

第三章 バッテリ

3.1 バッテリ設計概要

鳳龍式号機のバッテリーは衛星全体で使用するメインバッテリーと、衛星分離直後に行うアンテナ展開専用のバッテリーがある。そのどちらも単三サイズの円筒形ニッケル水素電池を使用している。以下に電池の緒言を示す。この電池は自己放電量が小さく、低温での性能低下が小さい、そして比較的安全（ニッケル水素であるため）に使用することができるため、この電池を選定した。

表 3.1-1 搭載電池（単セル）概要

Table 3.1-1 Specification of battery

バッテリータイプ	Ni-MH
電圧	1.2
容量	1900 mAh
保証サイクル数	1800
自己放電量	約 10% (1 年)
サイズ	H50.4 × φ 14.35 mm
重量	27 g

メインバッテリーはセルを 3 直 3 並列に、アンテナ展開用バッテリーは単セルで構成している。これら 10 本のセルを 1 つにまとめ、ヒーター、温度センサ用、熱電対（熱真空試験用）を取り付け、バッテリーパックを作製した。熱電対は FM 熱真空試験後、取りはずさず、配線を切り、衛星に接地する。図 3.1-1 にバッテリーパックの概要を示す。バッテリーの電極と配線は溶接しており、溶接は熟練した技術を持つ業者の方に依頼した。図中のラムダゲルは、熱伝導率の良いシリコン系ゲルである。このゲルはヒーターの熱を全体に効率良く伝え、かつ振動・衝撃の緩衝材としての役割を担う。また、ポリミドテープはセルの固定と絶縁のために用いた。これらの物を 1 つにまとめるために、最後に熱収縮チューブで固定した。

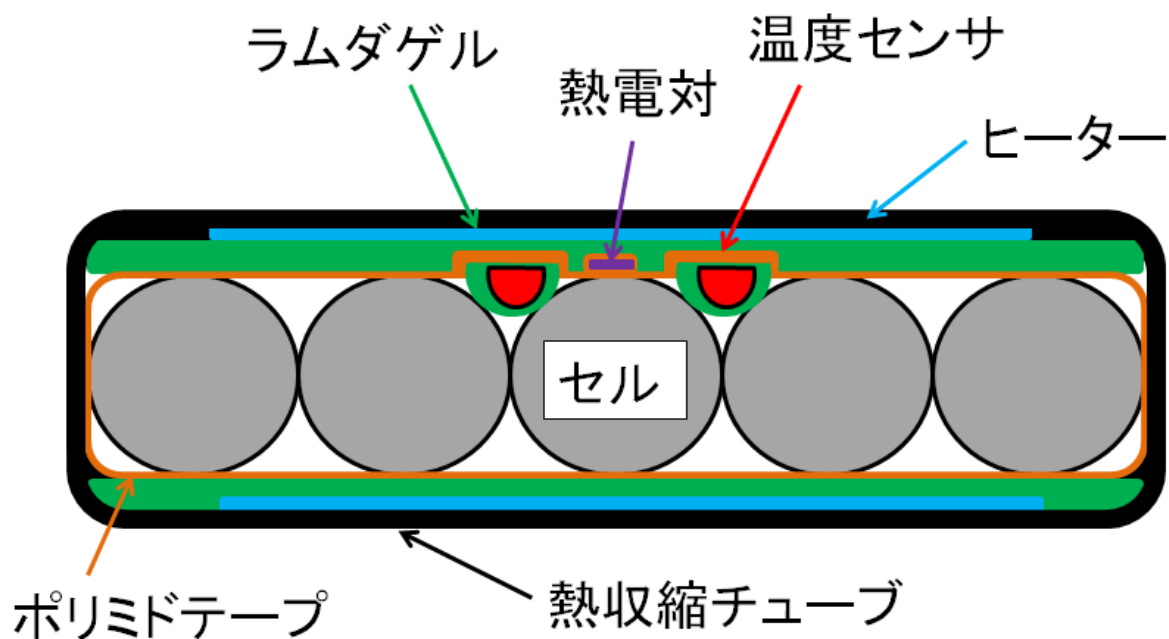


図 3.1-1 バッテリーパック概要図

Fig. 3.1-1 Battery Overview

以下にバッテリーパック作製手順を示す。図 3.1-2 にパック作製前の電池状態を示す。



図 3.1-2 バッテリーパック作成前状態

Fig. 3.1-2 Unprocessed battery

図 3.1-3 の様に、バッテリー溶接部分のシャープエッジをカプトンテープで覆う。



図 3.1-3 シャープエッジ処理

Fig. 3.1-3 Covered sharp edge

図 3.1-4 の様に、電極露出部をすべてカプトンテープで覆い絶縁する。



図 3.1-4 電極の絶縁

Fig. 3.1-4 Insulating of plate

以下の図 3.1-5 の様に温度センサ、熱電対を配置する。温度センサの下には衝撃対策として厚さ 1mm のλゲル (12×16 mm) を敷く。熱電対は先端にカプトンテープを貼り絶縁する。



図 3.1-5 温度センサ、熱電対の配置 (パック表面)
Fig. 3.1-5 Layout of temperature sensor and thermocouple (top)



図 3.1-6 熱電対の配置 (パック裏面)
Fig. 3.1-6 Layout of temperature sensor (bottom)

図 3.1-7 の様に熱電対、温度センサと一緒にカプトンテープでバッテリーを1周巻き、バッテリーとハーネスを固定する。



図 3.1-7 セルの固定
Fig. 3.1-7 Fixing of battery

図 3.1-8 の様に、温度センサ・熱電対のハーネスをカプトンテープで固定する。



図 3.1-8 ハーネスの固定
Fig. 3.1-8 Fixing of wire

図 3.1-9 の様にバッテリー表面の凹凸を無くし、ヒーターによる熱の伝わりを均一にするために厚さ 1mm のラムダゲル (45×140 mm) を両面に敷く。バッテリーからはみ出したゲルはカットし、バッテリーのサイズに合わせる。

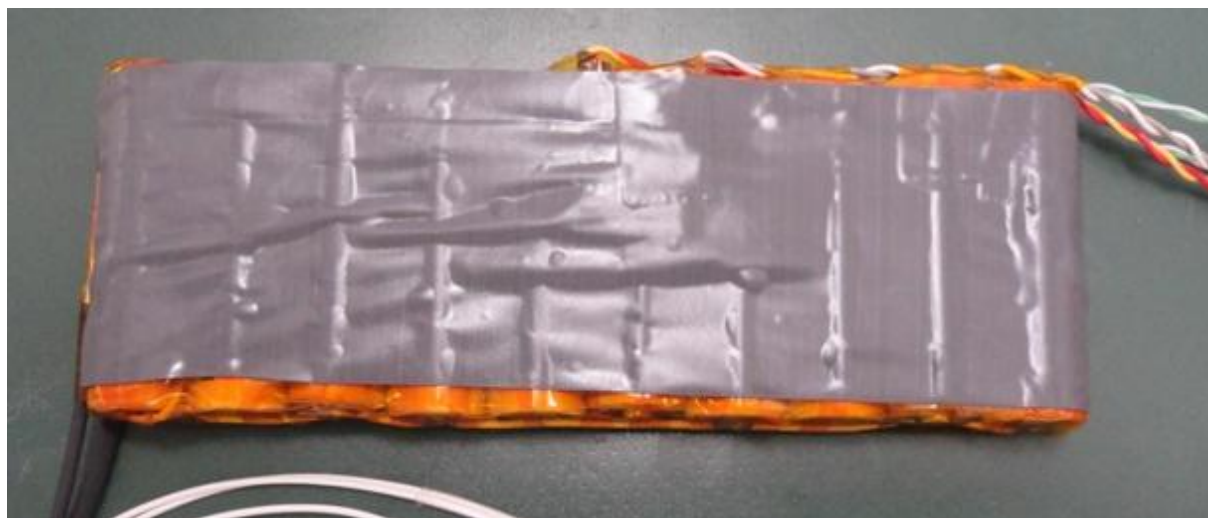


図 3.1-9 ラムダゲルの貼り付け
Fig. 3.1-9 Attach a λ gel on battery

図 3.1-10 の様にシートヒータを敷く。バッテリーの両面に敷く。



図 3.1-10 シートヒータの設置

Fig. 3.1-10 Attach a heater on battery

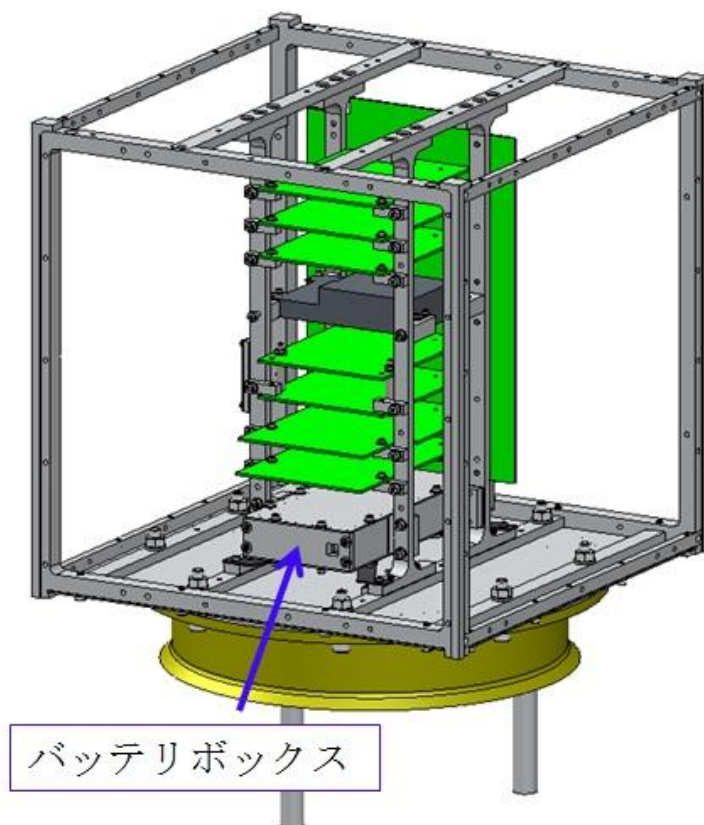
図 3.1-11 の様に熱収縮チューブ（長さ 144 mm）を被せ、ヒートガンで徐々に加熱し、熱収縮チューブを収縮させ、図 3.1-11 の様にする。



図 3.1-11 バッテリパック完成写真

Fig. 3.1-11 Completed product

上記バッテリーパックは図 3.1-12 に示す、バッテリー BOX 内に収める。図 3.1-13 に示すように、バッテリー BOX 内部はガラスエポキシで断熱し、温度変化が小さくなるようにした。さらに、バッテリー BOX にはラムダゲルを緩衝材としてバッテリー上下面に敷いた。バッテリー BOX の固定は図 3.1-13 に示すように、衛星支柱とバッテリー BOX の接触面に 1mm のガラスエポキシを挟み断熱している。



バッテリーボックス

図 3.1-12 バッテリー BOX 位置
Fig. 3.1-12 Layout of battery box

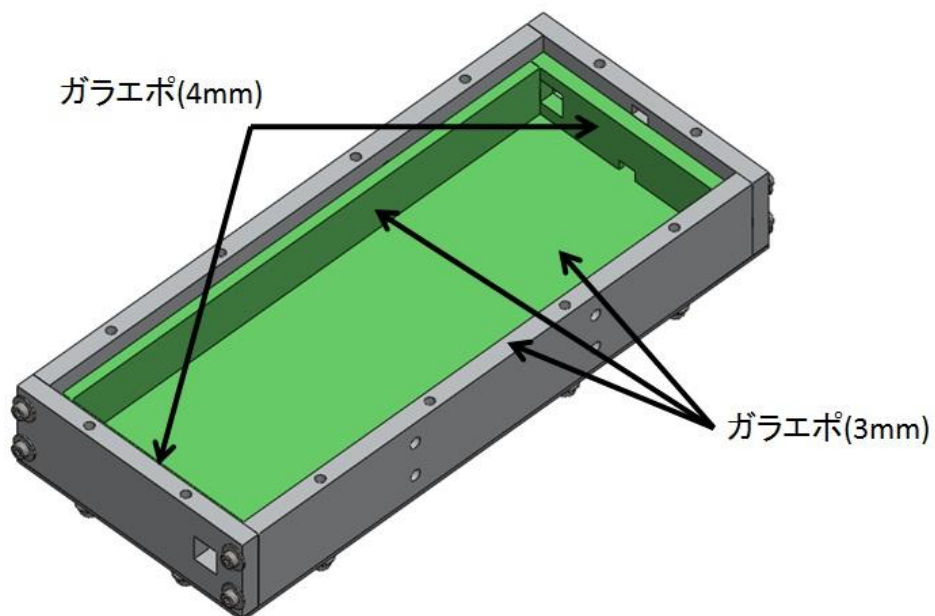


図 3.1-13 バッテリー BOX 内部
Fig. 3.1-13 Inside of battery box

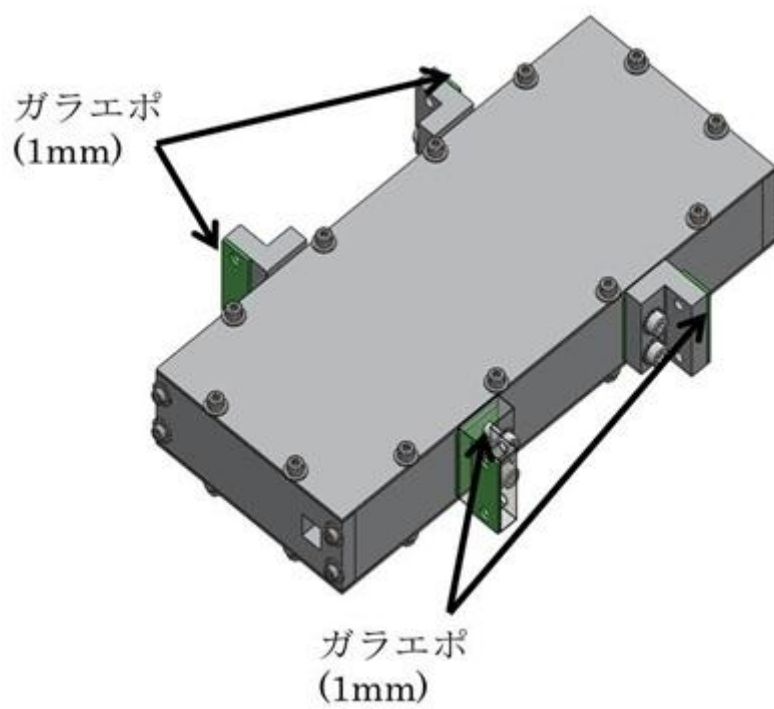


図 3.1-14 バッテリー BOX の固定具
Fig. 3.1-14 Holding fixture of battery box

3.2 セルの選定

電池の特性は1つ1つ異なるため、組み合わせて使用する場合は、一般的に個体差を小さくした方が良い。そのため、メインバッテリーの電池選定の際に、不良セルの排除も兼ねて、単セル性能のばらつきを調べ、組み合わせるセルの個体差を小さくした。ここで評価した項目は、自己放電量、充放電特性、容量である。充放電特性は試験の簡略化のために、内部インピーダンスを計測し、判断した。以下に詳細を述べる。

セルの選定は以下の手順で行った。まず、購入時の電池残量を①で調べ、次にセルを満充電にし、完全放電させ容量を計測した。そして再度、セルを満充電状態にし、内部インピーダンスを計測した。セルは68本用意し、その中から30本(3パック分)を選定した。

選定手順

- ①セルの完全放電（自己放電量計測）
- ②セルの満充電
- ③セルの完全放電（容量計測）
- ④セルの満充電
- ⑤内部インピーダンス測定

(i) セルの自己放電量と容量

ここでは上記手順①～④、セルの自己放電量と容量について述べる。セルの充電には付属の充電器を使用し、放電は放電器(図 3.2-1, 2)を製作し、使用した。放電器はPICでセル電圧を監視し、 1.5Ω 抵抗で電力を消費させ、セル電圧1.05Vまで放電させる。このとき抵抗が発熱するため空冷が必要である。容量は「セル電圧 $\div 1.5\Omega \times$ 時間」で求めた(PICでセル電圧と放電時間を計測している)。ここでは、それほど精度を必要としていないため、抵抗の温度特性やMOSFETの電力損失分は無視した。

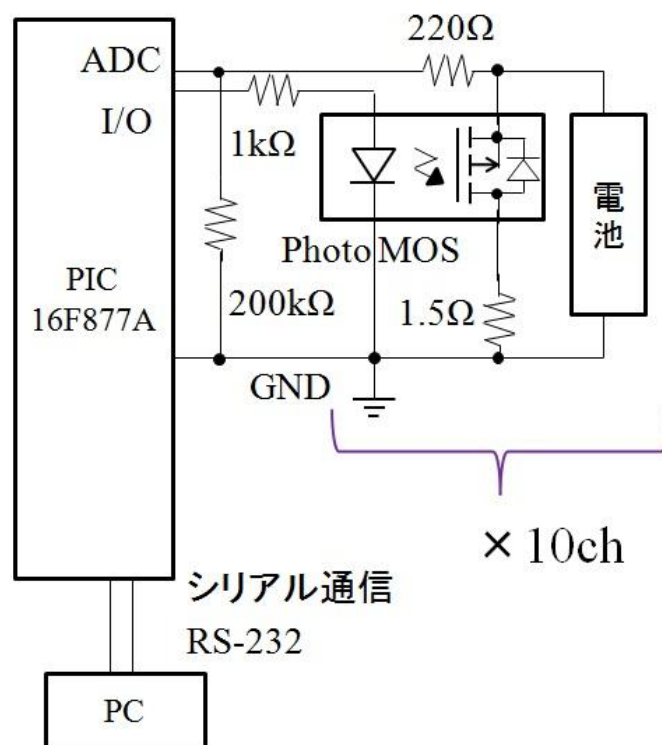


図 3.2-1 放電器回路図

Fig. 3.2-1 Discharger circuit

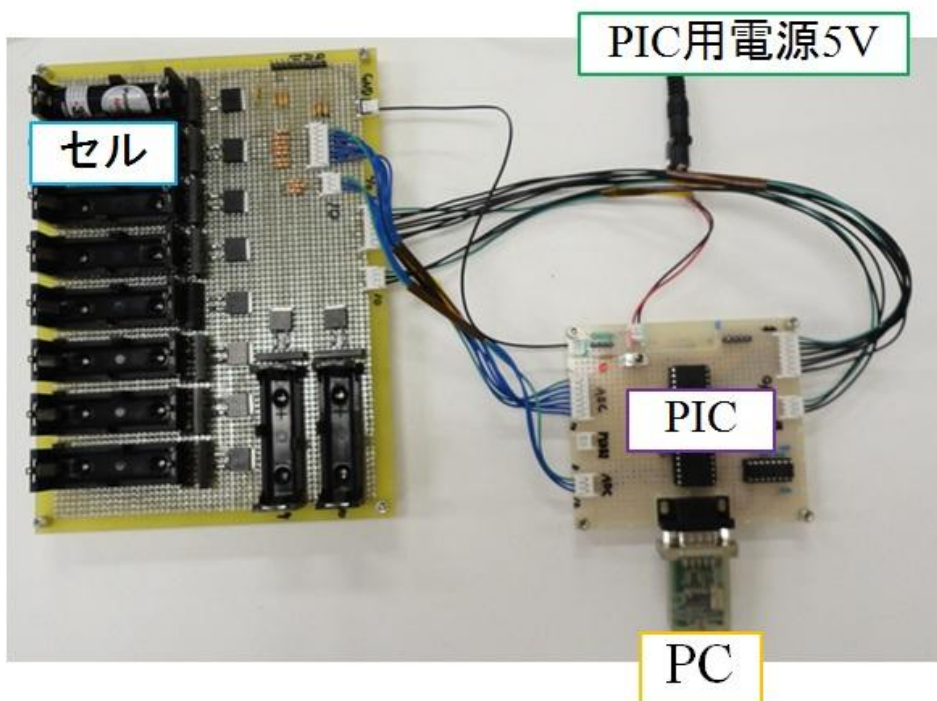


図 3.2-2 放電器

Fig. 3.2-2 Discharger

手順①～④で得られた、セルの自己放電量と容量について以下に述べる。セルの自己放電量は購入時のパッケージに記載されている製造月毎に異なる結果となった。製造月から4カ月のセル(28本)の自己放電量は全て8~10%の範囲、製造月から5カ月のセル(28本)は14~17%の範囲、のまた、製造月から6カ月のセル(14本)の自己放電量は19~22%の範囲に収まり、自己放電量に関してあきらかに個体差が大きいセルはなかった。次に2回目の完全放電時の容量を比較し、選定を行った。セル容量は、67本が97~102%、1本が87%という結果になり、87%のセルを除外した。

(ii) セルの内部インピーダンス

セルの内部インピーダンス計測は、セルの充放電特性を揃えるために実施した。充放電特性を揃えることで、セルを組み合わせた時に充放電のムラを小さくできる。図3.2-3に測定回路を示す。電池電圧の測定はデジタルマルチメーター、電流検出用の1Ω抵抗両端電圧はテスターで計測した。負荷電流は0.1[A]と0.7[A]の2ケース行った。試験手順を以下に示す。

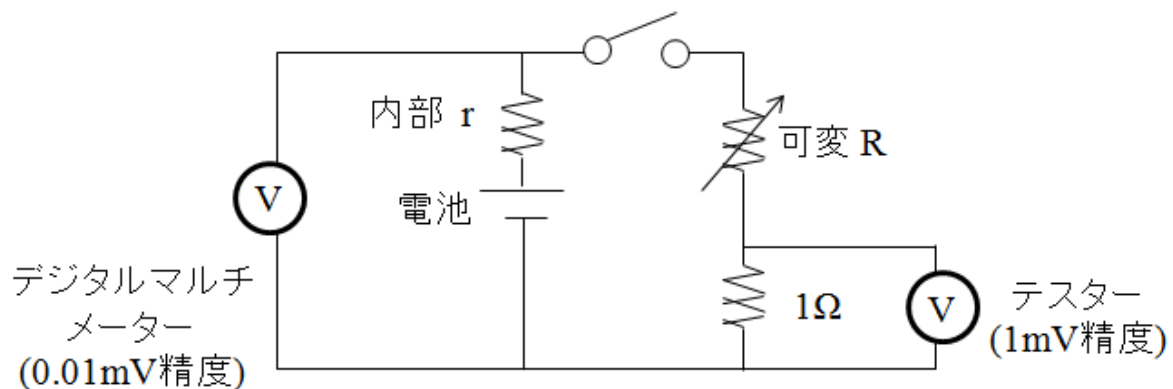


図 3.2-3 内部インピーダンス測定回路

Fig. 3.2-3 Internal resistance measurement circuit of battery

測定手順

- ① 電池の開放電圧をデジタルマルチメーターで測定する
- ② SW を ON し、0.1A を流し、1 秒後の電池電圧を計測する
- ③ 測定後 SW を OFF にし、5 分間放置する
- ④ SW を ON し、0.7A を流し、1 秒後の電池電圧を計測する
- ⑤ 測定後 SW を OFF にする

以下に測定結果を示す。測定した内部インピーダンスは最大 13mΩ 異なった。パッ

ク化するセルは、41~44mΩのものを使用し、フライト用の電池パックは全て 41mΩのセルを使用した。

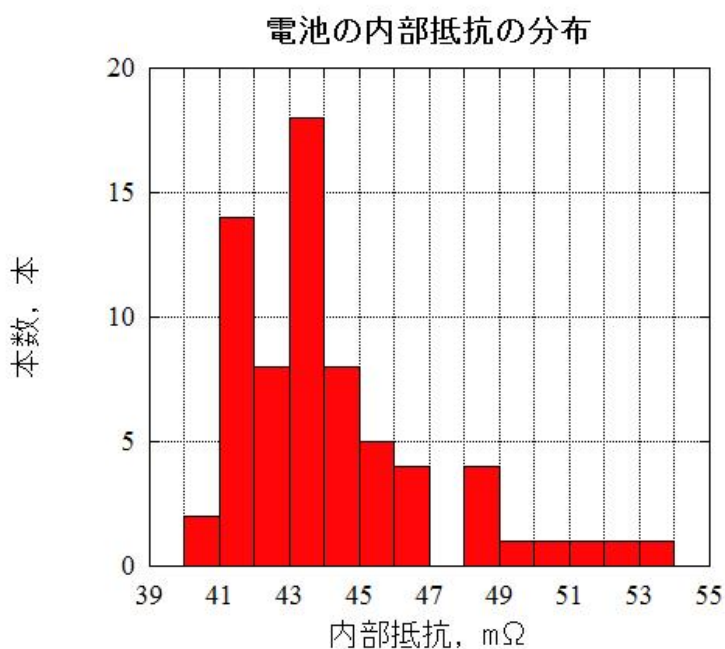


図 3.2-4 内部インピーダンス分布

Fig. 3.2-4 Internal resistance of battery

本試験は初めて電池の内部インピーダンスを測定するため、最適な負荷電流の値がわからなかった。そこで、0.1A と 0.7A の 2 ケースの負荷電流のときの内部インピーダンスを計測し、差がどの程度あるのか考察した。負荷電流に対する計測結果の違いを下図に示す。負荷電流の違いによる平均測定誤差は約 7%であった。このことから、0.1~0.7A の負荷電流による計測結果はほとんど一致することが確認できた。

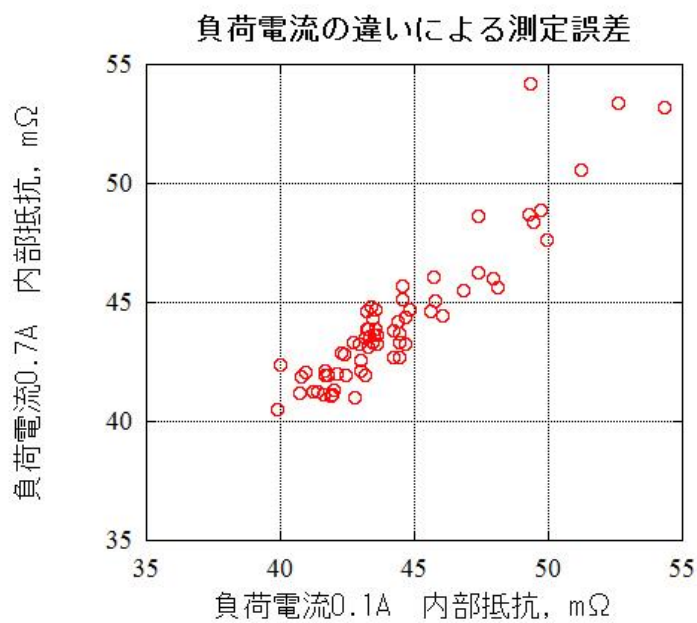


図 3.2-5 負荷電流による結果の誤差

Fig. 3.2-5 Measuring error

3.3 充放電特性

(i) 概要

はじめに、電池の特性について概要を述べる。二次電池は、周知の通り充電して、使用（電力消費）する。このとき、充電時、放電時で電池電圧の特性が存在する。図 3.3-1 に充電時の電池特性について示す。電池が充電されてくると、電池電圧が上昇し、容量が 100% 付近になると、電池内圧と温度が上昇する。参考資料[9]によると、一般的に 0.1C 充電で 16 時間、即ち 160% 充電すると、100% の容量取り出すことができる。一方、放電時は容量の減少に伴い電池電圧が低下してくる。充電電圧、放電電圧共に、温度、電流によってその電圧が変化する。電圧変動の要因は電池の内部インピーダンスによるものである。一般的に、温度が高い又は電流が小さいほど電圧変動が小さく、温度が低い又は電流が大きいほど電圧変動が大きくなる。これらの充放電特性は規則性があり、一般的に同じ条件下（温度、電流）での特性はほとんど等しくなる（但し電池の劣化に伴い徐々に変化する）。

本項では 3 直 3 並列に組んだメインバッテリーの充放電特性の測定について述べる。この充放電特性を利用し、軌道上の衛星のメインバッテリー残量解析を行う。その詳細については 6.2 バッテリ残量解析で述べる。測定条件は、それぞれバッテリー温度低温 AT (-3°C)、常温 (20°C)、高温 AT+6°C (45°C) の温度環境下で、充電電流 0.4A、放電電流 0.2A で特性を取得する。ここで、電流値を固定した理由は、バッテリー残量解析を行うときの衛星動作モードは通常運用モードに限られるため、通常運用消費電力に基づき放電電流 0.2A とした。また、通常運用モードでの平均的な充電電流に基づき充電電流は約 0.4A とした。

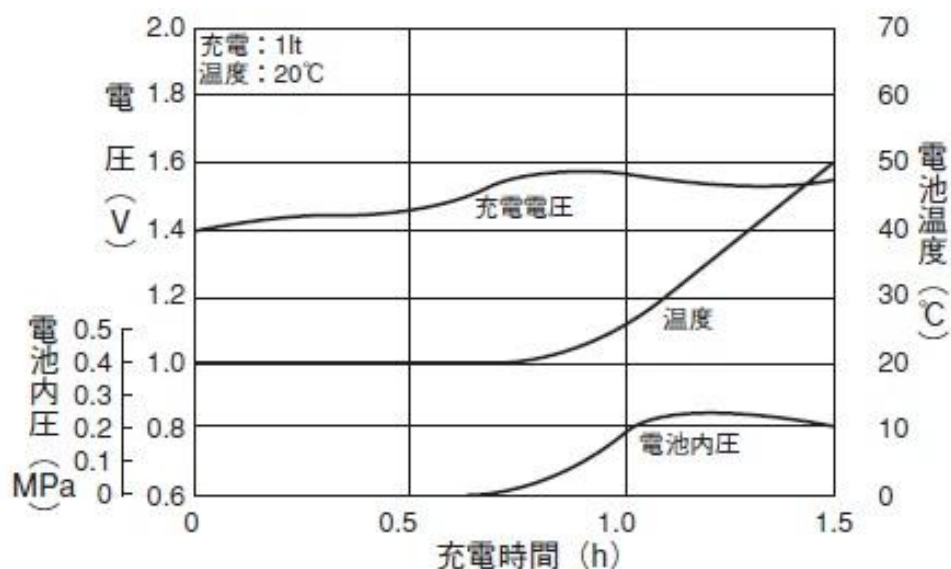


図 3.3-1 一般的なニッケル水素電池の充電特性

Fig. 3.3-1 General characteristics of nickel hydride battery

(ii) 試験システム

はじめに、バッテリーの充電、放電回路について述べる。バッテリーの充電はソーラーアレイシミュレーター (SAS) を電池に接続し、定電流モード (0.4A) 充電した。バッテリーの放電は、定電流ダイオード (CRD) により放電した。この放電回路は CRD の並列数を減らすため、ダイオード特性の非線形部分で使用している。そのため、電池電圧の変動により放電電流が少し変動するため、スイッチを設けて接続する CRD 数を変化させる。充放電時のバッテリー電圧と電流の計測は、DAQ により取得した。バッテリー電圧はバッテリー±端子、バッテリー電流は 0.1Ω 抵抗の両端で計測した。

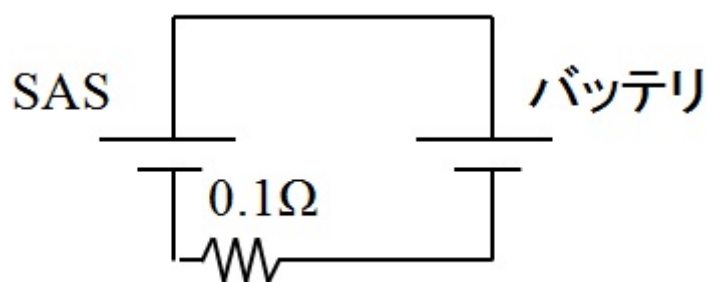


図 3.3-2 充電回路
Fig. 3.3-2 Charge circuit

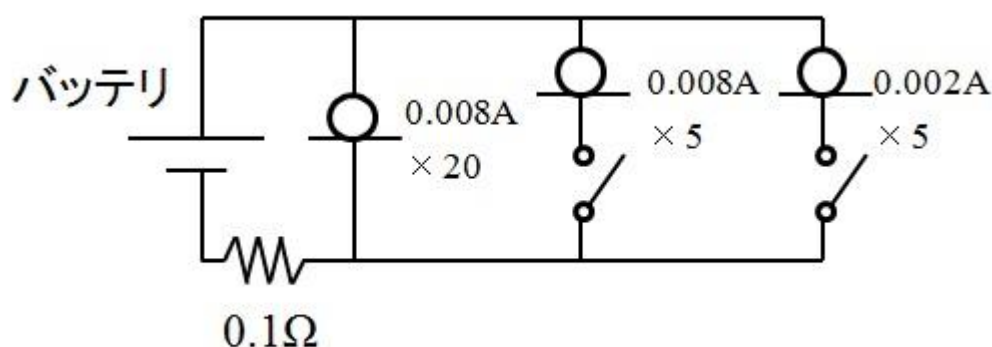


図 3.3-3 放電回路
Fig. 3.3-3 Discharge circuit

次に、温度環境の試験システムについて述べる。図 3.3-4 に低温環境のバッテリー周辺コンフィギュレーションを示す。バッテリーを冷やすために、下図のケースごと冷凍庫に投入した。そのままでは、 -20°C まで冷えるため、ヒーターで温調をかけ熱電対 (計 5 個) で温度を測定した。また、冷凍庫から取り出した際の結露対策として、プラスチックケース内は窒素パージし、大量のシリカゲルを同梱した。常温環境は、低温環境後に冷凍庫から取り出し、2 日間室温環境で放置して完全に室温に戻した状態で行った。

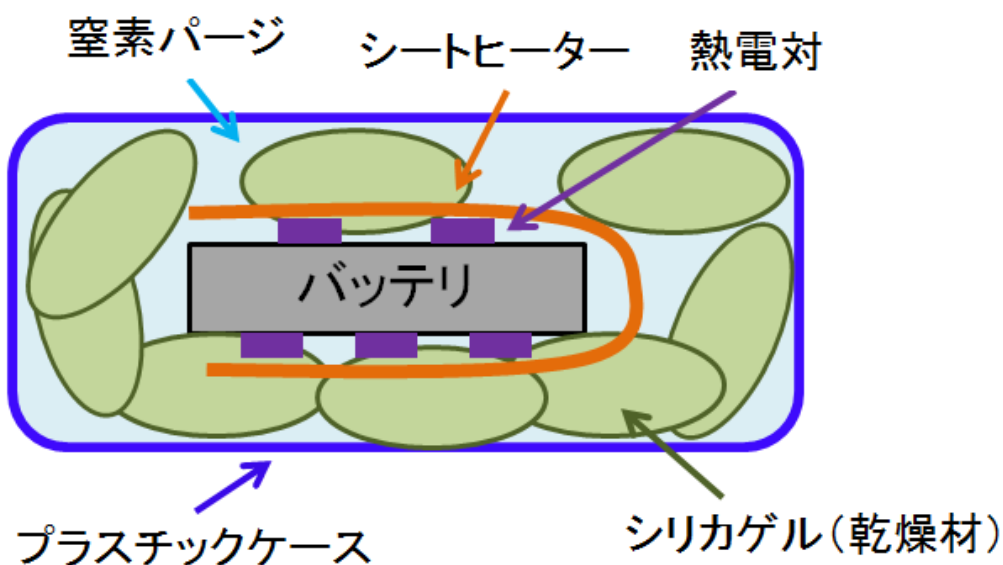


図 3.3-4 低温環境バッテリーコンフィギュレーション
 Fig. 3.3-4 Battery configuration (low-temperature environment)

図 3.3-5 に高温環境時のバッテリーコンフィギュレーションを示す。下図のプラスチックケースを室内に置き、ヒーターでバッテリーを温めた。バッテリー温度は熱電対（計 5 個）で測定した。バッテリーとヒーター、熱電対はアルミホイルで包み放射熱を小さくした。また、断熱材の上にバッテリーを乗せることで熱伝導を小さくした。

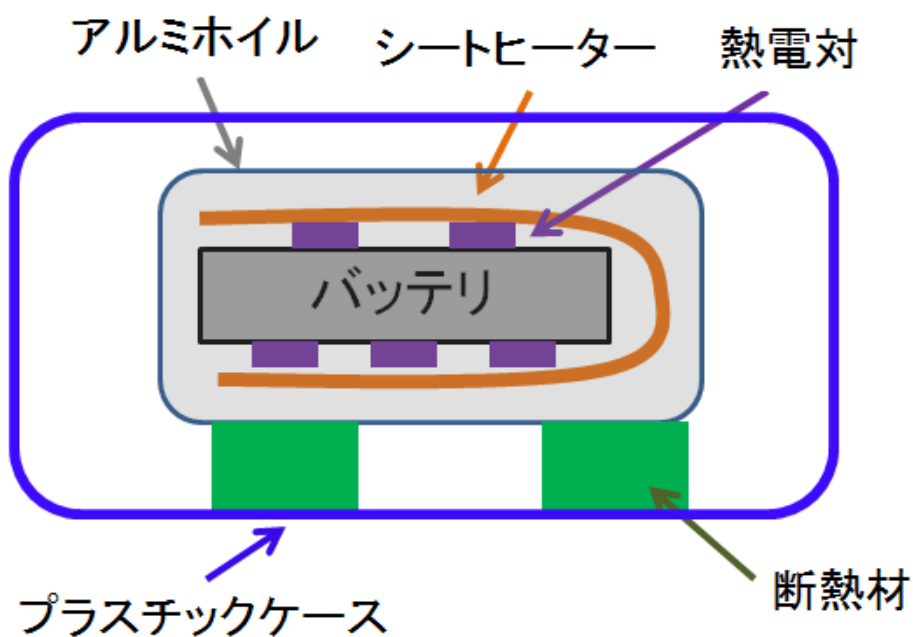


図 3.3-5 高温環境バッテリーコンフィギュレーション
Fig. 3.3-5 Battery configuration (high-temperature environment)

(iii) 測定結果

結果を示す前に、充放電の電流、温度精度について述べる。充放電電流は、設定値約 $\pm 5\text{mA}$ である。図 3.3-6 に例として低温環境試験時の放電電流を示す。また、温度は設定値約 $\pm 4^\circ\text{C}$ である。図 3.3-7 に例として低温環境試験時の温度を示す。

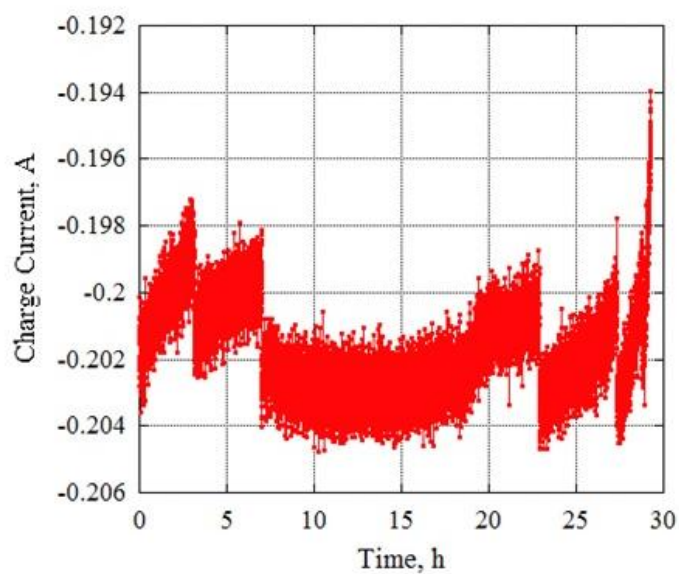


図 3.3-6 低温環境試験時の放電電流
Fig. 3.3-6 Discharge current of battery (low-temperature environment)

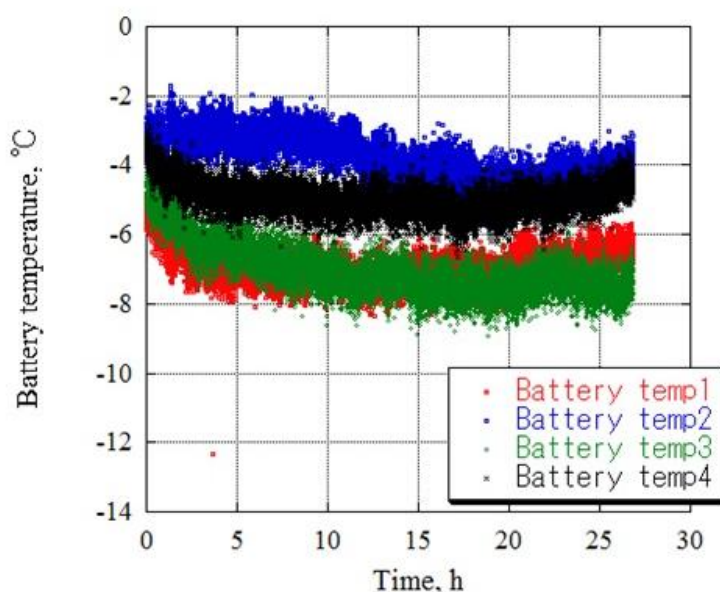


図 3.3-7 低温環境試験時の温度

Fig. 3.3-7 Battery temperature (low-temperature environment)

図 3.3-8, 9 に測定結果を示す。図はバッテリー電圧とバッテリー容量の特性であるが、バッテリー容量は充電・放電した電流量である。充電、放電特性共に低温環境では内部インピーダンスによる電圧降下が大きくなっていることがわかる。また、常温と高温では特性の大部分が一致している。ただし、高温では 100%分の電流量を充電しても電圧ピークが出ていないため、容量が増加していることがわかる。また、低温をみると 90%程度の所で電圧ピークが出ていることから容量の変化がわかる。放電特性をみても、温度環境の違いによる容量の変化わかる。この結果から温度環境による容量の変化を表 3.3-1 にまとめた。バッテリーが -3°C （最低温度解析値）時は容量が 5%低下し、 45°C （最高温度解析値 $+6^{\circ}\text{C}$ ）時は 4%容量が増加することがわかった。

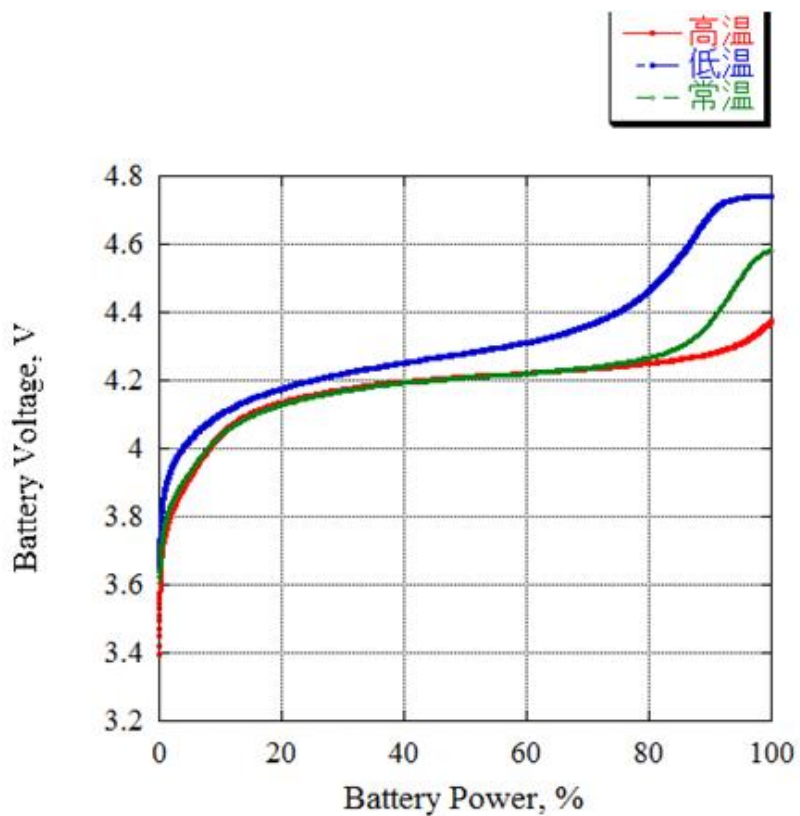


図 3.3-8 温度別 0.4A 充電特性

Fig. 3.3-8 Charge characteristics (charge current 0.4A)

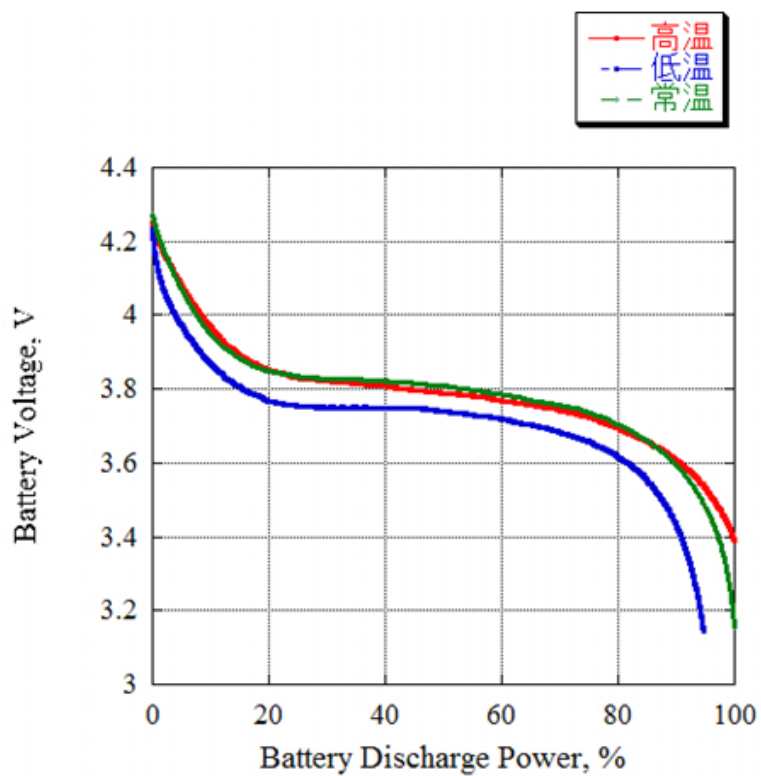


図 3.3-9 温度別 0.2A 放電特性

Fig. 3.39 Discharge characteristics (discharge current 0.2A)

表 3.3-1 温度別メインバッテリー容量

Table 3.3-1 Battery power VS Battery temperature

温度, °C	バッテリー容量, Ah	バッテリー容量, %
-3	5.40	95
20	5.71	100
45	5.91	104

3.4 自己放電量

3.2 では単セルの自己放電量を測定したが、ここではセルを3直3並列にしたメインバッテリーの自己放電量の測定を行う。鳳龍式号機は、最終充電から打ち上げまで最大3カ月の保存期間がある。この間、バッテリーは補充電なしで残量を維持しなくてはならない。電源システムの設計上、バッテリーは回路へのリーク電流はない（分離検知スイッチ3により物理的にバッテリーマイナス端子が開放状態であるため）。従って、自己放電量のみ考慮すればよい。参考資料[9]より、ニッケル水素電池の自己放電量は図3.4-1の様になる。保存温度が高いほど自己放電量は大きくなることがわかる。以下、自己放電量の測定について述べる。

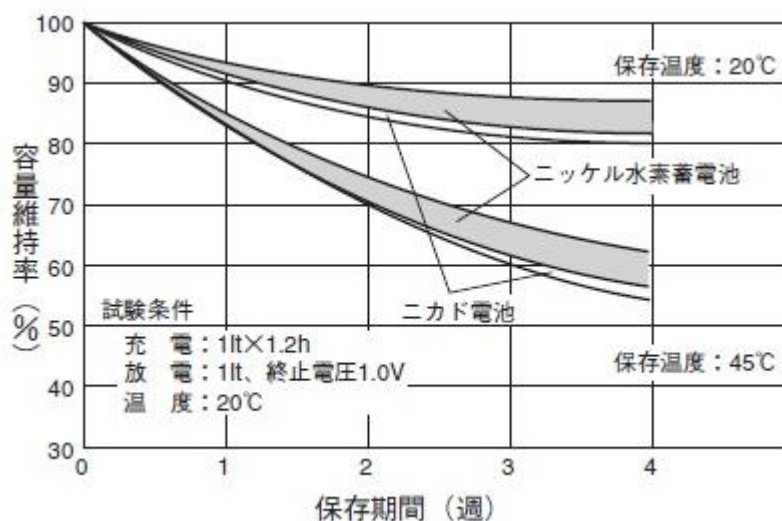


図 3.4-1 ニッケル水素電池の自己放電量例

Fig. 3.4-1 General self-discharge characteristic of nickel hydride battery

自己放電量の測定にはメインバッテリーパックを2つ使用する。はじめに、2つのメインバッテリーを満充電にし、18~25°Cで一定に保たれるデシケーターで保存した。放置期間は一方は132日（4カ月強）、もう一方は48日である。バッテリーの残量は放電させて電流量を測定することで確認した。図3.4-2に結果を示す。132日放置したバッテリーの残量は78%、48日放置したバッテリーの残量は91%となった。衛星の保管は室温（20°C）程度であるので、十分なバッテリー残量を維持した状態で打ち上げることが可能であると考えられる。

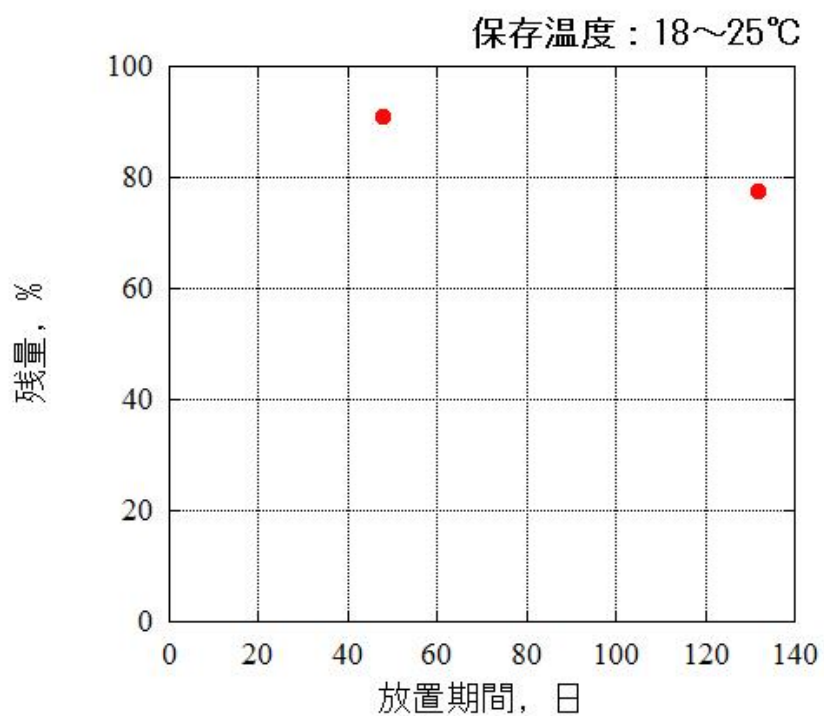


図 3.4-2 メインバッテリーの自己放電量

Fig. 3.4-2 Self-discharge characteristic of “Horyu 2” battery

3.5 軌道上バッテリー温度と適性温維持

バッテリーは衛星コンポーネントのなかで、一番厳しい温度管理を必要とする。一般的なバッテリーの最適動作温度は20～30℃である。鳳龍式号機では、バッテリーの温度管理条件は0～40℃としている。下図に、軌道上のバッテリー熱解析結果を示す。バッテリーの最高温度は39℃、最低温度は-3℃である。バッテリーBOXの断熱効果により、1サイクル当たりの温度変化は非常に小さく、7℃程度である。バッテリーBOX内には0.3Wのヒーターを設置しており、バッテリー温度を約10℃上昇させることができる。ヒーターの詳細は後述する。

バッテリーは満充電付近で充電すると発熱する。4.4.3項の過充電電力サイクル試験結果より、バッテリーが最も充電されやすい環境（バッテリーQT高温、最高発電電力-AT高温太陽電池特性）での日照中（充電時）の平均発熱量は0.65[W]である。そこで、最高温度熱解析条件で日照時にバッテリーが0.65[W]発熱し続けるケースを熱解析するとバッテリー温度は図3.5-3に示す温度となる。これが運用中のバッテリー最高温度である。しかし、運用（ミッション実行など）によってバッテリー残量が100%にならないように運用すると、バッテリー最高温度は図3.5-1に示す温度となる。

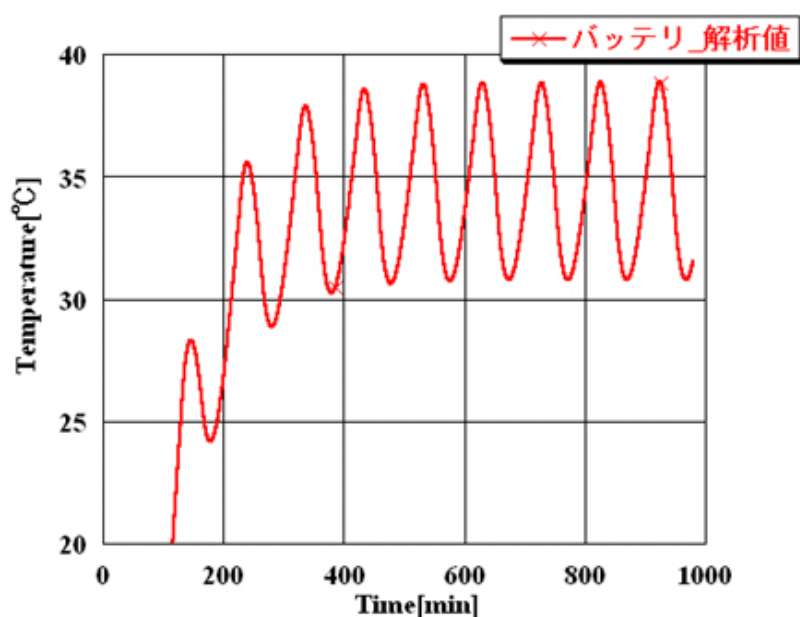


図 3.5-1 バッテリー温度解析結果（最高温度）

Fig. 3.5-1 Result of thermal analysis of battery temperature (maximum temperature)

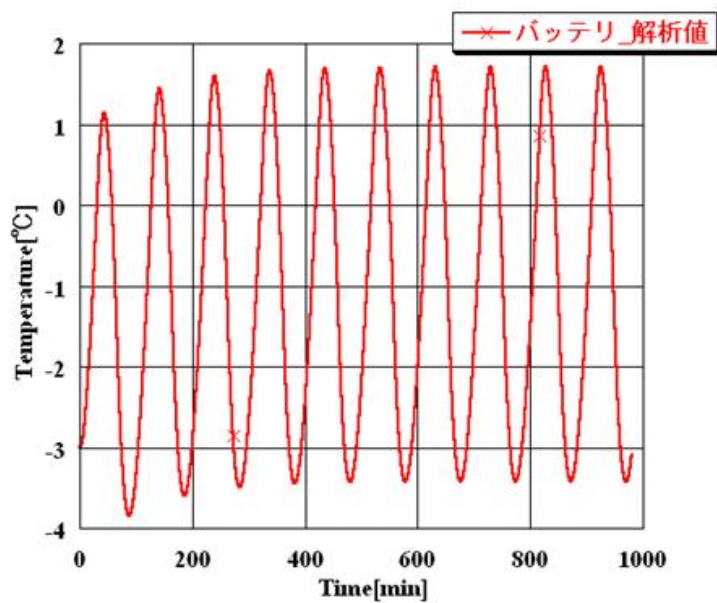


図 3.5-2 バッテリー温度解析結果（最低温度）

Fig. 3.5-2 Result of thermal analysis of battery temperature (minimum temperature)

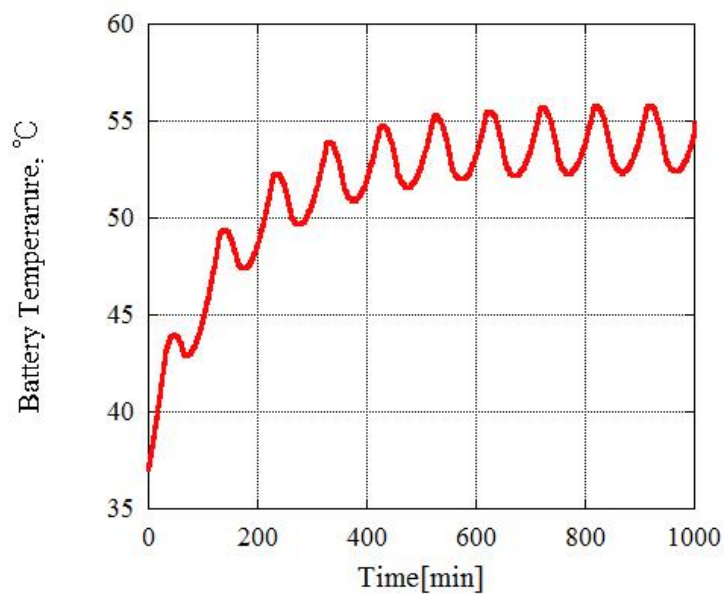


図 3.5-3 バッテリー満充電時の最高温度

Fig. 3.5-3 Maximum temperature of battery at full charge

図 3.5-4 にヒーターのシステムブロック図を示す。ヒーターはシート状のものを 2 枚使用している。1 枚当たりの抵抗値は約 50Ω である（図 3.1-10 に写真を記載）。ヒーターを ON にするには、バッテリー温度センサ出力が約 27°C を示している時、かつ OBC からのヒーター ON 信号が出力されているときである。このように、スイッチをシリーズにした理由は、バッテリーの最低温度解析値よりヒーターなしでも十分動作できるためである。電力収支の観点から、ヒーターは最大で 1 サイクル（98 分）の間に 45 分間しか動作することができないように OBC で動作制限をかけている。ヒーター常に ON 時の電力収支は非常にマージンが少なくなるため、確実に電力収支をプラスにするためにこの様にしている。これらのヒーター回路は電源基板ではなく、基板実装スペースに余裕がある ELF 基板に搭載した。

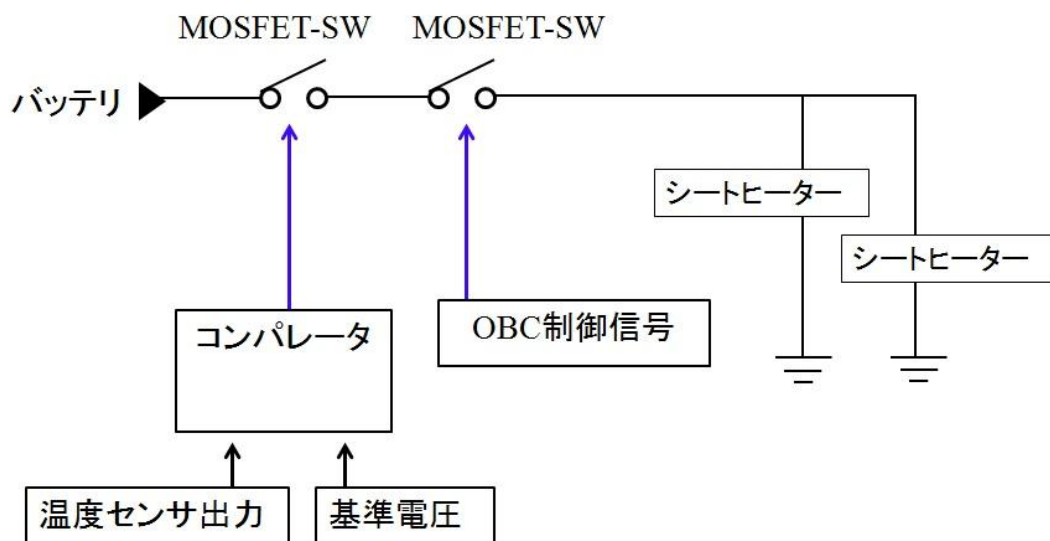


図 3.5-4 ヒーターシステムブロック図

Fig. 3.5-4 Heater system block diagram