

## 第4章 ソフトウェア設計仕様

### 4.1 軌道上試験計画

3つある試験開始コマンドラインの組み合わせにより試験モードを変えることができる。試験モードは全部で7つ用意されている(表 4.1)。各試験モードで行われる動作を簡単に表 4.2 に示す。

表 4.1 試験モード

Table 4.1 Test mode

	試験開始 コマンド1	試験開始 コマンド2	試験開始 コマンド3
初期動作確認モード	High	Low	Low
フィルム劣化試験モード	High	High	High
300V 発電モード	Low	High	Low
オーロラ帯放電試験モード	Low	High	High
放電抑制試験モード(ノミナル)	High	High	Low
フィルム	Low	Low	High
コーティング	High	Low	High

表 4.2 各試験モードで行われる動作

Table 4.2 Operation of each test mode

	高電圧発電	測定	バイアス	放電検出
初期動作確認 モード	-	基板温度、電位	-	-
フィルム劣化 試験モード	-	照度、基板温度 フォトダイオード	-	-
300V 発電 モード	○	発電電圧、電位 基板温度	-	○
オーロラ帯 放電試験モード	-	発電電圧、電位 基板温度	コーティング TJアレイ	○
放電抑制試験 モード(ノミナル)	○	発電電圧、電位 基板温度	ノミナル TJアレイ	○
フィルム	○	発電電圧、電位 基板温度	フィルム TJアレイ	○
コーティング	○	発電電圧、電位 基板温度	コーティング TJアレイ	○

## 4.2 ミッションシナリオ

鳳龍式号に搭載されるミッションは以下の通りで

- ・ 300V 発電(放電抑制手法の軌道上実証を含む)
- ・ 放電抑制フィルムの劣化実証
- ・ 帯電緩和素子 ELF の軌道上実証
- ・ 表面電位計 Trek の軌道上実証
- ・ デブリ検出
- ・ カメラ(SCAMP)

の 6 個である。この中のデブリ検出に関してのみ通常運用モードでミッションが行われる。他のミッションは地上局からのミッション開始コマンドにより実行される。

デブリ検出を除く 5 つのミッションの実行優先順位は、高電圧や放電などのリスク、サクセスレベルを考慮して、

- (1) カメラ(SCAMP)
- (2) 放電抑制フィルムの劣化実証
- (3) 300V 発電(放電抑制手法の軌道上実証を含む)
- (4) 帯電緩和素子 ELF と表面電位計 Trek の軌道上実証

の順番を予定している。これらのミッションは鳳龍式号が軌道に投入されてから数週間通常運用モードで正常に動作していることを確かめ、またミッションを行うために十分な電力があると判断された上で行われる。

以下に 300V 系のミッションシナリオについて述べる。

300V 系は大きく分けて 4 つの試験モードを搭載予定であり以下の通りである。これらの試験モードは上述の(2), (3)に相当する。

- (a) 初期動作確認モード
- (b) フィルム劣化試験モード
- (c) 300V 発電モード
- (d) 放電抑制試験モード
- (e) オーロラ帯放電試験モード

300V 系の起動には電力的制約があるので、これを満たしていなければならない。300V 系の電力的制約は電力が定常になっており、かつバッテリー残量が 37%(600mAh)のときである。これ以外の制約は 300V 系には存在しない。

初めて 300V 系を起動するときはいきなり放電試験モードをするのではなく、まずは初期動作確認モード(a)において 300V 系 CPU と OBC が適切にデータのやり取りが行えること、また、300V 系のセンサ系統が正常動作していることを確認する。このモードにかかる時間は約 30 秒である。この初期動作確認モードにおいては 300V 発電などの危険を伴う動作を行わない。初期動作確認モードにおいて 300V 系に異常があると判断された場合は 300V 系の他の試験モードは行われない。

初期動作確認モードにおいて 300V 系の正常動作が確認できれば、(b)のフィルム劣化試験モードを行う。このミッションは OBC から試験開始コマンドが送信されてから 60 分間試験が行われる。この試験に関してはフィルムの経年劣化を調べるために数週間に 1 回のサンプリングを予定している。また、この試験は 300V 系が 60 分間と比較的長時間で動作させても正常に動作することを確認するための試験も兼ねている。フィルム劣化モードにおいて 300V 系の長時間動作に異常が見られたら(c), (d)の放電試験は行われない。

300V 系の長時間動作が正常であると確認できれば、(c)の 300V 発電モードが行われる。この試験に関しても OBC から試験コマンドが送信されてから 60 分間試験が行われる。300V 発電モードは、300V 発電太陽電池が日照時に安定して発電し、放電が発生せずに発電が行われることを確かめるための試験である。この試験において 300V 発電太陽電池において高い頻度(60 分で 10 回以上)で放電が発生している場合は放電抑制手法の検証を行うのは難しいとみなし、抑制手法の耐宇宙環境性の評価は行われない。ただし、300V 発電太陽電池はプラズマ環境で放電しないことは確かめてフライトされるが、オーロラ帯の高エネルギー電子環境下で放電しないことは確かめていない(地上試験で確かめていない)ので、軌道上で放電が発生したとしてもどちらの影響で放電が発生したか断定できない。そのため、300V 発電モードにおいて高い放電頻度が確認されたらオーロラ帯で放電試験が行われないように時間設定して試験を行う必要がある。これでも放電が発生したら次の放電抑制試験モードには移れない。一方放電が発生しなかった場合はオーロラ電子の影響を受けて放電が発生した可能性があるかとみなして良い。

300V 発電モードにおいて高い頻度で放電が発生しないことが確認できれば、(d) 放電抑制試験モードを行う(もしオーロラ帯で放電が発生する可能性があれば、この試験モードはオーロラ帯通過時に行われないように設定される)。この試験に関しても OBC から試験コマンドが送信されてから 60 分間を予定しており、放電抑制手法を施した 2 つ(フィルムと半導電性コーティング)の TJ アレイと抑制を施していない太陽電池にて別々に行われる。抑制を施した太陽電池と施していない太陽電池の放電回数を比較することで抑制手法に効果の有無の検証を行う。

上記(a)~(d)が鳳龍式号に設定されているミッションであるが、ミッションモードをもう 1 つ設定することができるため、オーロラ帯放電試験というモードを設定した。これは半導電性コーティングが高エネルギー電子環境下で放電抑制できるかを評価するモードである(半導電性コーティングは高エネルギー電子環境向きの放電抑制手法)。このモードを行う場合は衛星がオーロラ帯を通過するときに試験が行われるように時間を設定する必要がある。この時間設定は、予約コマンドで設定することが可能である。

### 4.3 初期動作確認モード

初期動作確認モードで行われる動作を表 4.3 に示す。この試験モードは 300V 系が正常に動作することを確認するためのモードであるため、短時間しか試験は行われず、また高電圧発電など危険を伴うことは行われない。この試験モードでは、電位と基板温度が 1sec 周期で測定、保存され、合計で 25 回行われる。

表 4.3 初期動作確認モードで行われる動作

Table 4.3 Operation of initial operation check mode

試験時間	25sec
測定対象	電位、基板温度
サンプリング周期	1sec

※AD コンバータの分解能は 8bit なのでセンサデータ 1 つ当たり 1byte

### 4.4 放電試験モード

放電試験モードは 300V 発電モード、オーロラ帯放電試験モード、各 TJ アレイでの放電抑制試験モードの総称である。放電試験モードで行われる動作を表 4.4 に示す。試験時間は 60min を予定しており、発電電圧、電位、基板温度の測定が 1min 周期で行われる。ただし、放電回数が 30 を超えると試験時間が 60min 経過していなくても強制的に終了するように設定されている。

放電検出のサンプリングはハードウェア設計上 1sec 毎にしか行うことができないため(タイマ IC の出力が持続時間 1sec のパルス)、1sec 以内に 2 回以上放電が発生しても最初の放電しかカウントされない。放電が発生すると、放電直前のセンサデータが取得される。定期的にサンプリングされたセンサデータはその都度フラッシュメモリに保存されるが、放電検出のデータは基本的に放電が発生した時のみ保存され、それと同時に放電直前のセンサデータが保存される。上記のようにデータは取得直後にフラッシュメモリに保存されるため、OBC の定期リセットや暴走などにより 300V 系の電源が強制的に切られても問題ない。よって試験時間を 60min よりも小さくしたい場合があれば地上局から試験途中で 300V 系の電源を強制的に切るようなコマンドをアップリンクすれば良い。

表 4.4 放電試験モードで行われる動作

Table 4.4 Operation of discharge test mode

試験時間	60min
測定対象	発電電圧、電位、基板温度
センサのサンプリング周期	1min
不定期サンプリング	放電発生直前
放電検出サンプリング	1sec

上記動作のシーケンスを図 4.1 に示す。センサデータの定期サンプリングは 1 ループが 60 秒のループの中で毎回データが取得、保存される。このループの中にさらに放電検出をするためのループがあり 720 回タイマ IC から出力されるパルスの High/Low を判断する(720 ループは 60sec に相当)。このループの中で、12 ループに 1 回だけ放電直前のセンサデータを取得するためのサンプリングが行われる。このサンプリング周期は 1sec に相当する。

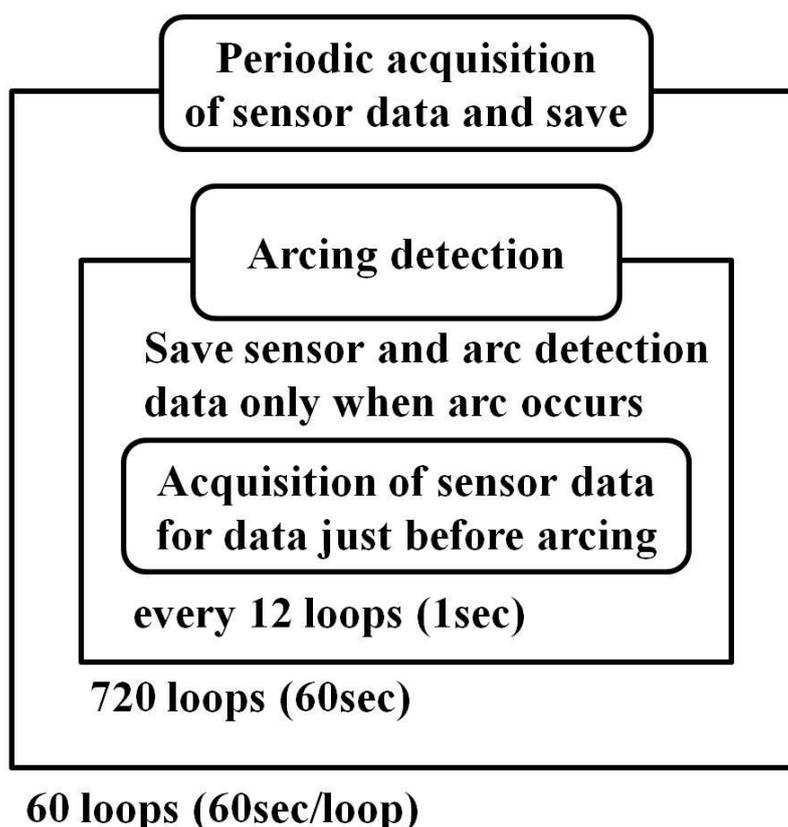


図 4.1 放電試験モードのシーケンス

Figure 4.1 Sequence of discharge test mode

## 放電検出

放電検出は、図 2.8a で示しているように放電検出回路のタイマ IC から出力される持続時間が 1sec のパルスを 300V 系 CPU が読み取ることで行われる。このパルスを 1 回読み取っただけでは、ノイズを誤って放電発生とみなしてしまう可能性があるため、複数回パルスを読み取る(図 4.2)。このパルス読み取りは 1sec 間で 12 回行われる。よって 1sec 間で複数回の放電を検出することはできない。High 信号が取得されてから 9 回連続 High 信号を取得したら放電発生とみなすこととしている。この回数は経験則に基づいて得られた回数で最も適切に放電発生を取得できる(注意：タイマ IC から出力されるパルスの持続時間が正確に 1sec ではない、またパルス読み取りが 1sec 間で正確に 12 回取得しているわけではない)。9 回よりも小さくすると、連続で放電が発生した場合、余分に放電が発生したとみなす場合がある。9 回よりも多くすると、途中でセンサデータのサンプリングを挟むことがあるのでその時間分だけロスし、1sec のパルスが出力されているにもかかわらず放電発生とみなせない場合がある。

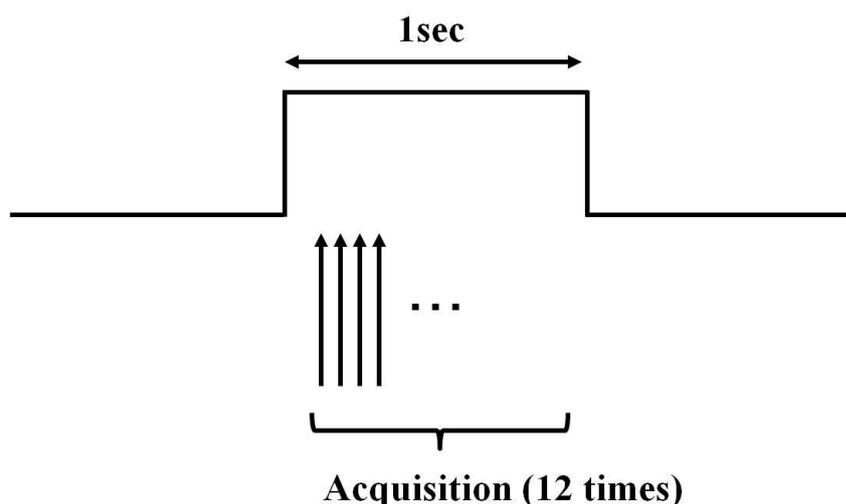


図 4.2 タイマ IC 出力パルス取得方法

Figure 4.2 Acquisition method of output pulse from Timer IC

放電検出用インダクタは、図 2.1 に示しているように 300V 発電太陽電池用と TJ アレイ用の 2 つ存在し、その後のコンパレータとタイマ IC の回路はそれぞれ 3 つずつ搭載されている(3 冗長)。よって、合計 6bit のデータが存在することとなる。ただし、簡易化のために 1byte (8bit) のデータとして扱っている。放電検出回路は、検出用インダクタに微小でも速い電流が流れれば反応してしまうので、このデータのみで放電箇所を特定することはできない。放電箇所のデータ解析については付録 A を参照。このデータ解析後、最終的に 300V 発電太陽電池用と TJ アレイ用の放電検出回路で放電検出された回数を比較し、試験条件を考慮することで放電箇所を特定する(5.7 節参照)。

### 放電直前のセンサデータ取得方法

図 4.2 のシーケンスで示しているように、放電直前のセンサデータの取得は放電検出が行われるループ内において 1sec 周期間隔でサンプリングされている。このようにサンプリングされた最新データ 3 つを 300V 系 CPU 内の RAM に格納しておく。ただし、サンプリングする毎に一番古いデータは最新データと置き換わり更新される。放電検出が行われたら、これらのデータを読み出し最も古い(3sec 前)のデータを放電直前のデータとしてフラッシュメモリに保存する(図 4.3)。

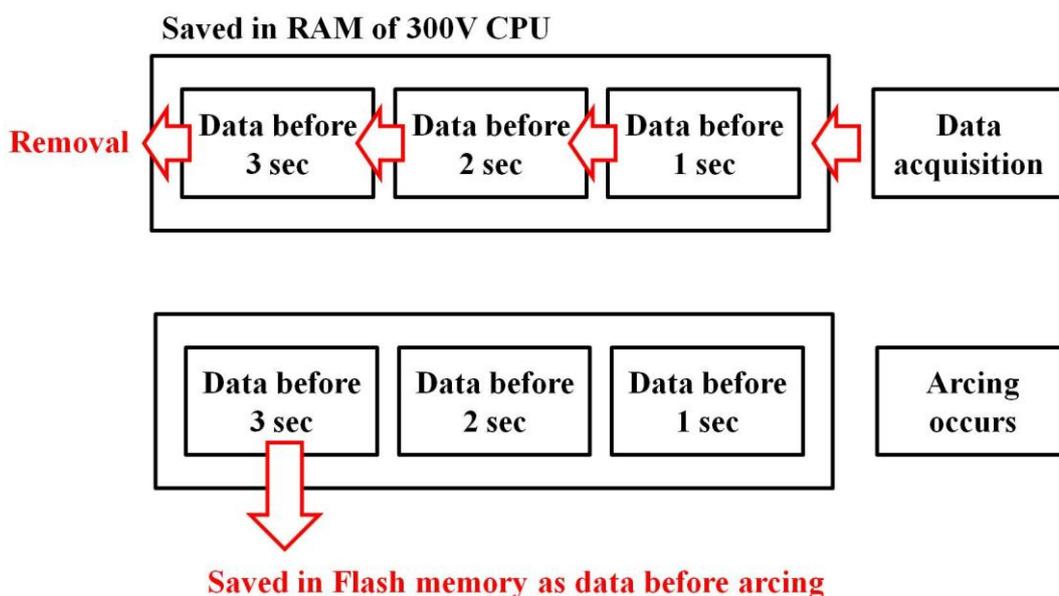


図 4.3 放電直前のセンサデータ取得方法

Figure 4.3 Acquisition method of sensor data before arc occurs

### 4.5 フィルム劣化試験モード

フィルム劣化モードで行われる動作を表 4.5 に示す。試験時間は 60min を予定しており、照度、基板温度、フォトダイオード温度の測定が 30msec 周期で行われる。保存は 20min 置きに行われ、基本的に試験開始直後から測定されている照度の最も大きいデータ上位 20 個分が他のセンサデータ及び時間データとともに保存される。

表 4.5 フィルム劣化試験モードで行われる動作

Table 4.5 Operation of film degradation test mode

試験時間	60min
測定対象	照度、基板温度、フォトダイオード温度
センサのサンプリング周期	30msec

上記動作のシーケンスを図 4.4 に示す。センサデータの取得は 1 ループが 60sec のループ内で 2100 回取得される。ここで取得されるセンサデータは直接フラッシュメモリに保存されるわけではなく、300V 系 CPU の RAM にそれぞれ 20byte ずつ格納される。格納対象になるデータは、照度のみを比較して最大のデータ 20 個分としている。このループが 20 回行われる(20min に相当)。20min 経過すると、これまでに取得されたセンサデータがフラッシュメモリに保存される。上記過程が計 3 回行われ試験が終了する。

取得データはフラッシュメモリに保存するまでは、300V 系 CPU の RAM に格納されているので、300V 系 CPU が誤動作してしまったり、OBC の定期リセットや暴走など 300V 系の電源が強制的に切られてしまったりすると、それまでに取得したデータは失われることになる(フラッシュメモリに保存されたデータは問題ない)。また、フラッシュメモリに保存された後 CPU の RAM に保存されているデータは消去されず、次のセンサデータ取得にもちこされ、取得データと比較される。

※取得データを 300V 系 CPU の RAM に格納するのではなく、フラッシュメモリに格納すれば誤動作した場合でもデータのロスはないが、フラッシュの仕様上同様の処理が難しいため行っていない。

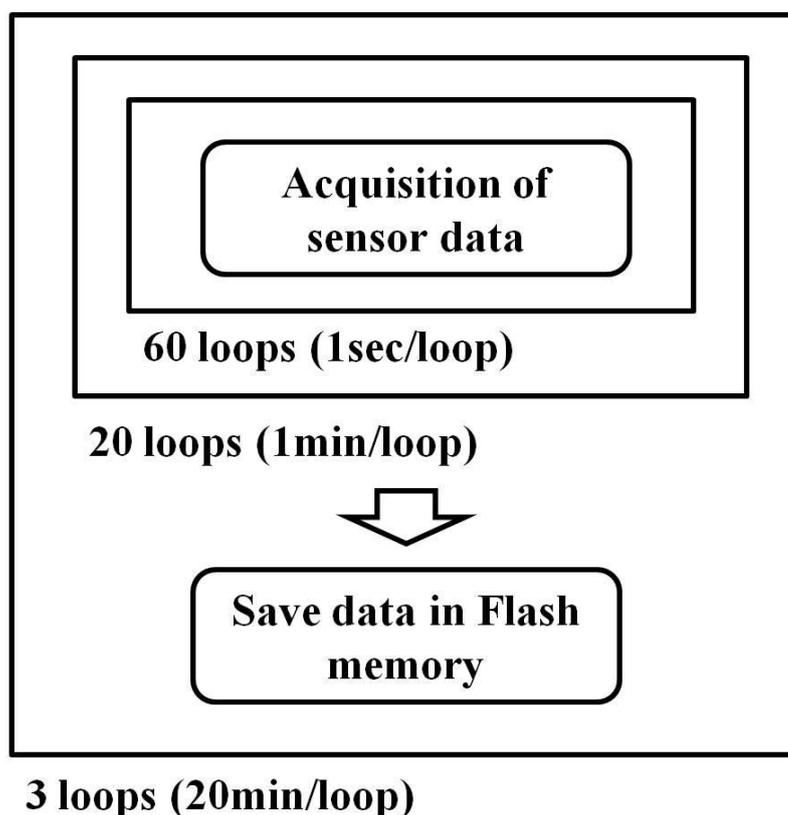


図 4.4 フィルム劣化試験モードのシーケンス  
Figure 4.4 Sequence of film degradation test mode

#### 4.6 データ保存

フラッシュの内部構造概略を図4.5に示す。使用しているフラッシュは16個のSectorがあり、その中に256個のpageが存在する。1page当たり256byteのデータを書き込むことができる。

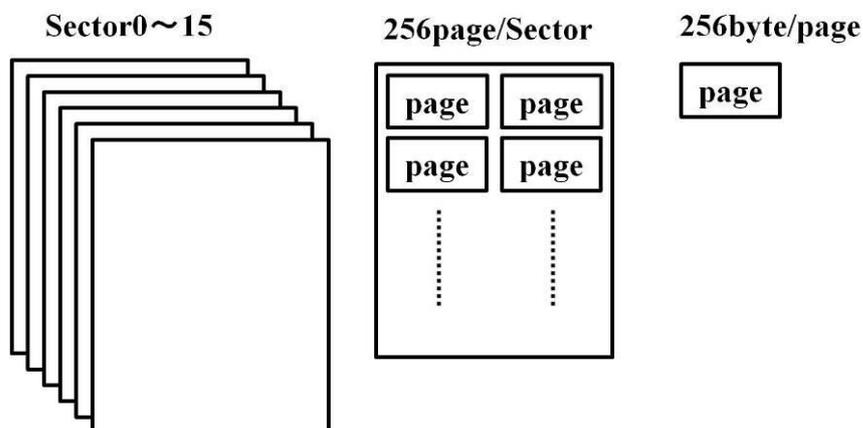


図4.5 フラッシュのメモリ構造

Figure 4.5 Memory structure of flash memory

#### セクタ0~2のフラッシュ割り当て

セクタ0~2は試験データではなく、保存先セクタやブランク(空)セクタ、過去行われた試験モードの履歴(OBC使用)、300V系の動作状態を示したデータ(300V使用)が保存される。図4.6にセクタ0~2のデータ割り当てを示す。

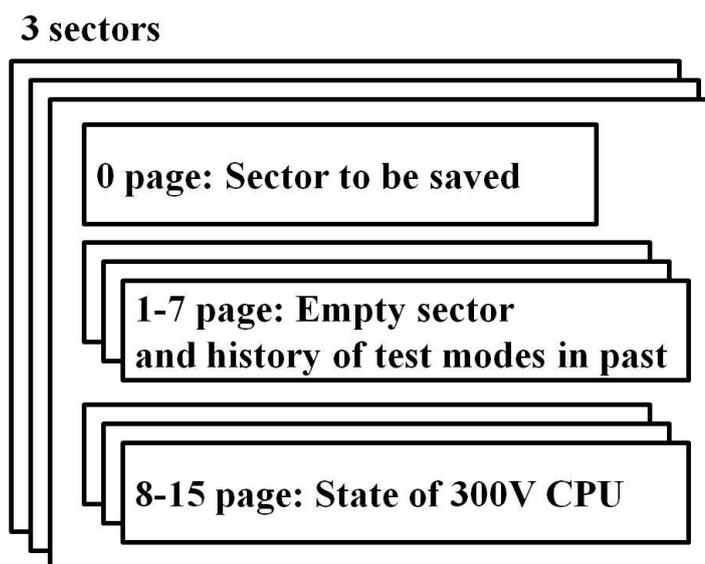


図4.6 セクタ0~2のデータ割り当て

Figure 4.6 Data arrangement of Sector 0 to 2

OBCが読み書きを行う部分に関しては、各セクタの同じページに同じデータが書き込まれている(多数決冗長系)。このデータは試験が始まる度にOBCはフラッシュの状態を読み取り、一旦データを全て消去した後(SEU対策のため逐一リフレッシュ、300V系が使用したアドレスの初期化)、保存先Sectorの指定(0page)及びブランクセクタ、過去に行われた試験モードの履歴(1~7page)の書き込みを行う。

300V系が読み書きを行う部分に関しては、セクタ0, 1の8~15pageにのみ保存され、セクタ2には保存されない(冗長系なし)。このセクタは300V系CPUの動作状態を保存することで誤動作した時に誤動作前の状態に戻るために割り当てられており、放電試験モードとフィルム劣化試験モードで使用される。これらのモードでは毎回用いられるので試験開始直前に初期化される必要があるが、上述しているように300V系CPUが行わずにOBCが行う。

※セクタ0~2に保存されるデータはダウンリンクされるデータではないので、後述のハミング訂正符号は付加されていない。

※300V系CPUが読み書きを行う部分に関して、割り当てではセクタ0の8~15pageと書いてあるが、実際には7page目(OBC使用)の後ろ3byteも使用される。ただし、この部分をOBCが使用することはないので問題ない(詳細は付録C参照)。

#### セクタ3~15のフラッシュ割り当て

セクタ3~15は試験データが保存される(図4.7)。0page目にはOBCが書き込む部分と300V系CPUが書き込む部分が存在し、試験に関する情報が書き込まれる(表4.6)。1~12pageには試験で取得されたデータがハミング訂正符号付きで300V系CPUによって保存される。13page以降基本的にデータは保存されない。1ページ当たり75byte分(1パケット)しかデータは保存されないため、送信パケット数の上限は最大13パケットと定めている。また、試験モードによって保存されるセクタが決まっているため、セクタ割り当てを表4.7に示す。

※CPUの電源ON、誤動作による再起動が発生した場合は、現在までのデータが書き込まれた部分を探索し、その部分に0xffffにハミング訂正符号を付加したデータを保存する。そのデータの次に試験データは保存される(詳細は付録C参照)。

※ハミング訂正符号：2byteのデータを3byteに変換することで、SEUなどでデータが最大で2bit反転しても正常データに復元できる訂正符号

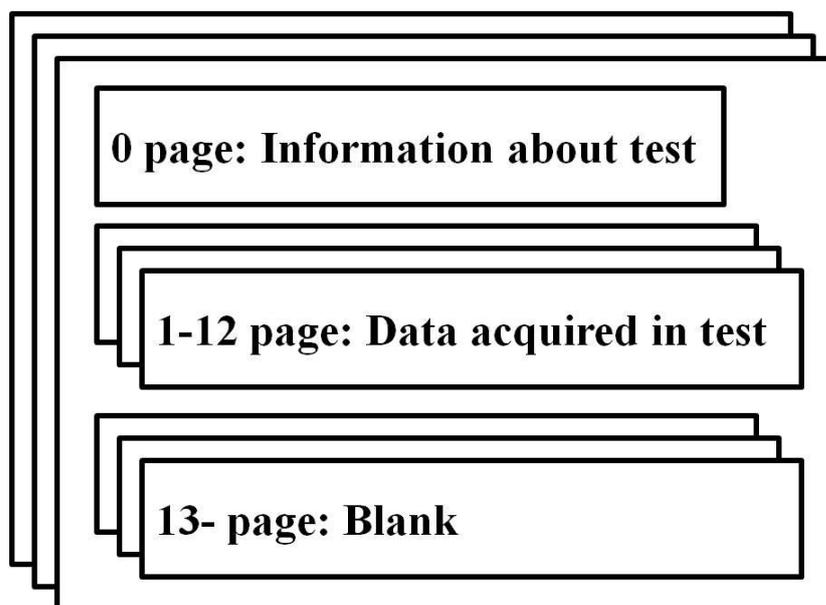


図4.7 セクタ3~15のデータ割り当て  
Figure 4.7 Data arrangement of Sector 3 to 15

表4.6 セクタ3~15の0page目に書き込まれる試験情報  
Table 4.6 Test information to be written in Sector 3 to 15

address	データ	CPU
0	試験開始(日)	OBC
1	試験開始(日)	OBC
2	上記2byte分のハミング訂正符号	OBC
3	試験開始(時間)	OBC
4	試験開始(分)	OBC
5	上記2byte分のハミング訂正符号	OBC
6	ミッション動作時間	OBC
7	ミッション動作時間	OBC
8	上記2byte分のハミング訂正符号	OBC
9	ミッションモード	OBC
10	0xff	OBC
11	上記2byte分のハミング訂正符号	OBC
12	正常終了(0xaa)、異常終了(0xff)	300V-CPU
13	パケット数	300V-CPU
14	上記2byte分のハミング訂正符号	300V-CPU
15	試験終了(日)	OBC
16	試験終了(日)	OBC

17	上記2byte分のハミング訂正符号	OBC
18	試験終了(時間)	OBC
19	試験終了(分)	OBC
20	上記2byte分のハミング訂正符号	OBC

表4.7 各試験モードのセクタ割り当て

Table 4.7 Sector arrangement of each test mode

	セクタ
初期動作確認モード	3
フィルム劣化試験モード	14, 15
300V 発電モード	4, 5
オーロラ帯放電試験モード	12, 13
放電抑制試験モード(ノミナル)	6, 7
フィルム	8, 9
コーティング	10, 11

#### 放電試験のフラッシュ割り当て

放電試験では4.4で示したように2つのデータ取得方法(定期サンプリング、放電時サンプリング)がある。このデータを混同して保存することになると複雑なプログラムになり、また解析も複雑になるので保存するアドレスを予め決めている。

1~4pageには、放電時サンプリングのデータが保存され、放電直前のセンサデータや放電検出のデータが保存される。5~12pageには定期サンプリングで得られるセンサデータが保存される。放電試験は、放電回数が30を超えると試験時間が60min経過していなくても強制的に終了するように設定されているので放電時サンプリングのデータが1~4pageに収まりきらず、5page以降の定期サンプリングに使用されているページにデータを上書き保存することはない。

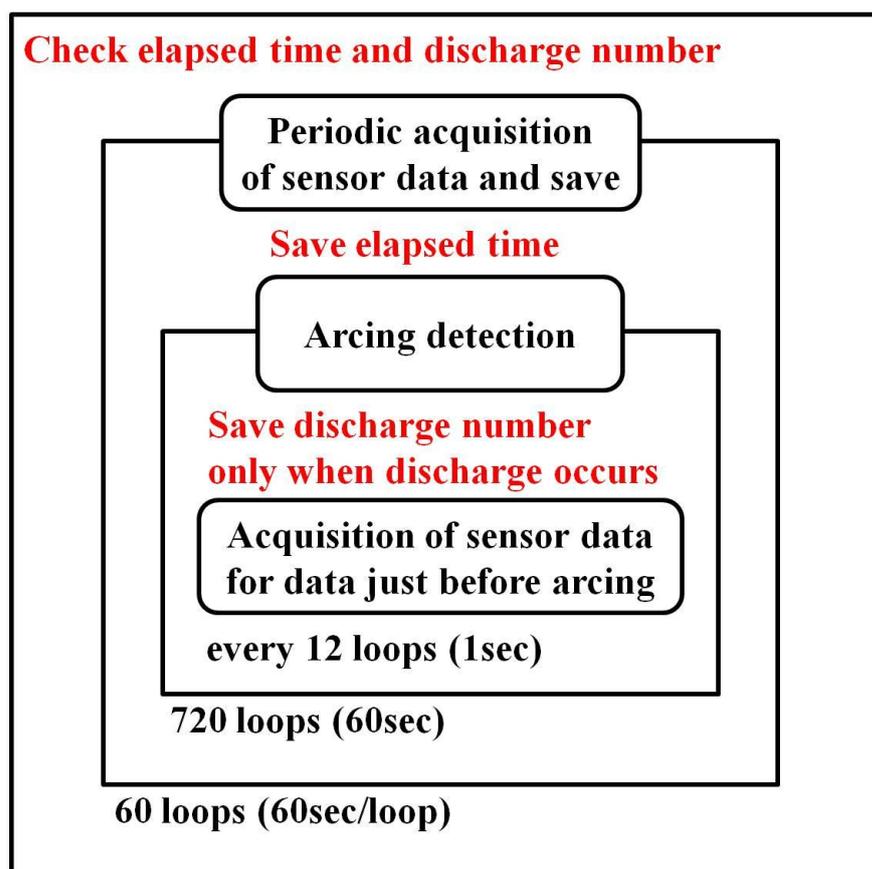
#### 4.7 誤動作対策

地上で行った放電試験(5.3 節参照)において、放電が発生した際に 300V 系 CPU のハングアップまたは 300V 系電源の瞬停が確認された。このような誤動作が発生した場合でも引き続き正常動作に復帰し、時間どおりに試験を終了できるようにソフトウェアで対策を講じている。この対策がとられている試験モードは放電試験モードとフィルム劣化試験モードであり、初期動作確認モードにはとられていない。

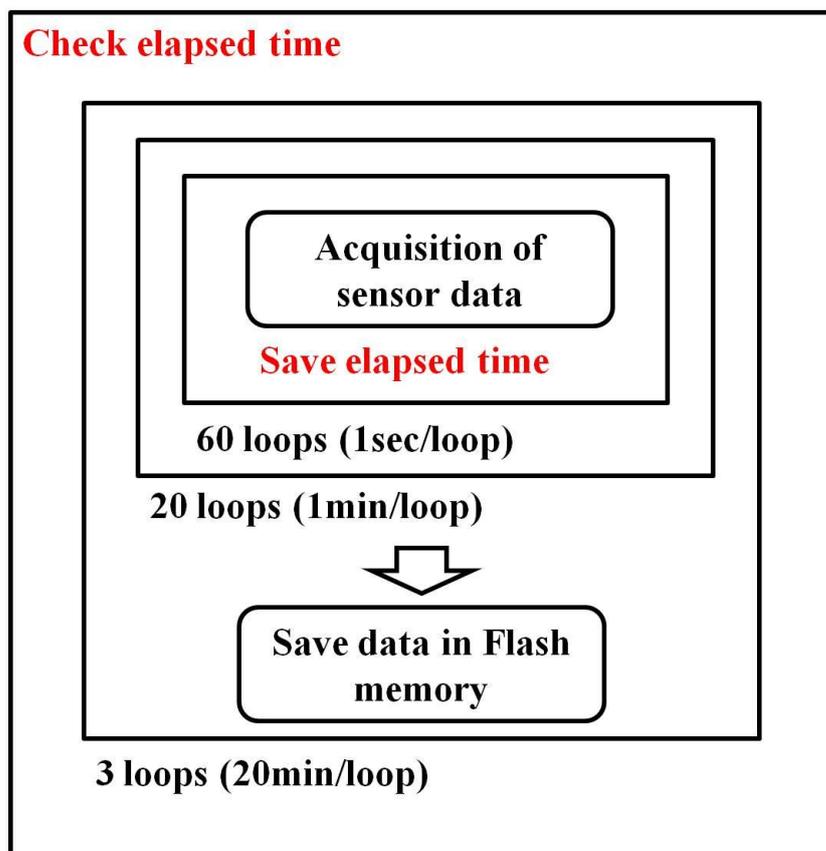
300V 系 CPU におけるハングアップに関しては、内蔵のウォッチドッグタイマ(WDT)をアクティブにすることで対策をとっており、放電による誤動作から短時間(5 秒以内)で正常動作に復帰できることを確認している。

ハードウェアとしては WDT で正常復帰することが可能であるが、経過時間や放電回数のように試験終了を決定する値は CPU の RAM に保存されているので、WDT による再起動や瞬停からの再起動ではそのような値を復帰できない(定期的にセンサデータとともに時間データの保存や放電が発生した場合放電データの保存をフラッシュメモリしているが、これらの解析により経過時間や放電回数を復元するのは複雑な処理になるので行っていない)。そのため、上述の”セクタ 0~2 のフラッシュ割り当て”で記したようにセクタ 0 の 8~15page に経過時間、セクタ 1 の 8~15page に放電回数(誤動作回数を含む)をハミング訂正符号なしで保存している。これらのデータを試験開始直後に読み取ることで指定の時間以内、放電回数内で試験を終了することができる。データの保存タイミングは図 4.8 に示しているように定期的に行われる。

また誤動作が発生した場合は試験開始直後に誤動作が発生したことを示すデータをフラッシュメモリに保存するようにし、また他にも保存先のアドレスが放電により狂ってしまった場合の対策もとっている(詳細は付録 C 参照)。



放電試験モード



フィルム劣化試験モード

図4.8 300V系動作状態の保存タイミング

Figure 4.8 Save timing of 300V system state

#### 4.8 OBC とのソフトウェアインターフェース

##### 試験開始直後

試験開始直後 300V 系 CPU は、各種設定を行った後フライト品検査試験時にセンサの接続をチェックするためのセンサデータの取得を行い PC 画面上に表示する。その後、OBC からの試験開始コマンドの解析、OBC によってセクタ 0~2 の 0page に書き込まれている保存先セクタ(3 冗長)を解析する。この解析で設定されていない試験モードや保存先セクタであった場合、試験は行われず、OBC に試験終了コマンドを送信し直ちに試験は停止される。

試験開始直後の OBC は数秒待ってから試験終了コマンドの監視を定期的に行う。これは 300V 系の電源 ON 直後はまだ磁気カプラの 2 次側(300V 系)に電源が供給されておらず 1 次側が全て High になってしまうこと(磁気カプラの特性)で試験終了コマンドが一瞬送られてしまうからである。

### 試験終了時

試験が終了すると保存されているデータ量からパケット数を計算し、表 4.4 の 12~14byte 目にデータを保存する。正常終了しなかった場合(例えば OBC による強制終了)、パケット数は保存されないが、地上局からのアップリンクコマンドによりダウンリンクパケット数は決定することができるのでこの部分のデータは必須ではない。

上記動作が終了すると、全てのスイッチを OFF(発電 OFF、バイアス OFF)にし、OBC に試験終了コマンドを送信する。この動作は 300V 系の電源が切られるまで続けられる。OBC とのソフトウェアインターフェースとして試験終了コマンドが 10 秒以上 High ならば、試験終了という取り決めをしている。これは 300V 系 CPU のハングアップにより誤って試験終了コマンドが送信されることや電源の瞬停により磁気カプラの 2 次側 (300V 系)に電源が供給されず 1 次側が全て High になってしまうこと (磁気カプラの特性)を考慮したインターフェースになっている。

### タイムアウト

300V 系の試験時間は最大で約 60min であるので、タイムアウトを 75min に設定した。OBC の時間のカウントにより 65min 以上経過しても試験終了コマンドが受信されなければ強制的に 300V 系を OFF にするようになっている。