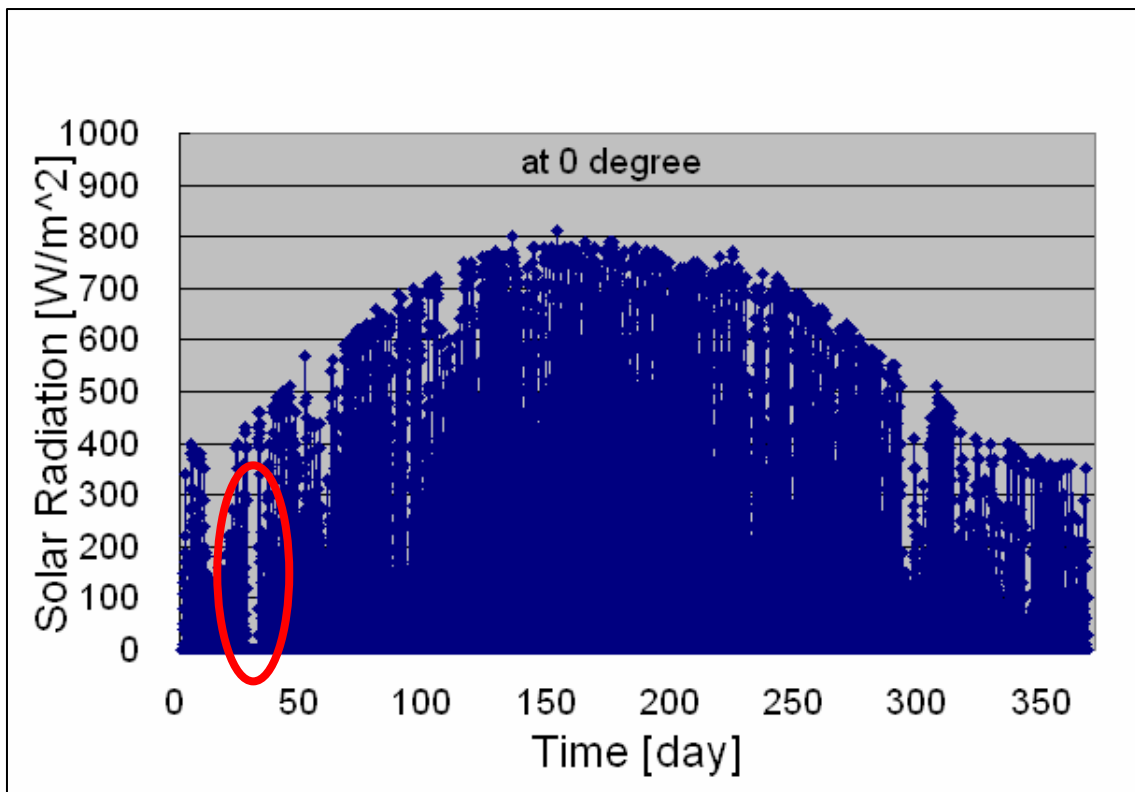


図 5-11 2004 年 1 年間の日射強度(0[deg])

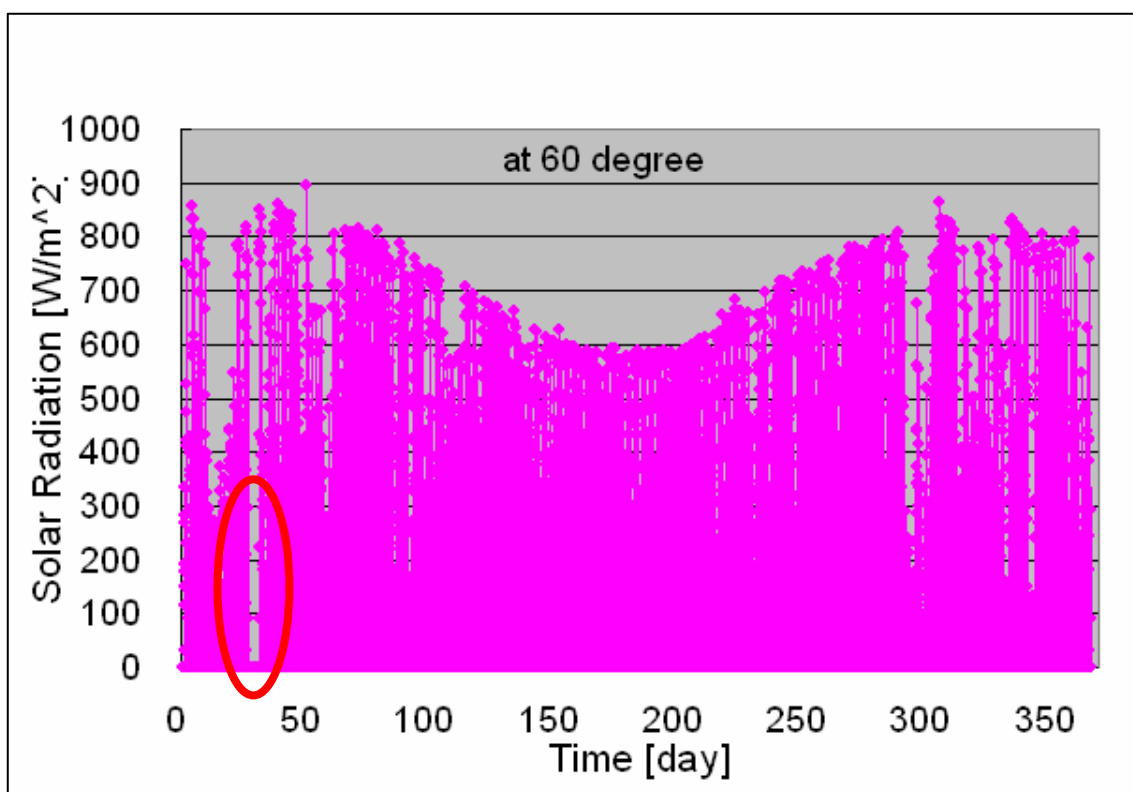


図 5-12 2004 年 1 年間の日射強度(60[deg])

図 5-7,5-9,5-10 から春、秋、冬については 60[deg]に換算した日射強度のほうが大きい値を示している。

元来、冬は日射時間が短く太陽高度も低いので、発電量が小さくなる。これを防ぐために冬至の南中時に太陽と太陽電池パネルが垂直になるよう太陽電池パネルを設置することになった。

$$39.5[\text{deg}](\text{デルタ緯度}) + 23.5[\text{deg}](\text{地軸の傾き}) = 63[\text{deg}]$$

仰角 63[deg]に設置すればもっとも冬に効率がよいわけだが、設置する際の便宜上仰角 60[deg]にした。そのため図 5-7,5-9,5-10 から仰角 60[deg]での日射強度は冬を中心に大きい値を示していることがわかる。それとは対照的に図 5-8 の夏の日射強度は 0[deg]での日射強度は大きいのに、60[deg]での日射強度は小さい値を示していることがわかる。通年の結果(図 5-11,5-12)をみてもその傾向は顕著に表れている。なお、赤く円で囲んだ部分はデータ欠損している。

ここで求めた仰角 60[deg]での日射強度から充電電力を求めていく。

第 4 章で説明したようにチャージコントローラの特性である式(4-1)を用いて 60[deg]に換算した日射強度からバッテリーに入る直前の電力量を求める。

1日毎の例を図 5-13(2004年3月20日)、図 5-14(2004年6月21日)、図 5-15 (2004年9月23日)、図 5-16(2004年12月21日)に示す。また 2004年通年の充電量を図 5-17 に示す。

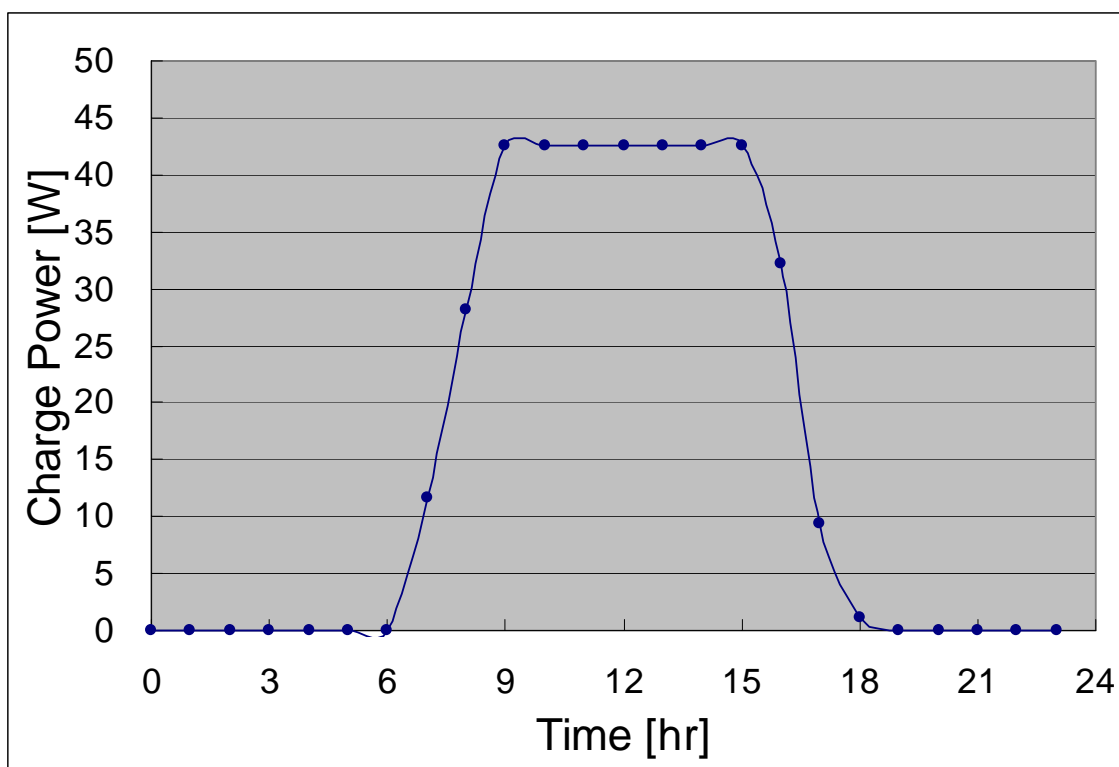


図 5-13 2004/3/20 の充電量

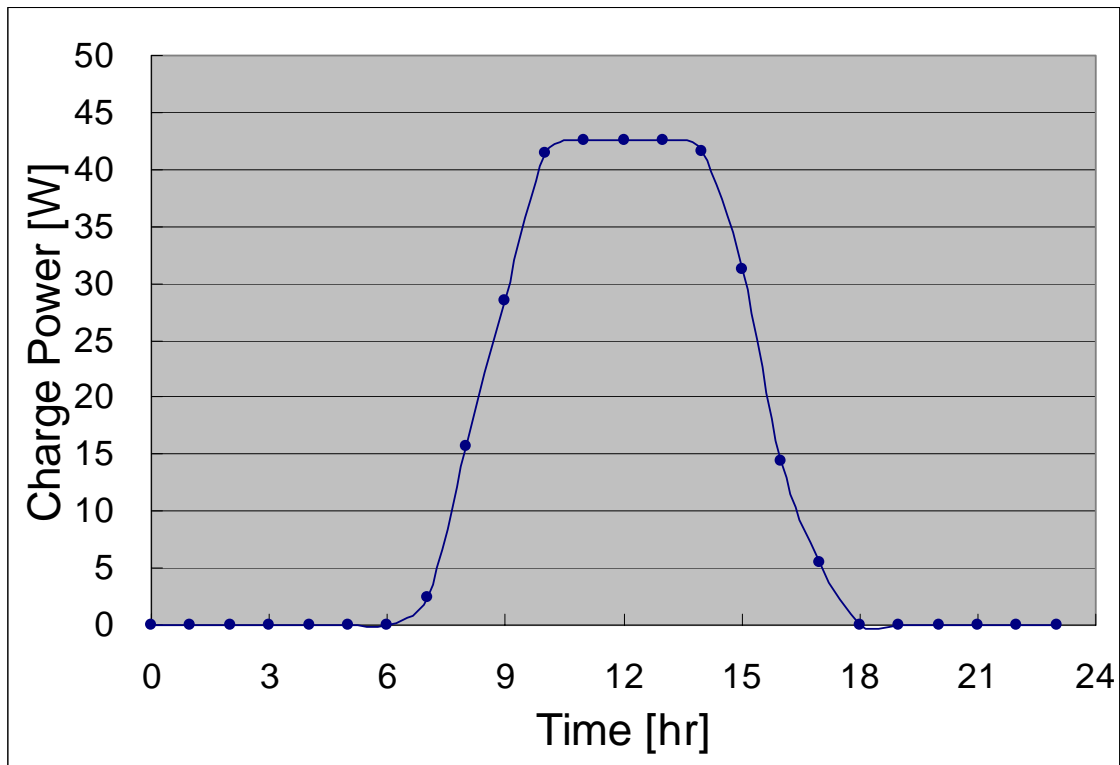


図 5-14 2004/6/21 の充電量

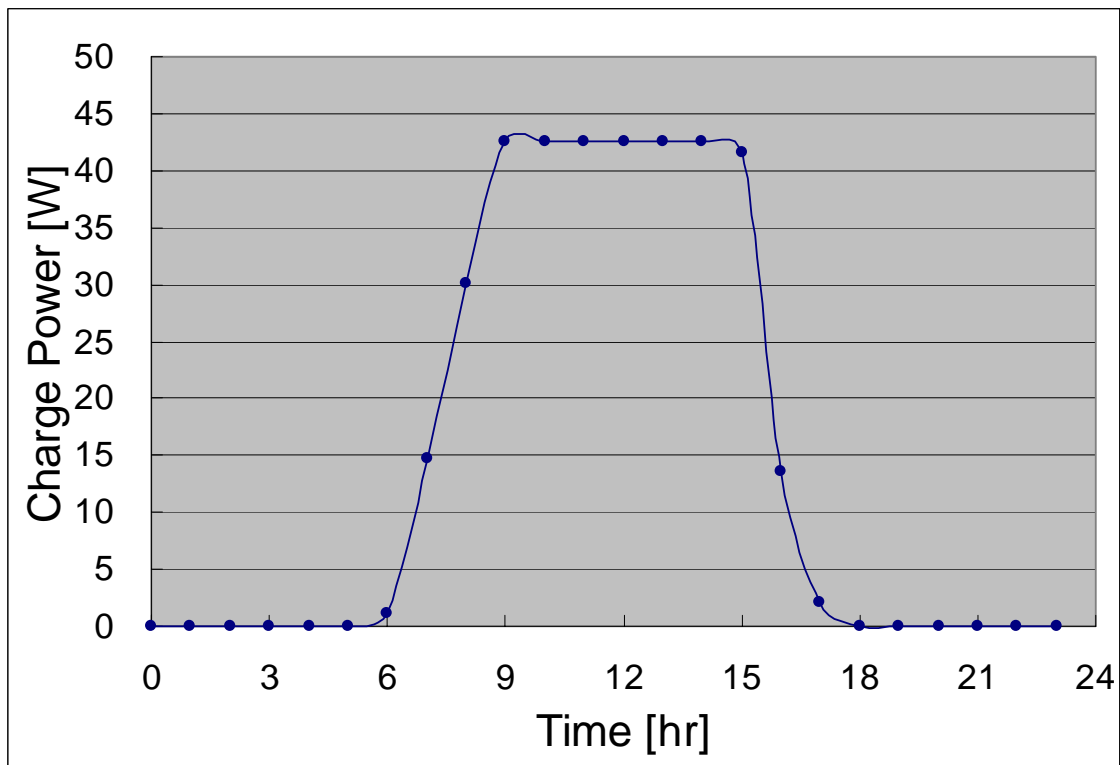


図 5-15 2004/9/23 の充電量

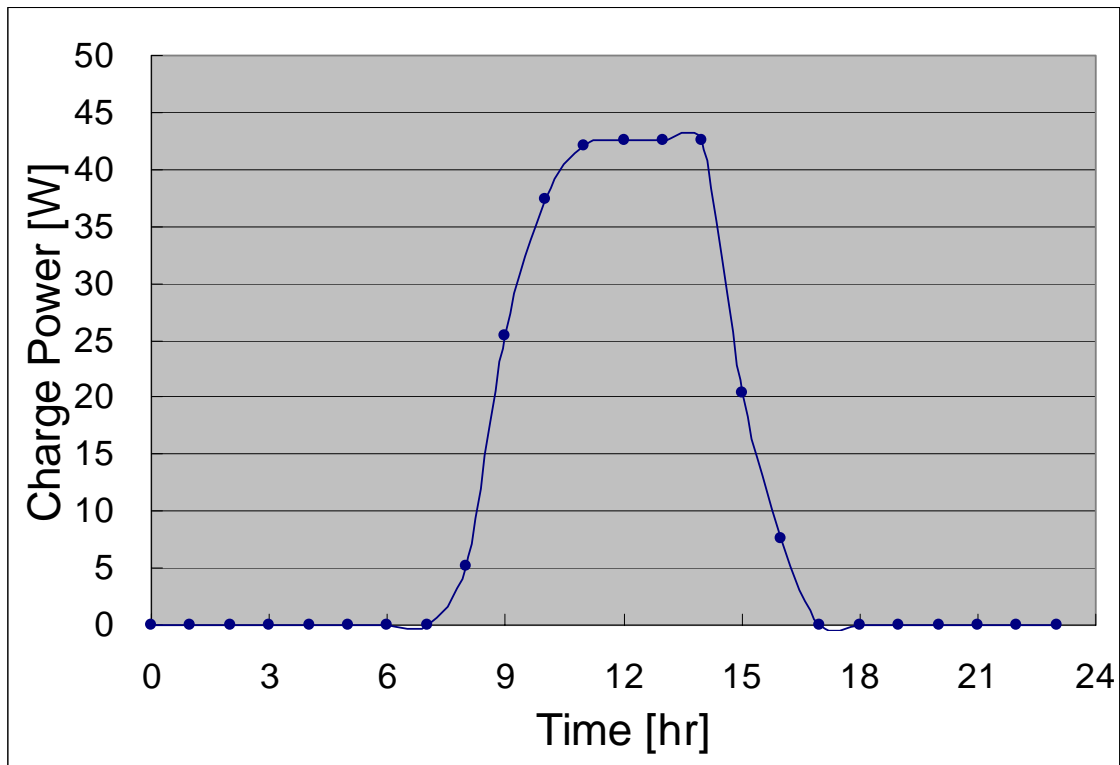


図 5-16 2004/12/21 の充電量

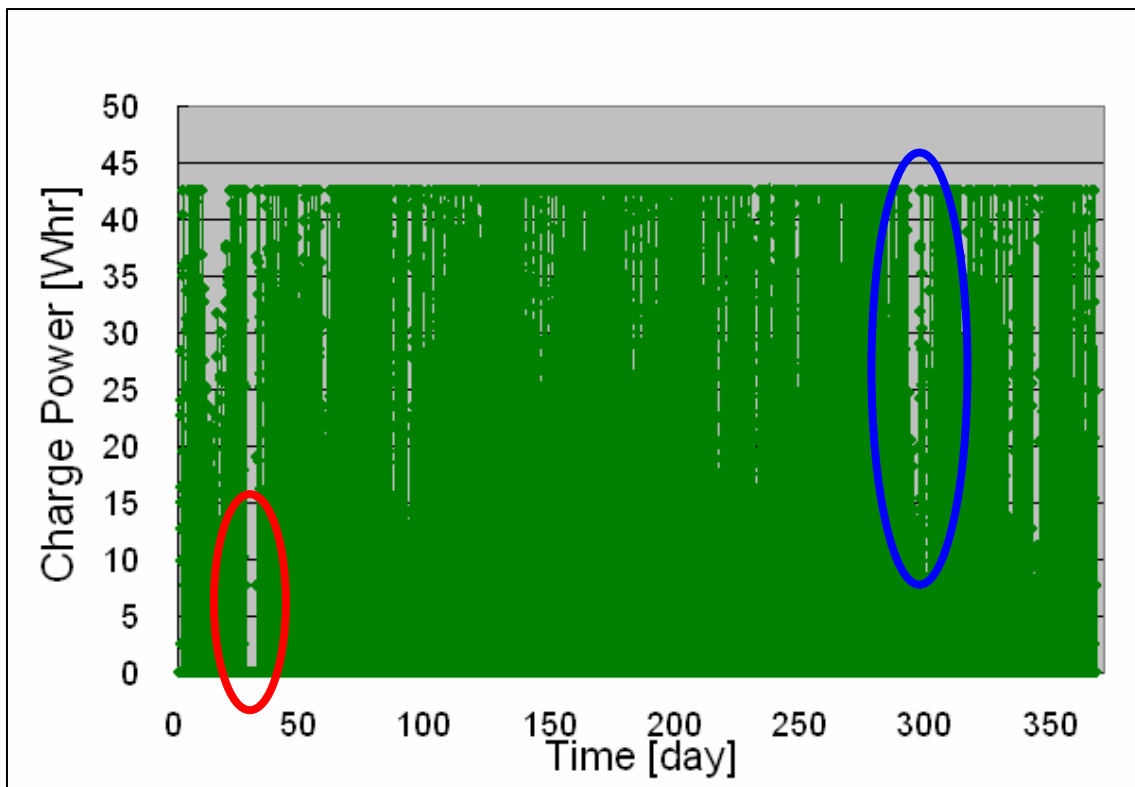


図 5-17 2004 年 1 年間の充電量

図 5-13～5-16 より 1 年間を通して晴れている日であれば 42.5[W]の電力が蓄えられることがわかる。これはチャージコントローラの特性によるもので式(4-1)から算出した結果である。この式は日射強度 500[W/m²]以上のとき充電量は一定値(42.5[W])で横ばいになって、それ以上増加しないというものである。

図 5-17 を検証する。1 年間を通して充電量はほぼ一定であり、安定していることがわかる。ただ、300 日辺り(青円で囲んだ部分)で充電量が低下しているところがある。これは図 5-12 からわかるように日射強度が低下している期間で、それに伴い充電量を低下している結果である。

5-3 バッテリー温度の推定

ここではバッテリー温度の推定した結果について述べる。第 4 章でも述べたように、まずデルタの気象観測施設 CEMP から配信されている 1 時間ごとの気温からクーラーボックス特性を用い、クーラーボックス内温度を推定する。次に、バッテリーは放電時に発熱を生じるため(3-4 参照)クーラーボックス内温度に放電発熱分の温度を加える。このときの温度をバッテリー温度とする。1 日毎の例を図 5-18(2004 年 3 月 20 日)、図 5-19(2004 年 6 月 21 日)、図 5-20(2004 年 9 月 23 日)、図 5-21(2004 年 12 月 21 日)に示す。また 2004 年通年の推定結果を図 5-12 に示す。

なお、本来バッテリー自体に熱容量が存在するがここでは考慮せず、クーラーボックス内温度をそのままバッテリー温度と仮定する。

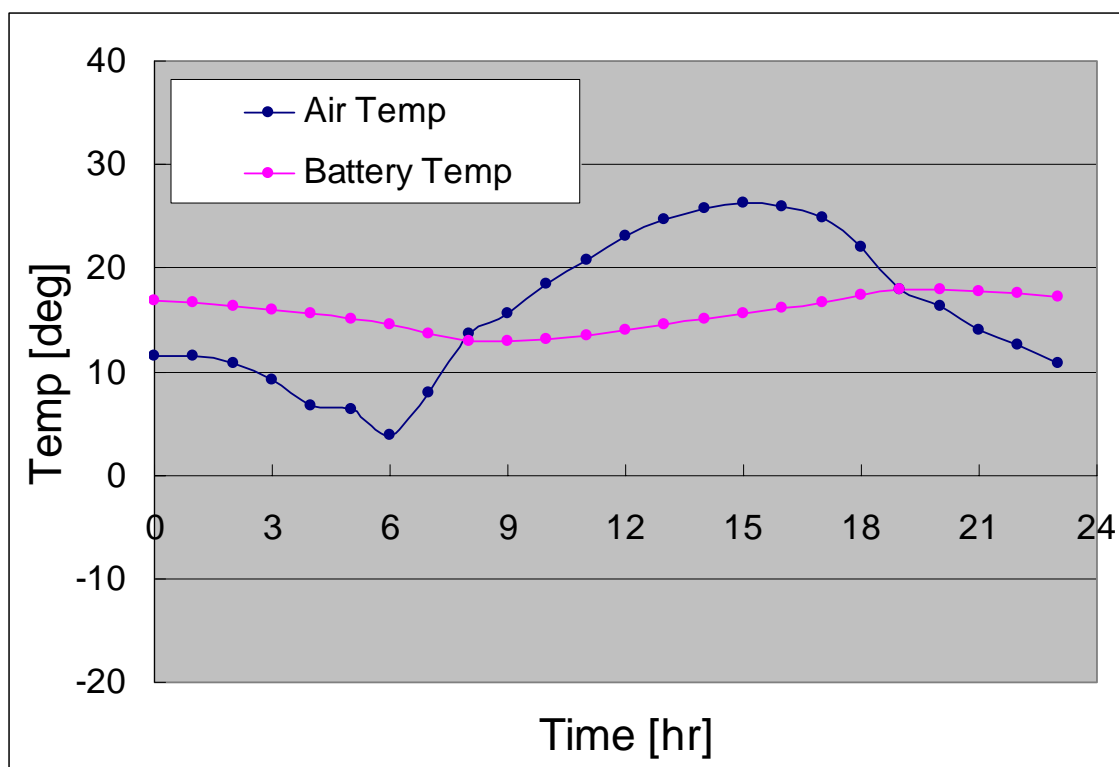


図 5-18 2004/3/20 の外気温とバッテリー温度

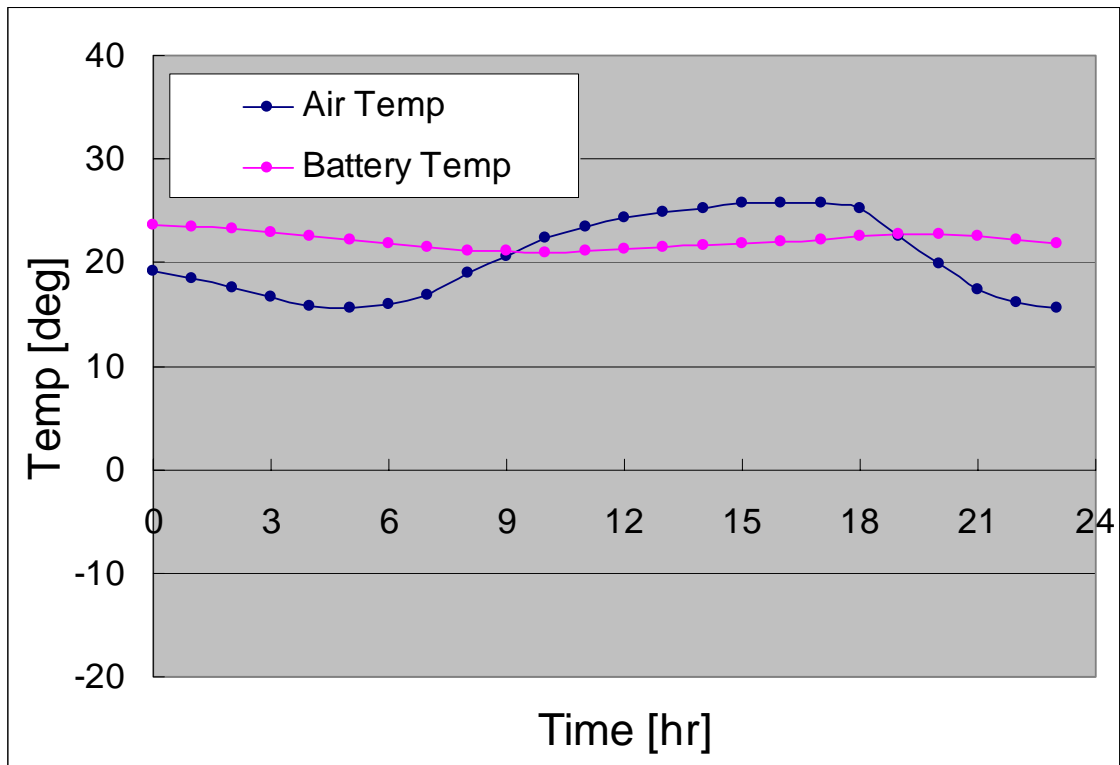


図 5-19 2004/6/21 の外気温とバッテリー温度

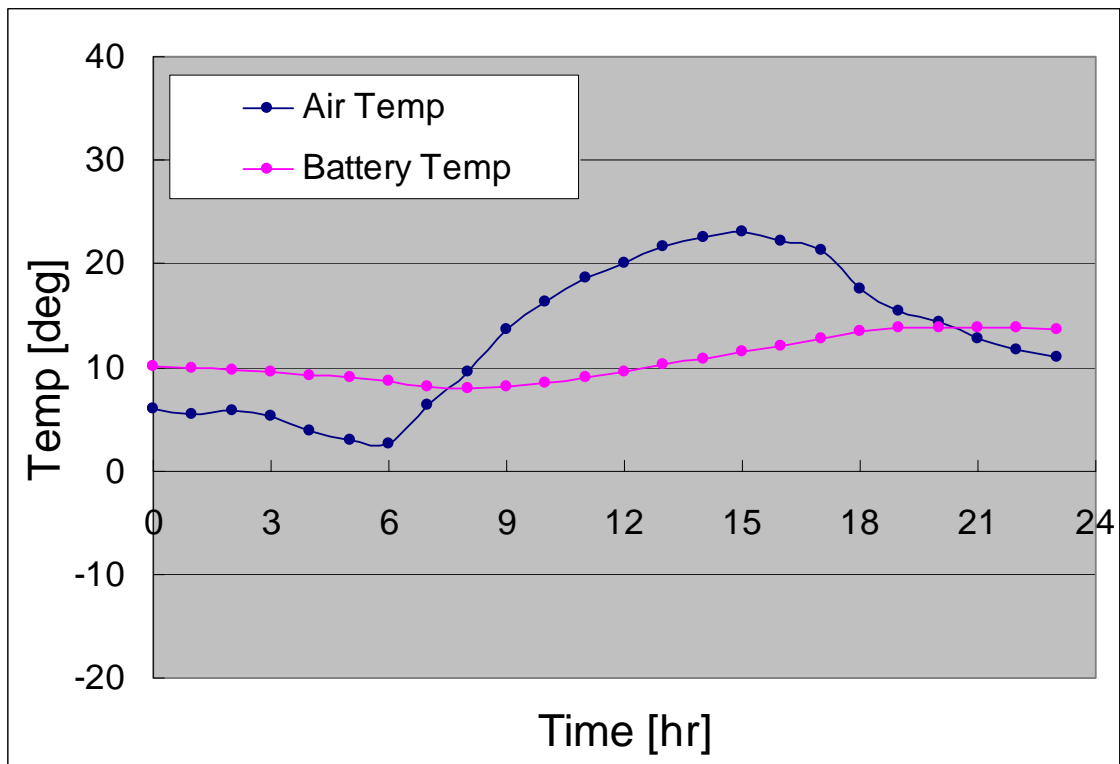


図 5-20 2004/9/23 の外気温とバッテリー温度

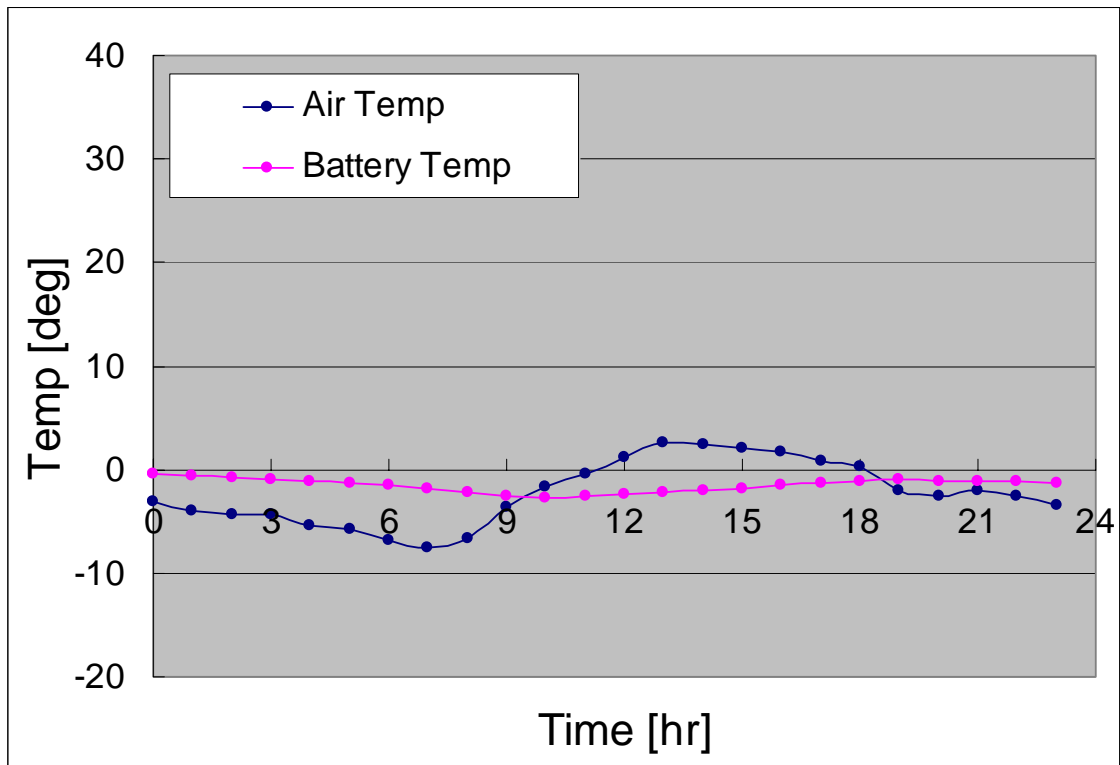


図 5-21 2004/12/21 の外気温とバッテリー温度

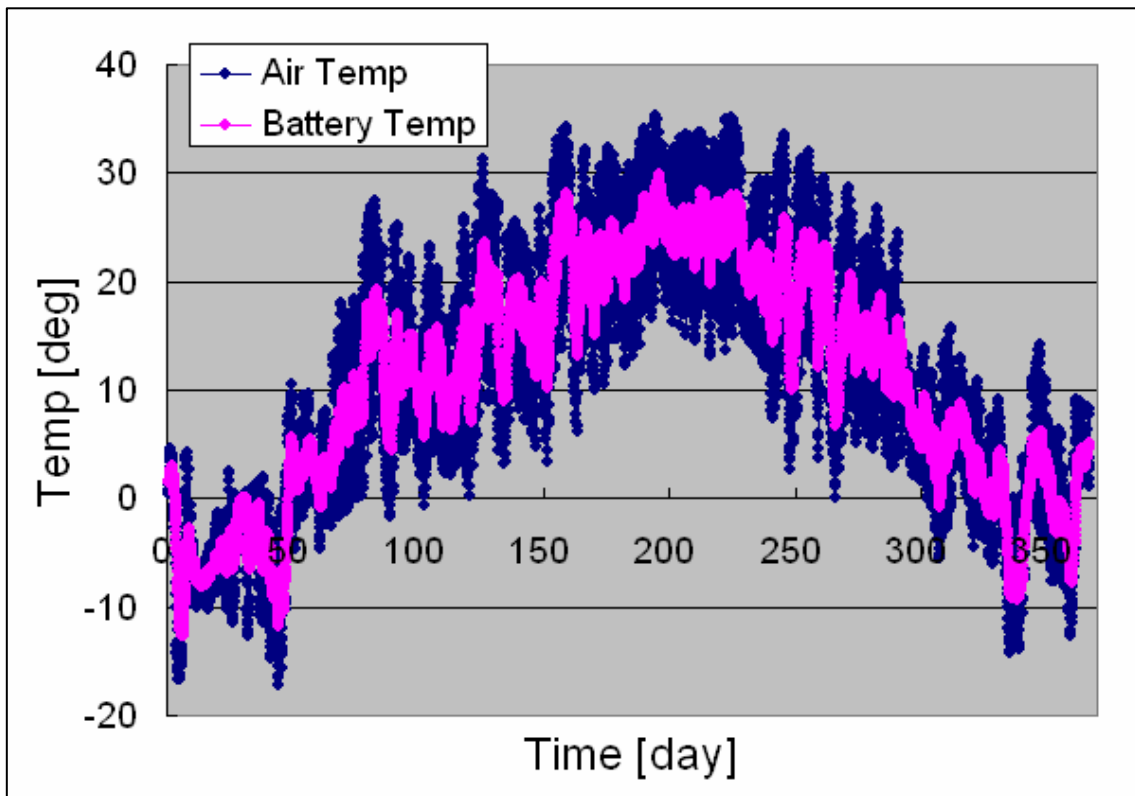


図 5-22 2004 年 1 年間の外気温とバッテリー温度

デルタの冬は最低気温-20[]になることもあるが、それは日の出ていない時間帯であり、日が出れば気温も上昇する。クーラーボックスを使用した目的は日の出ていない時間帯の温度低下を抑えることであるため、図 5-18～5-21 からわかるようにバッテリー温度は外気温に比べ変化が緩やかで、高低差が少ないことからクーラーボックスの効果があったといえる。また、図 5-22 からバッテリー温度は日々の最低気温よりは高い値を示していることがわかる。ここからもクーラーボックスの効果がわかる。

なお、バッテリー放電発熱も考慮しているが外気温変化に比べ、微小な発熱のため顕著な効果が表れていなかった。

5-4 バッテリ残留電力量の推定

実際にバッテリー残留電力量をシミュレートしていく。ここではバッテリー電圧値 11.0[V]、11.2[V]、11.4[V]、11.6[V]、11.8[V]、12.0[V]まで使用した場合のバッテリー残留電力量を求める。

先述したが、もう一度シミュレーション方法について述べる。

シミュレーションは 1 時間ごとに各パラメータを算出する。具体的に、チャージコントローラを経て得た充電量から消費電力を引いた値に充放電効率を掛け、バッテリーに蓄えていく。このときバッテリー満充電容量を超える場合には余った電力は捨てることにする。またバッテリー満充電容量はその時間のバッテリー温度により求めた値を使用する。

1 日毎のバッテリー残留電力量を図 5-23(2004 年 3 月 20 日)、図 5-24(2004 年 6 月 21 日)、図 5-25 (2004 年 9 月 23 日)、図 5-26(2004 年 12 月 21 日)に示す。また 2004 年通年のバッテリー残留電力量を図 5-27,図 5-28 に示す。

以下に 2004 年 3 月 20 日、6 月 21 日、9 月 23 日、12 月 21 日の 4 日間と 2004 年通年のバッテリー残留電力量を記載する。

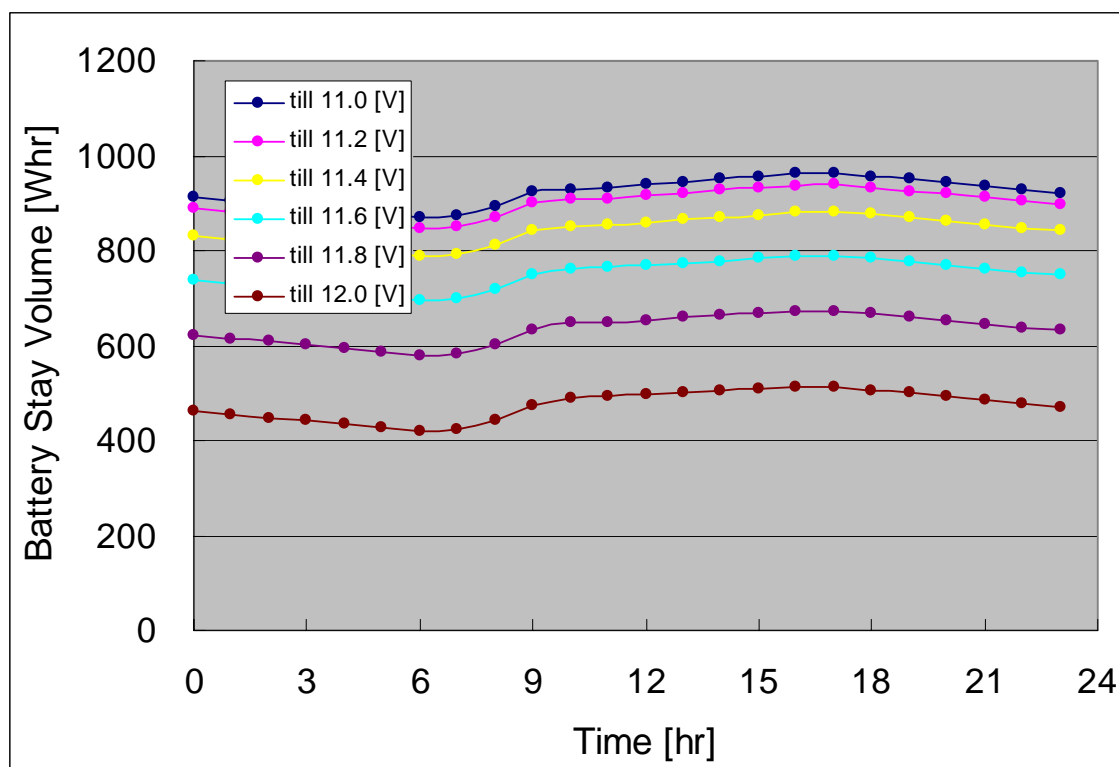


図 5-23 2004/3/20 のバッテリー残留電力量

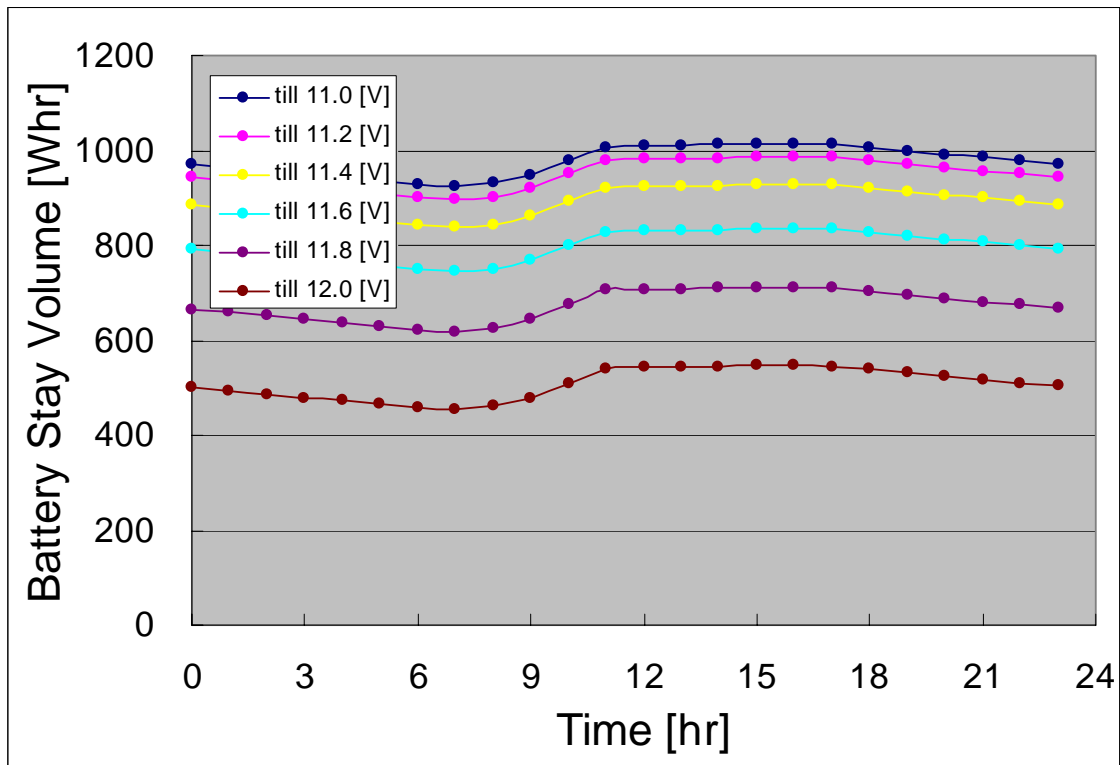


図 5-24 2004/6/21 のバッテリー残留電力量

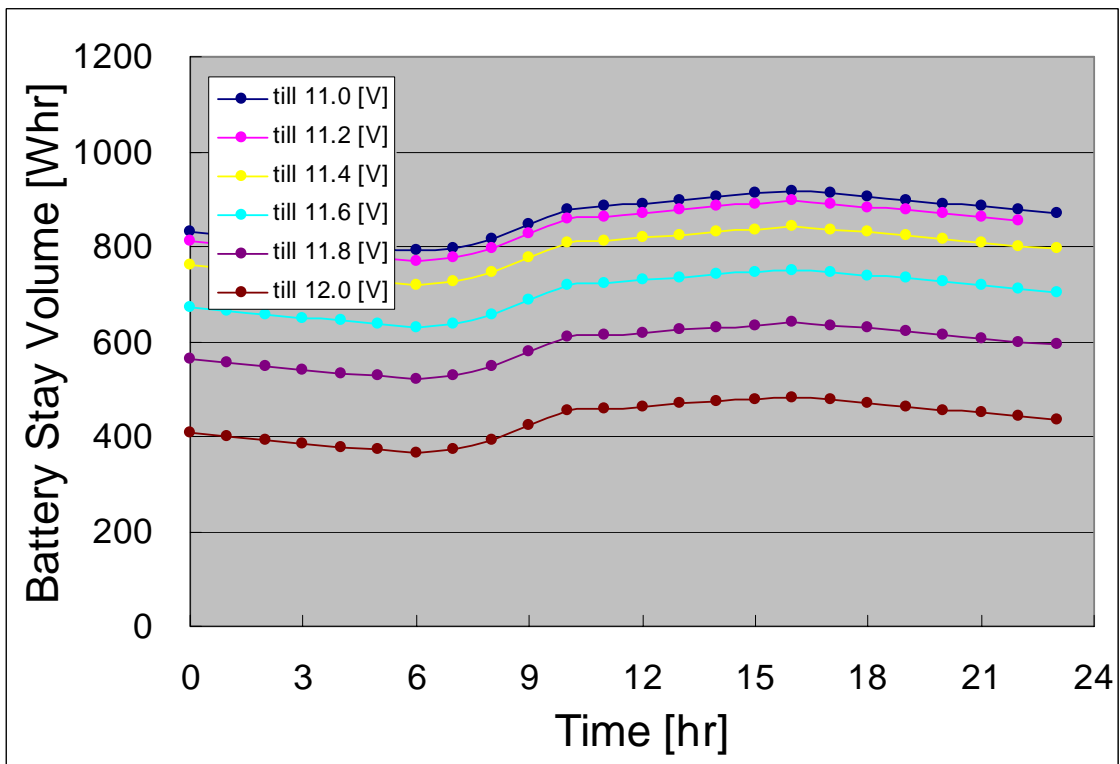


図 5-25 2004/9/23 のバッテリー残留電力量

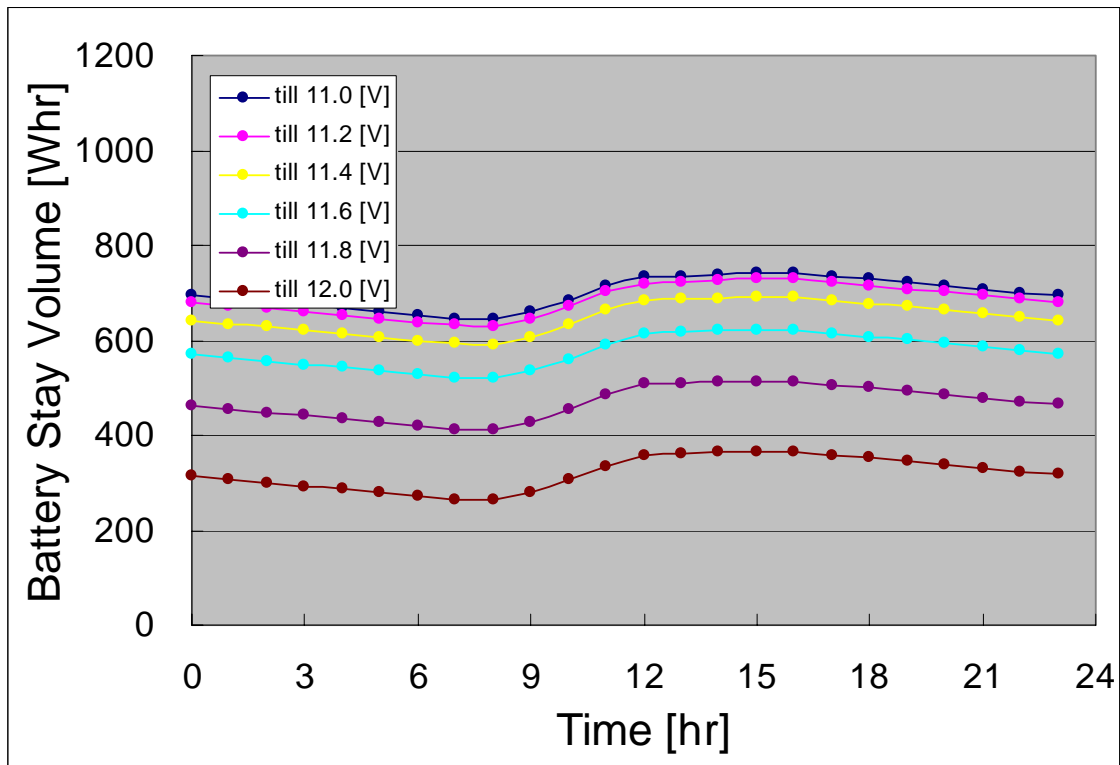


図 5-26 2004/12/21 のバッテリー残留電力量

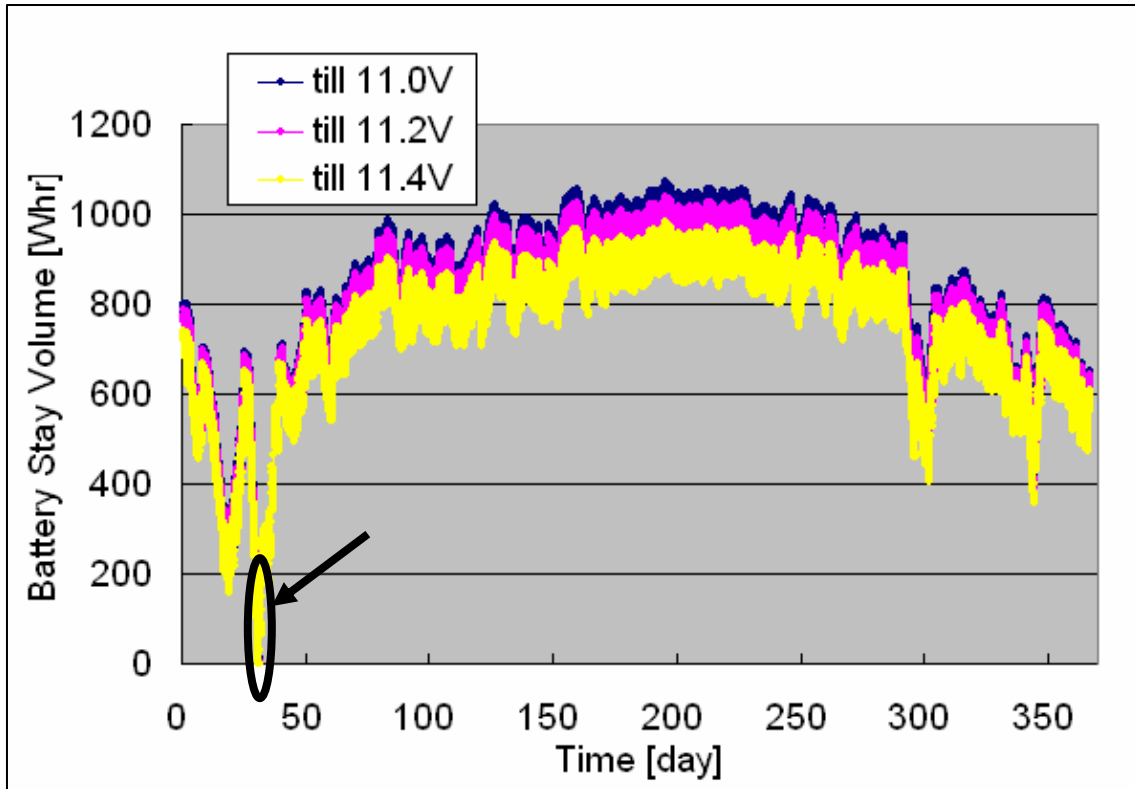


図 5-27 2004 年 1 年間のバッテリー残留電力量(till11.0[V] ~ till11.4[V])

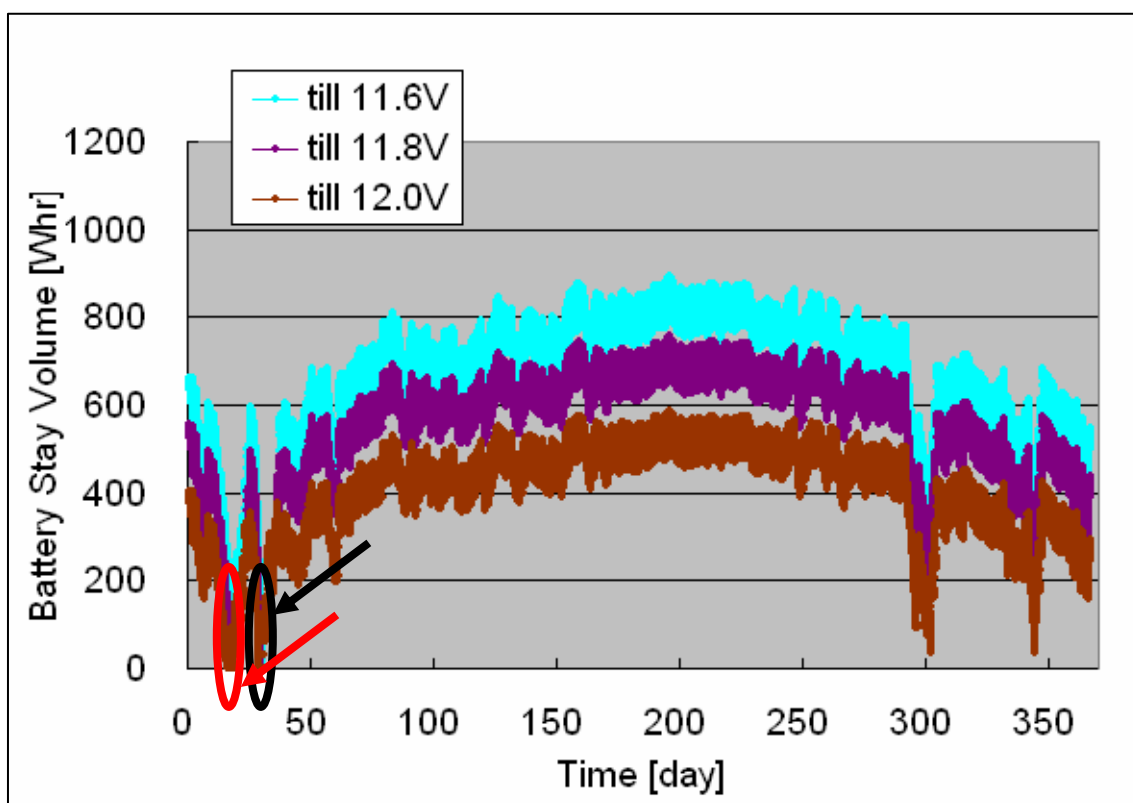


図 5-28 2004 年 1 年間のバッテリー残留電力量(till11.6[V] ~ till12.0[V])

図 5-23 ~ 5-26 から、バッテリー電圧を 11.0[V]まで落とす場合から 11.4[V]まで落とす場合のバッテリー残留電力量の差はあまり無く、それ以降、即ち浅い放電になるに伴い残留電力量に差が出る傾向にあることがわかる。これは第 2 章で述べたバッテリー温度特性の図から明らかであるが同一温度下では浅い放電ほどバッテリー容量に差が生じる。また、低温度下では 11.0[V] まで落とす場合から 11.6[V]まで落とす場合の容量の差は小さくなることも読み取れる。図 5-24 と図 5-26 からその傾向が読み取れる。図 5-24 では 11.0[V] まで落とす場合と 11.6[V]まで落とす場合の残留容量の差はおよそ 200[Whr]に対し、図 5-26 ではおよそ 150[Whr]になっていることがわかる。

図 5-27,5-28 はバッテリー残留電力量を 1 年(2004 年)通して推定したグラフである。

仰角 60[deg]での日射強度を使用して(太陽電池パネルは冬の効率を上げるため仰角 60[deg]に傾けて設置する)バッテリー残留電力量を推定したのにも関わらず、夏の残留電力量が大きい結果になっている。これは夏は気温が高くバッテリー温度も高いためバッテリー満充電容量が大きくなり効率よく充電されているためである。

また、図 5-27,5-28 の は日射強度のデータが欠損しているため、充電量がゼロになりバッテリー残留電力量が低下した結果である。 以外に残留電力量がゼロになったのは 2004 年では の期間のみである。 では 11.8[V] まで落とす場合と 12.0[V]まで落とす場合で残留

電力量がゼロになった。このとき地表検出器への電力供給はストップされ、ある一定の電力量が蓄えられるまで復帰できない状態になる。本研究では復帰条件を検討することも目的であるためそれらについては後述する。

次に地表検出器の稼働停止回数を検討する。

5-5 稼働停止回数

ここでは2004年、2005年、2006年の年間を通して検出器が停止する回数を検討する。本シミュレーションでは落とすことが可能なバッテリー電圧値を11.0[V]、11.2[V]、11.4[V]、11.6[V]、11.8[V]、12.0[V]とし、各々の電圧値までのバッテリー残留電力量を求めている。このため各々の電圧値までのバッテリー残留電力量がゼロになった回数が、検出器の停止する回数に相当する。

まず、復帰条件(停止した検出器が再び立ち上がる条件)を考慮せず、バッテリー残留電力量がゼロ以上であれば稼働すると仮定する。この時の検出器の停止する回数を算出する。

なお、ここで使用した日射強度データおよび気温データはデルタ气象台から配信されているものであり、欠損している期間がある。以下の表5-1に日射強度データおよび気温データの欠損日時を記載する。

表 5-1

2004年	1/27 13:00 ~ 1/31 11:00
2005年	なし
2006年	3/9 18:00 ~ 3/14 19:00

日射強度の欠損期間は充電量が算出できないため、ここでは欠損期間の検出器停止は考慮しないものとする。

以下の表5-2に検出器の停止回数を記載する。

表 5-2

		2004年	2005年	2006年
停止回数	till 11.0[V]	0回	0回	0回
	till 11.2[V]	0回	0回	0回
	till 11.4[V]	0回	0回	0回
	till 11.6[V]	0回	0回	0回
	till 11.8[V]	1回	1回	2回
	till 12.0[V]	4回	2回	3回

表 5-2 は、バッテリー電圧値 11.0[V]、11.2[V]、11.4[V]、11.6[V]、11.8[V]、12.0[V]まで使用した場合の各々の電圧値までのバッテリー残留電力量がゼロになったとき、検出器は停止すると定義した。この結果から 11.8[V]以上の電圧で電力供給をストップするとしたときには少なくとも 1 年に 1 回は検出器が停止することがわかった。このことから電力供給をストップさせるバッテリー電圧は 11.6[V]以下であることが望まれる。

また、5-4 バッテリー残留電力量の推定の図 5-23～5-26 でも記述したように 11.6[V]以上で電力供給をストップさせる場合は 11.4[V]以下まで落としたときと比べて、バッテリーに蓄えられる電力量に大きな差が生じる。このことから電力供給をストップさせるバッテリー電圧は 11.4[V]以下であることが好ましい。

なお、ハード制御でバッテリー電圧が 11.0[V]以下になった場合には電力供給が強制的にストップし、検出器が停止することになっているため、ソフト制御では 11.0[V]以上 11.4[V]以下の電圧値で電力供給をストップさせることが良いと思われる。

実際にデルタに設置される検出器の消費電力は第 1 章で記述したとおり 5.18[W]である。今回バッテリー残留電力量をシミュレートするにあたって、多く見積もって 7[W]消費として進めてきた。しかし、今後検出器に改良が加えられ消費電力が増加する可能性もある。そこで、消費 10[W]として 2004 年の 1 年間をシミュレートする。ここでは、バッテリー電圧値 11.2[V] まで使用した場合のバッテリー残留電力量を求め、バッテリー残留電力量がゼロになった回数を検出器の停止する回数とする。

結果、2004 年では 40 回停止することが確認された。なお、7[W]消費では 1 度も停止しなかった(表 5-2 参照)。

40 回の停止時間をヒストグラムで表すと以下ようになる。

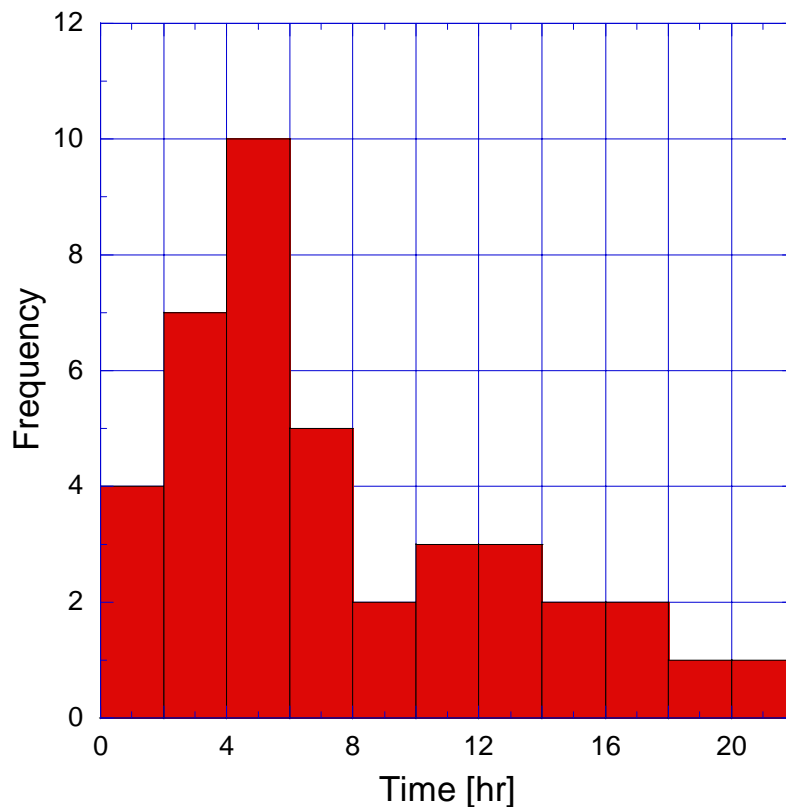


図 5-29 停止時間の頻度

図 5-29 から最も多い停止時間は 4～6 時間であった。日が落ちて消費のみの状態になってから徐々にバッテリー残留電力量が減っていき、真夜中に残留電力量がゼロになり、日の出までの 4～6 時間検出器が停止していることを意味している。

やはり、気温が低い冬場の日の出していない時間帯に停止することが多い。これは気温の低下に伴いバッテリー容量が減少した結果であると考えられる。また、稀に日中に停止することがある。これは天気が悪く日射強度が不安定な日であることが予想される。

2004 年の 7[W]消費でのシミュレーションでは 11.2[V]まで使用したときに検出器は 1 度も停止しなかった。しかし、10[W]消費では 40 回検出器が停止する結果となった。

5-6 復帰条件

次に一旦検出器が止まってしまった場合の復帰する条件について検討する。

5-5 稼働停止回数では復帰条件を考慮せず、バッテリー残留電力量がゼロ以上であれば稼働すると仮定していた。しかし実際にはある一定のバッテリー電圧値になってから復帰させることになっている。これは復帰してもまたすぐに停止するのでは安定した観測ができなくなるので、ある程度バッテリーに電力を蓄えてから復帰させ検出器の停止回数を減らすためである。

ここでは日射が無くても稼働し続けていられるだけの電力量を1日分と2日分について検討する。

1日分の消費電力量	消費電力 7[W] × 24[hr]=168[Whr]
2日分の消費電力量	消費電力 7[W] × 48[hr]=336[Whr]

丸1日間日射が無くても稼働し続けていられる電力量は168[Whr]、丸2日では336[Whr]である。この2パターンで検出器が停止する回数と停止している時間についてシミュレートする。

シミュレーション方法は、落とすことが可能なバッテリー電圧値を11.0[V]、11.2[V]、11.4[V]、11.6[V]、11.8[V]、12.0[V]とし、各々の電圧値までのバッテリー残留電力量を求める。各々の電圧値までのバッテリー残留電力量がゼロになった回数およびゼロになっている時間が、検出器の停止する回数および停止している時間に相当する。検出器が停止している期間は消費せず、充電のみ行われる。1日分の電力量168[Whr]と2日分の電力量336[Whr]が蓄えられたら復帰となる。

以下に2004年、2005年、2006年の年間を通して検出器が停止する回数および停止している時間を示す。

表 5-3 1 日分の電力量が蓄えられてから復帰

		2004 年	2005 年	2006 年
停止回数 (停止時間)	till 11.0[V]	0 回	0 回	0 回
	till 11.2[V]	0 回	0 回	0 回
	till 11.4[V]	0 回	0 回	0 回
	till 11.6[V]	0 回	0 回	0 回
	till 11.8[V]	1 回 (34hr)	1 回 (7hr)	1 回 (33hr)
	till 12.0[V]	1 回 (106hr)	1 回 (42hr)	1 回 (68hr)

表 5-4 2 日分の電力量が蓄えられてから復帰

		2004 年	2005 年	2006 年
停止回数 (停止時間)	till 11.0[V]	0 回	0 回	0 回
	till 11.2[V]	0 回	0 回	0 回
	till 11.4[V]	0 回	0 回	0 回
	till 11.6[V]	0 回	0 回	0 回
	till 11.8[V]	1 回 (126hr)	1 回 (77hr)	1 回 (83hr)
	till 12.0[V]	1 回 (201hr)	1 回 (112hr)	1 回 (118hr)

表 5-3,5-4 はそれぞれ丸 1 日間、丸 2 日間日射がなくても稼働し続けていられる電力量が蓄えられてから検出器が復帰する場合の停止回数と停止時間を表したものである。

5-5 稼働停止回数で述べたが、11.0[V]以上 11.4[V]以下の電圧値で電力供給をストップさせることが好ましいとわかった。表 5-3,5-4 でも 11.4[V]以下の電圧値では 3 年間で 1 度も検出器が停止していないことから、11.0[V]以上 11.4[V]以下の電圧値で復帰条件を検討することは難しい。そこで 11.8[V]まで落とす場合と 12.0[V]まで落とす場合について注目してみる。2004 年、2005 年、2006 年のそれぞれの年で 1 日分の電力量が蓄えられる場合と 2 日分の電力量が蓄えられる場合で停止回数は同じであるにも関わらず、停止時間は 2 日分の電力量が蓄えられる場合の方が長い。このことから 1 日分の電力量が蓄えられてから復帰させる方が効率が良いことがわかる。

よって本シミュレーションでは丸 1 日間日射がなくても稼働し続けていられる電力量 (168[Whr])が蓄えられてから検出器を復帰させることにする。

次に、1日分の電力量が蓄えられたときのバッテリー電圧を検討する。

実際に検出器が再び稼働し始める判定をするときには、バッテリー電圧によって判断するため、蓄えられた電力量からバッテリー電圧を推定することが必要になる。

先にも述べたが、11.0[V]以上 11.4[V]以下の電圧値で電力供給をストップさせることが好ましいことがわかった。ここでは例として 11.2[V]と 11.4[V]から 1日分の電力量(168[Whr])が蓄えられたときのバッテリー電圧を推定する。

まず、過去の実験で満充電時のバッテリーから消費させていき、消費電力量に対するバッテリー電圧値をバッテリー温度別に測定したデータを図 5-30 に示す。

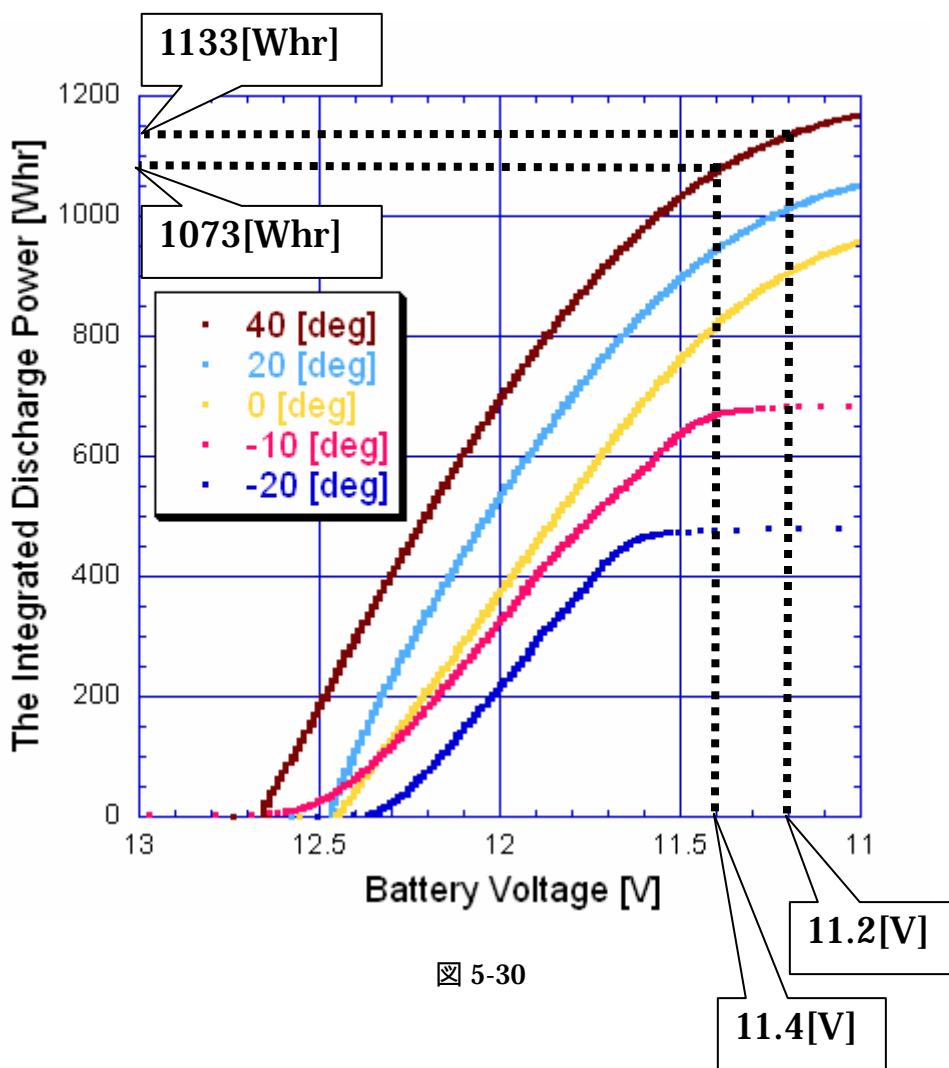


図 5-30

図 5-30 は横軸をバッテリー電圧、縦軸を消費電力量(取り出せた電力量)としたグラフである。各バッテリー温度でバッテリー電圧が低下するに伴い、取り出せた電力量が増加していくことがわかる。

図 5-30 からバッテリー残留電力量に対するバッテリー電圧を推定していく。

バッテリー温度 40[]を例に説明していく。まず、満充電のバッテリーを消費させバッテリー電圧を 11.4[V]まで落としたとき、図 5-30 から消費電力量の総量は約 1073[Whr]であることがわかる。また、そのままバッテリー電圧を 11.2[V]まで落としたとき、消費電力量の総量は約 1133[Whr]であることがわかる。ここでバッテリー温度 40[]では、11.4[V]から満充電状態までに蓄えられる電力量は 1073[Whr]、11.2[V]から満充電状態までに蓄えられる電力量は 1133[Whr]であるといえる。

次に 11.2[V]まで落とす場合と 11.4[V]まで落とす場合を分けて考える。まず、11.2[V]まで落とす場合には、11.2[V]から満充電時までの各電圧値において、1133[Whr]からその電圧値まで落とすために消費した電力量を引く。これが 11.2[V]から満充電時までの各電圧値におけるバッテリー残留電力量であることがいえる。11.4[V]まで落とす場合も同様に、11.4[V]から満充電時までの各電圧値において、1073[Whr]からその電圧値まで落とすために消費した電力量を引き、バッテリー残留電力量を求める。

これにより 11.2[V]からのバッテリー残留電力量と 11.4[V]からの残留電力量が算出できる。

以下にバッテリー温度別にみた 11.2[V]からのバッテリー残留電力量と 11.4[V]からの残留電力量を示す(図 5-31,5-32)。

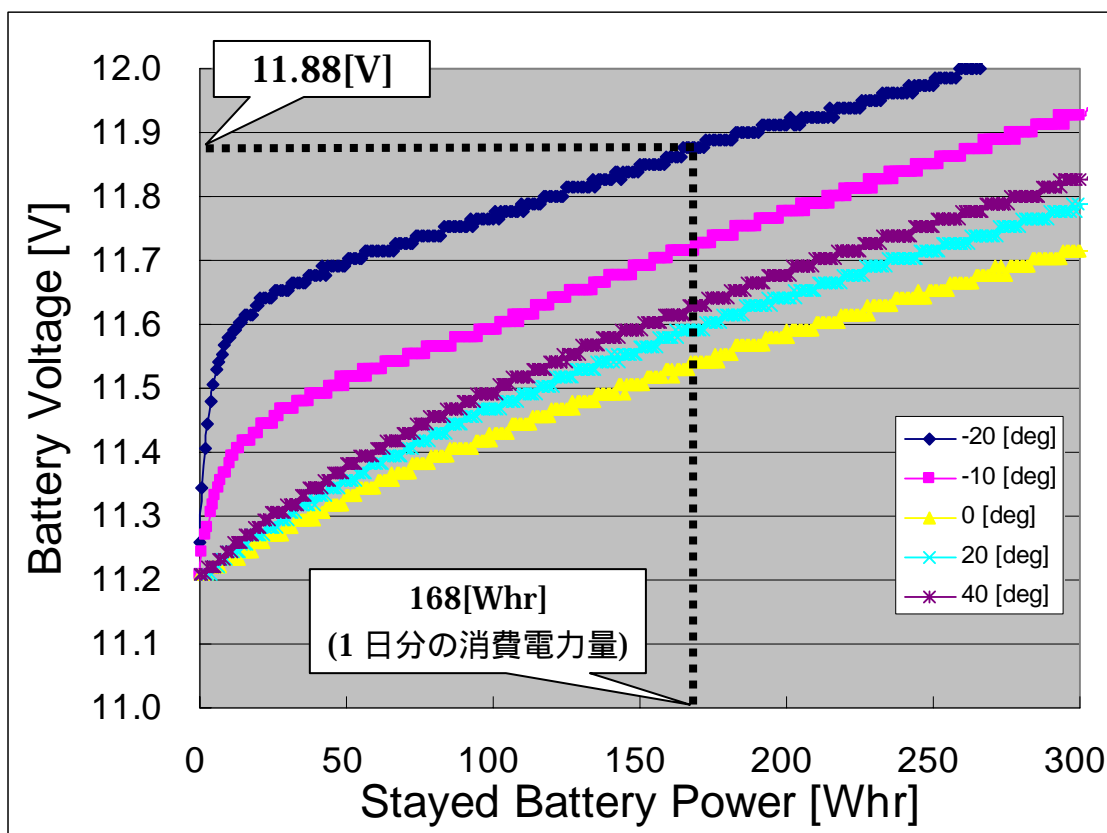


図 5-31 11.2[V]からのバッテリー残留電力量

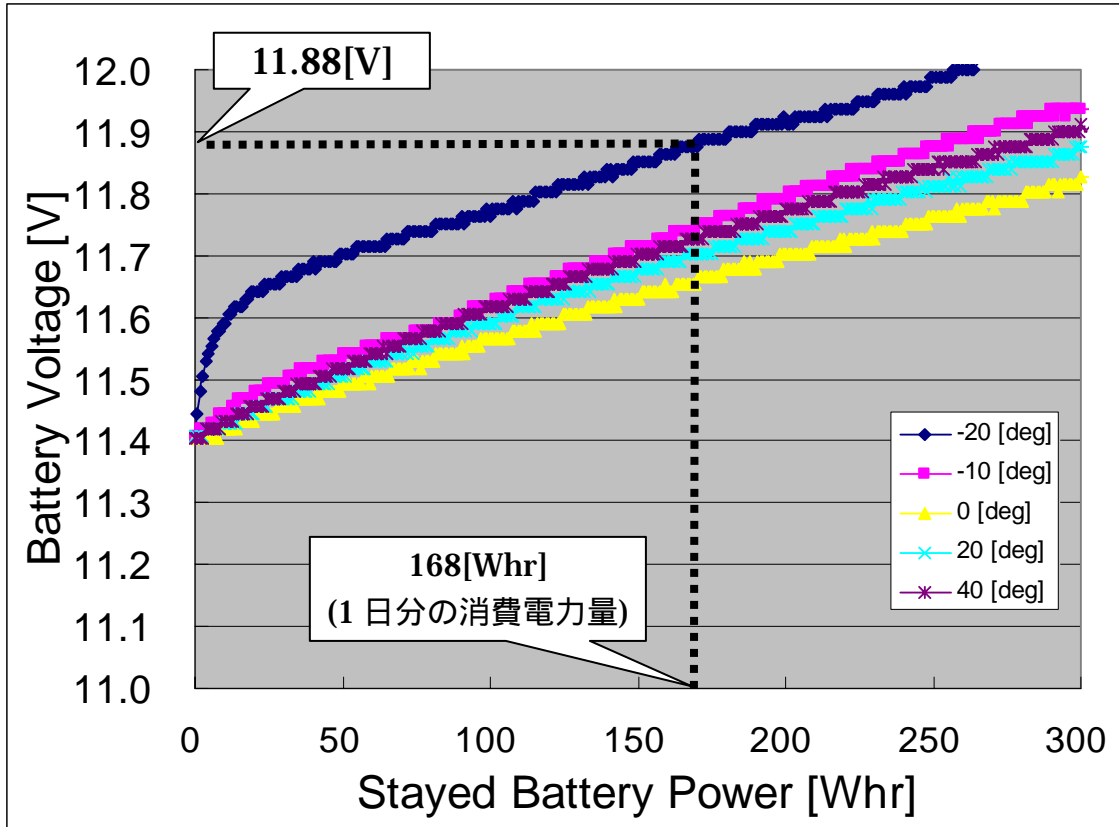


図 5-32 11.4[V]からのバッテリー残留電力量

図 5-31,5-32 はバッテリー温度別に求められたグラフであるため、最も効率の悪いバッテリー温度-20[]で検証する。

図 5-31,5-32 から丸1日間日射がなくても稼働し続けていられる電力量(168[Whr])が蓄えられた状態でのバッテリー電圧値をみる。結果、11.2[V]から蓄えた場合(図 5-30)と 11.4[V]から蓄えた場合(図 5-31) のバッテリー電圧値は同じ 11.88[V]となった。これにより丸1日間日射がなくても稼働し続けていられる電力量(168[Whr])が蓄えられている状態のバッテリー電圧は約 11.9[V]といえる。

これらにより、丸1日間日射がなくても稼働し続けていられる電力量(168[Whr])が蓄えられてから検出器を復帰させることにし、復帰条件は1年通して同一設定する場合、バッテリー電圧 11.9[V]とすることが望ましい。また、復帰条件を冬とそれ以外の季節で別けるとすると、冬は 11.9[V]、それ以外の季節では 11.75[V]にしても可能であることがわかった。

第6章 結果及び考察

実際に TA 計画で使用される太陽電池パネル、チャージコントローラ、バッテリー、クーラーボックスの性能を検証し、現地の過去3年間(2004年、2005年、2006年)の日射強度、外気温のデータでバッテリー残留電力量をシミュレートした結果、以下のことがわかった。

バッテリー電圧値 11.0[V]、11.2[V]、11.4[V]、11.6[V]、11.8[V]、12.0[V]まで使用した場合のバッテリー残留電力量をそれぞれシミュレートした結果、3年間を通して一度も検出器が停止しなかったのは 11.0[V]、11.2[V]、11.4[V]、11.6[V]であった。

バッテリー電圧値が 11.6[V]以上と 11.4[V]以下ではバッテリーに蓄えられる電力量に大きな差が生じるため 11.4[V]以下まで落とすほうが良い。

加えて、ハードで強制的に停止するのは 11.0[V]であるため、11.0[V]より高く 11.4[V]以下の電圧値でソフトにより検出器を停止することが望ましいと確認された。

一旦検出器が停止してから復帰させる条件を、1日間日射がなくても稼働し続けられる電力量が蓄えられてから復帰させる場合と2日間日射がなくても稼働し続けられる電力量が蓄えられてから復帰させる場合で比較した結果、停止回数は変わらず停止時間は2日分蓄えるほうが長かった。

よって、1日間日射がなくても稼働し続けられる電力量(168[Whr])が蓄えられてから検出器を復帰させることにする。

電力量 168[Whr]が蓄えられたときのバッテリー電圧値は 11.9[V]以上であることが明らかになったため、復帰条件は1年を通して同一設定する場合、バッテリー電圧 11.9[V]とすることが望ましい。また、復帰条件を冬とそれ以外の季節で別けるとすると、冬は 11.9[V]、それ以外の季節では 11.75[V]にしても可能であることがわかった。

参考文献

山梨大学大学院医学工学総合教育部（修士課程）機械システム工学専攻

修士論文 「宇宙線実験への太陽光発電利用についての研究」 神戸貴雄

山梨大学工学部機械システム工学部機械システム工学科

卒業論文 「バッテリー耐久試験システムについて」 大石泰也

謝辞

本研究を進めるにあたり、様々なご指導、ご鞭撻を頂いた本田教授、石井助教授に深く感謝の意を表します。また、本田研究室の皆様にも感謝の意を述べたいと思います。有難うございました。