



太陽電池パドル系設計標準

平成 28 年 5 月 20 日 B 改訂
(平成 21 年 7 月 8 日 初版制定)

宇宙航空研究開発機構

免責条項

ここに含まれる情報は、一般的な情報提供のみを目的としています。JAXA は、かかる情報の正確性、有用性又は適時性を含め、明示又は黙示に何ら保証するものではありません。また、JAXA は、かかる情報の利用に関連する損害について、何ら責任を負いません。

Disclaimer

The information contained herein is for general informational purposes only. JAXA makes no warranty, express or implied, including as to the accuracy, usefulness or timeliness of any information herein. JAXA will not be liable for any losses relating to the use of the information.

発行

〒305-8505 茨城県つくば市千現 2-1-1

宇宙航空研究開発機構 安全・信頼性推進部

JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency)

目 次

1. 適用範囲.....	1
2. 適用文書.....	1
3. 用語、定義および略語.....	1
4. 一般要求事項.....	1
5. サブシステム設計・解析.....	3
5.1 電気設計・解析.....	3
5.1.1 発生電力設計.....	3
5.1.1.1 アレイ回路構成要素設計.....	4
5.1.1.2 発生電力解析.....	5
5.1.1.3 アレイ回路構成（レイアウト）設計.....	8
5.1.1.4 太陽電池パドル/パドル駆動機構間インタフェース設計.....	11
5.1.1.5 シャントインタフェース設計.....	12
5.1.2 動作モード及び消費電力設計.....	13
5.1.3 電磁適合性設計.....	13
5.1.4 信号設計.....	13
5.1.4.1 信号配線の浮遊容量.....	13
5.1.4.2 シャント動作に伴う電力ラインからのノイズ影響考慮.....	13
5.2 構造設計・解析.....	14
5.2.1 パネルサブストレート設計.....	16
5.2.2 ブーム・ヨーク設計.....	17
5.2.3 保持解放部設計.....	17
5.2.4 構造解析.....	18
5.2.4.1 収納時構造解析.....	18
5.2.4.2 パドル展開後構造設計・解析.....	19
5.2.5 質量特性解析.....	21
5.3 機構設計・解析.....	21
5.3.1 展開機構設計.....	23
5.3.2 同期機構設計.....	23
5.3.3 展開設計・解析.....	24

5.4	熱設計・解析.....	25
5.4.1	熱設計.....	25
5.4.2	熱解析.....	27
5.5	パドル駆動機構設計.....	29
5.5.1	電気設計.....	29
5.5.2	機械設計.....	31
5.5.3	熱設計.....	32
5.5.4	耐環境性の検討.....	32
5.5.5	試験計画・試験項目の明確化.....	33
5.6	パドル駆動制御設計・解析.....	33
5.7	宇宙環境設計.....	35
5.7.1	放射線設計・解析.....	35
5.7.2	紫外線 (UV) 対策設計・解析.....	38
5.7.3	原子状酸素 (AO) 対策設計・解析.....	39
5.7.4	デブリ・マイクロメテオロイド対策設計・解析.....	39
5.8	耐帯電/放電対策設計・解析.....	40
5.9	実装設計.....	40
5.10	インタフェース定義.....	42
5.10.1	外部インタフェース定義.....	42
5.10.2	インタフェース分界.....	42
5.10.3	インタフェース条件.....	42
5.10.3.1	電氣的インタフェース条件.....	42
5.10.3.1.1	電源系インタフェース.....	43
5.10.3.1.2	テレメトリ・コマンドインタフェース.....	43
5.10.3.1.3	姿勢制御系インタフェース.....	44
5.10.3.1.4	その他の電氣的インタフェース.....	45
5.10.3.2	機械的インタフェース条件.....	45
5.10.3.3	熱的インタフェース条件.....	45
5.10.3.4	ダイナミクスインタフェース条件.....	46
5.10.3.5	視野インタフェース.....	47

5.10.3.6	可動部エンベロープ インタフェース.....	47
5.10.3.7	地上支援装置とのインタフェース.....	47
6.	検証.....	48
6.1	開発・検証計画.....	48
6.2	製造・試験.....	50
Appendix I	名称の定義.....	53
Appendix II	略語集.....	55

1. 適用範囲

本設計標準は、宇宙航空研究開発機構（JAXA）が開発する宇宙機の軽量リジッドタイプ太陽電池パドル系に適用することを目的として制定するものである。本設計標準の内容は、軽量リジッドタイプ太陽電池パドル系の設計及び開発に対して適用すべき主要要求事項を規定するものである。

2. 適用文書

JERG-2-141	宇宙環境標準
JERG-2-143	耐放射線設計標準
JERG-2-143-HB001A	耐放射線設計標準ハンドブック
JERG-2-144	微小デブリ衝突耐性評価標準
JERG-2-152A	擾乱管理標準
JERG-2-152-HB001B	擾乱管理マニュアル
JERG-2-200	電気設計標準
JERG-2-200-TM001	信号インタフェース例
JERG-2-211A	帯電・放電設計標準
JERG-2-212	ワイヤディレーティング標準
JERG-2-212-TM001	ワイヤディレーティング試験データ集
JERG-2-213A	絶縁設計標準
JERG-2-214	電源系設計標準
JERG-2-216-HB001	太陽電池パネル品質保証ハンドブック
JERG-2-310	熱制御系設計標準
JAXA-QTS-2130A	太陽電池セル共通仕様書

3. 用語、定義および略語

Appendix I に名称の定義、Appendix II に略語集を示す。

4. 一般要求事項

4.1 全般

宇宙機太陽電池パドル系は太陽光を電氣的エネルギーに変換するため、機能部分の大

半が宇宙機構体の外部に置かれ、打上げから宇宙機分離迄の「打上げ・上昇中の熱・機械環境」及び分離後の「厳しい宇宙環境」に長期間直接的に曝されつつ、全ミッション期間にわたって宇宙機が必要とする電力を発生しなければならない。

4.2 構成と構成要素

軽量リジッドタイプ太陽電池パドルとは、CFRP 表皮のアルミハニカムサンドイッチ構造をサブストレートとして、ソーラーアレイを貼った太陽電池パネルを主要構成要素とした太陽電池パドルである。

軽量リジッドタイプ太陽電池パドル系の構成概要例を図 4-1 に示す。

宇宙機のミッション要求及び発生電力要求等により各構成要素の要否は異なるため、開発にあたっては各宇宙機でのミッション要求等に基づき必要な機能構成を設定すること。また、大電力が要求される大型の太陽電池パドル系では、地上試験装置の制約等からパドル全系での検証が困難な場合もあり、開発の検証においては各構成要素の検証の積み上げを含め、太陽電池パドル系構成に応じた適切な開発計画及び検証計画を立案し、設計の妥当性及びフライト品の健全性を確認しなければならない。

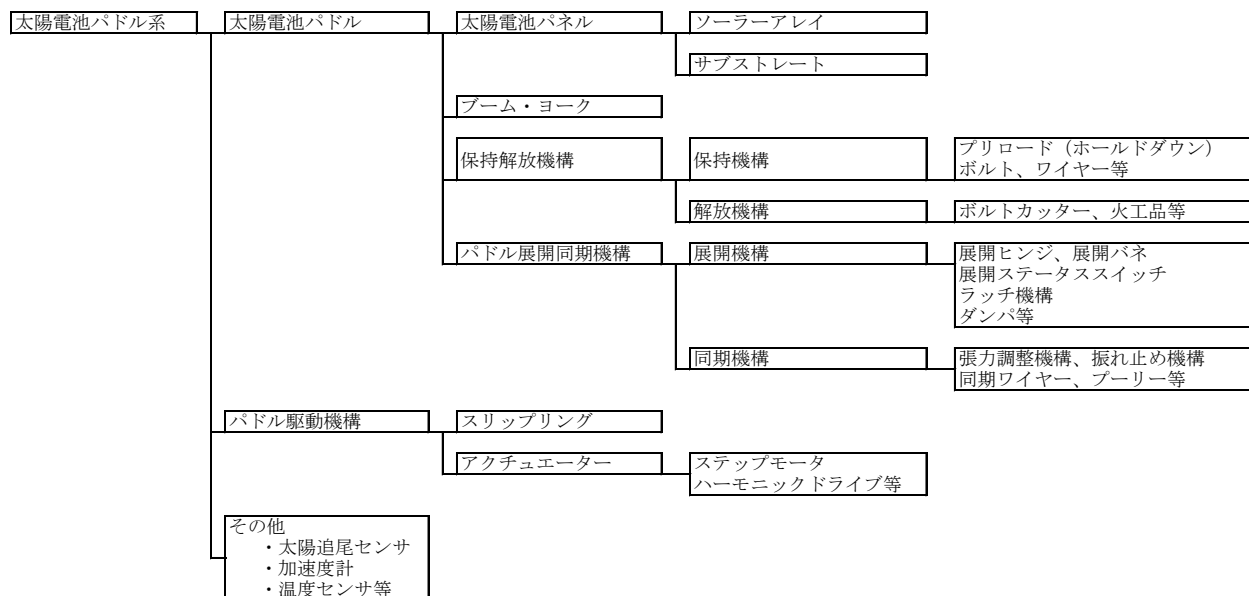


図 4-1 軽量リジッドタイプ太陽電池パドル系構成例

5. サブシステム設計・解析

5.1 電気設計・解析

ここでは太陽電池パドル電気設計に注意すべき設計事項及び解析について述べる。

5.1.1 発生電力設計

発生電力設計にあたっては、以下の設計項目及び設計内容に留意し、ミッション期間を通してシステム要求電力を満足すること。

(1) 太陽電池セルタイプの選択、アレイ回路構成（直並列回路数）の検討

(2) 直並列回路数の検討においては、発生電力解析の実施において直列抵抗影響、温度特性、放射線等宇宙環境影響による劣化及びカバーガラス、接着剤ロス等を考慮すること。

図 5-1 に発生電力解析の概略フローを示す。

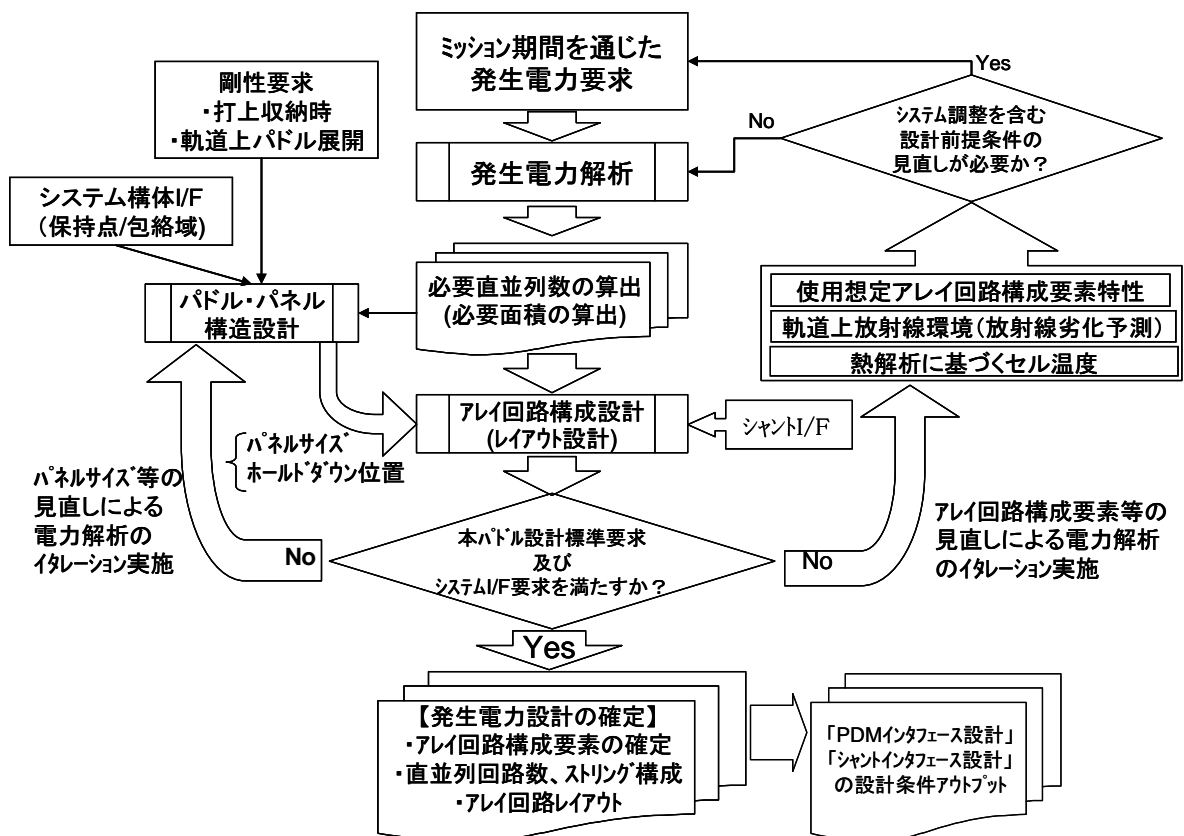


図 5-1 発生電力設計概略フロー

5.1.1.1 アレイ回路構成要素設計

「太陽電池セル共通仕様書」JAXA-QTS-2130A を参考に、要求仕様を明確にすること。特に、アレイ回路構成要素の設計に於いては以下の内容を明確にすること。

(1) 太陽電池セル

太陽電池セル外観及び以下の仕様を明確にすること。また専用チャージアレイを有する場合は、その仕様についても同様に明確にすること。

(a) セルタイプ

(b) 出力パラメータ（短絡電流 I_{sc} 、開放電圧 V_{oc} 、最大電力電流 I_{mp} 、最大電力電圧 V_{mp} ）
尚、最大電力電流 I_{mp} は電流出力グループを考慮したベアセルでの平均最小負荷電流（ミニマムアベレージ）を明確にすること。

(c) BOL 及び EOL での発電効率

(d) セルサイズ（縦×横×厚み）

(e) 平均質量

(2) カバーガラス

カバーガラス外観及び以下の仕様を明確にすること。

(a) ガラスタイプ(型名)

(b) 基板材料

(c) コーティング

(d) ガラスサイズ（縦×横×厚み）

(e) 平均質量

(f) 太陽光透過率及び UV 劣化率

(3) インターコネクタ、バスバー

インターコネクタ・バスバー外観・形状及び以下の仕様を明確にすること。インターコネクタ・バスバーの製造にあたっては、縁部分にバリが残らないように設計指示すること。

(a) 材料

(b) 厚さ

(c) 平均質量

(4) 影対策用バイパスダイオード

影対策用バイパスダイオード外観及び以下の仕様を明確にすること。

- (a) 順方向電圧 V_f
- (b) 逆方向電流 I_r
- (c) 形状
- (d) 平均質量

(5) CIC

上記太陽電池回路構成要素のうち、太陽電池セルにインターコネクタを溶接しカバーガラスを接着したものを一般的にCICと称するが、これ等アセンブリに対して以下の仕様を明確にすること。

- (a) インターコネクタ溶接強度（45度ピール強度）
- (b) CIC状態での表面特性（ α 、 ε ）
- (c) CIC状態での電流出力グループ分類

5.1.1.2 発生電力解析

発生電力規定点はパドル駆動機構出力端としシステムとのインタフェース電圧での発生電力を解析する。

熱解析及び放射線解析の結果を踏まえ、ミッション期間を通してシステム要求電力を満たす太陽電池アレイ回路全体のV-Iカーブ特性を示した上で必要な直並列数を設計すること。特にMPPT制御を行う場合は、複数のアレイ回路間でV-Iカーブ異なる場合、複数の発生電力極大値が発生することから、MPPT制御ロジックを考慮した直並列数を設計すること。併せて、BOL~EOL間の発生電力春夏秋冬トレンドを明確にすること。

発生電力解析は開発のフェーズに合わせて、解析の前提となる太陽電池出力パラメータを適切に考慮すること。

- ・設計フェーズ；太陽電池セル適用データシート等で提示される太陽電池出力分布及びそれを踏まえたCIC状態での電流出力グループ分布を考慮すること。
- ・製造・試験フェーズ；照射試験で実測されたアレイ回路出力特性の反映。

上記解析前提条件の他、下記の解析パラメータを明確にして発生電力解析を実施すること。

(1) 太陽光強度

1 天文単位 (1AU=地球と太陽間平均距離) での AM0 太陽光強度 (太陽定数) の詳細は、JERG-2-141 宇宙環境標準によるが、参考として下記に示す。

- ① 太陽光強度=1366 W/m²@1AU
- ② 太陽光強度の不確定性(黒点数等による変動及び計測誤差を含む)=±10W/m²
- ③ 太陽-地球間距離変化による太陽放射強度季節変動 (上記②不確定性分を含まない) の概略値は表 5-1 の表による。 また、表中の誤差 (1σ) は0.6W/m²である。

従って発生電力解析に用いる太陽光強度は概ね以下の式にて表される。

$$\text{太陽光強度 max/min}=(1366\pm 10\text{W/m}^2)\times(\text{太陽-地球間距離変化季節変動率}+3.36\%/ -3.22\%)$$

表 5-1 太陽放射強度季節変動の概略値

月	太陽放射強度 W/m ²
1月3日(近日点)	1412
2月	1406
3月	1391
4月	1368
5月	1345
6月	1329
7月4日(遠日点)	1322
8月	1326
9月	1342
10月	1363
11月	1387
12月	1405

(2) 太陽光入射角

地球周回宇宙機に於いては、静止衛星では±23.4deg、極軌道衛星では降交点通過地方時及びキャントパドルではキャント角度を考慮すること。

(3) パドル追尾角誤差

解析のベースとして想定される追尾誤差を考慮すること。

(4) 太陽電池セル温度

熱解析結果から得られる軌道上ノミナル予測温度に対し想定される温度予測誤差マージンを考慮すること。

地球周回宇宙機での想定温度予測誤差マージン実績については、技術資料参照。

ここで言う温度予測誤差マージンとは、設計の不確かさに対応するもので、＜最大予測温度範囲＞－＜設計予測温度範囲＞に相当するものである。通常この温度予測誤差マージンには10℃以上を使用するが、軌道上実績があり類似の環境で使用される場合は、プロジェクトの技術判断により適切な温度マージンを設定すること。

(5)放射線被曝量による太陽電池セル各出力パラメータの保存率

(6)太陽電池セル各出力パラメータ温度係数

放射線被曝により温度係数が変化することを考慮すること。

(7)カバーロス及び紫外線劣化率

(8)ラインドロップ（ハーネス抵抗）

分離ダイオード、インターコネクタ抵抗及びそれらの温度特性を考慮すること。

(9)パドルV-I特性の測定誤差

ソーラーシミュレータを用いたV-I特性測定の誤差要因として、光源設定誤差、照度分布誤差及び測定誤差を考慮すること。

(10)ヨーステアリング及び姿勢誤差

ヨーステアリング等による姿勢角プロファイル及びそのプロファイルに対する姿勢誤差を考慮すること。

(11)反射板または集光板を有するパドル

反射板または集光板を有するパドルは、その反射・集光効率を考慮すること。

(12)影影響

パドルセル面に宇宙機構体又は搭載物の影が落ちる場合は、影の影響を考慮した電力解析を行うこと。また IBF(Integrated Bypass diode Function)機能を有する太陽電池セルを採用する場合には、影の影響（特に影の発生する太陽電池セル範囲）での逆バイアス発熱によって太陽電池セル・サブストレート等の許容範囲を超える高温状態にならないように注意すること。

(13) プルーム

セル面への推進系プルームの影響を考慮すること。特に、電気推進の場合、カバーガラスやインタコネクタへのエロージョンが発生するため、イオンの密度、エネルギーを考慮して、エロージョン量を評価し、発生電力の劣化量を見積もること。尚、電気推進用スラストの搭載位置、キャント角度を適正化すれば、劣化量を抑制することが可能である。

その他、不確定誤差/マージンとして下記の要因を考慮すること。

(a) 太陽電池回路ランダム故障

スペースデブリ等によるランダム故障マージンとして発生電力の 5%程度または1アレイ回路の内、大きい方を推奨する。

地球周回宇宙機での発生電力変動実績については、技術資料を参照のこと。

(b) ESD によるロス

詳細は JERG-2-211 帯電・放電設計標準によるが、ESD(Electrical Static Discharge)の影響については、以下の検討に基づき発生電力解析に反映すること。

- ① ミッション期間中での放電発生頻度を解析する。
- ② 必要に応じクーボンパネル試験により発生電力劣化率を把握する。
- ③ 上記2つの条件から発生電力劣化率を解析する。

5.1.1.3 アレイ回路構成（レイアウト）設計

発生電力解析から求められた直並列回路数に基づき、パネルとしての必要面積を確定した後、下記の点を考慮してアレイレイアウトを実施すること。

(1) 1アレイ回路の並列回路数

電源系シャント素子との I/F を満たす範囲でのアレイ回路(1シャントに対応する並列アレイ回路群)構成とすること。 持続放電回避の為に1アレイ回路電流上限値は、JERG-2-211 帯電・放電設計標準の要求に準拠するか、若しくは下記(2)分離ダイオードを1直列回路毎に設置すること。

(2)アレイ回路内の1直列回路毎の分離ダイオードの設置

故障分離及び持続放電回避の観点から、1直列回路毎の分離ダイオードを設置することを考慮すること。

(3)CICの電流出力グループグルーピング

CIC アセンブリ後に各CICの出力特性を取得し、出力レベル毎にグルーピングし、特定のCICが出力制限セルとならない様にCICモジュールのアセンブリに適用すること。

(4)CIC配置位置

発生電力の有効利用の観点から、配線ロスとシャント I/F の上限電流を考慮して、電流出力グループによるCICモジュールの配置を最適化すること。

(5)保持点周辺のレイダウン考慮

構造設計から要求される収納時保持点位置と調整を取りつつ、その周辺においては下記の観点を考慮しCICレイダウンを行うこと。

- (a) ボルトキャッチャ等による定常的な影の発生する箇所へのCICレイダウン回避。
- (b) アレイ高電位部分がホールドダウンに近接する場合には持続放電発生を回避可能な距離の確保。

(6)隣接セル電位差の考慮

太陽電池アレイのレイアウト設計において、別アレイ回路又は自身の折返した隣接するセル間の電位差は持続放電回避の為に、JERG-2-211 帯電・放電設計標準の要求に準拠するようにレイアウトすること。 また別アレイ回路間の電位差を評価する際には、シャント動作による電位差も考慮すること。

(7) 磁気モーメントの抑制

太陽電池パネル上に発生する磁気モーメントを抑える為、セルの配置及びハーネスの引き回しについて以下の点に配慮し、太陽電池パネル内で発生する磁気モーメントがキャンセルできる様な設計を考慮すること。

- (a) 太陽電池パネル内の太陽電池アレイ回路の極性は可能な限り線対称となるようなレイアウトとすること。
- (b) 太陽電池アレイ各回路からパドル駆動装置とインタフェースするコネクタまでのハーネスレイアウトは、その電流ループに伴う磁界の発生が最小限となるようにすること。

(8) 影対策用バイパスダイオードの設置

通常の姿勢状態で軌道周回をしている状態若しくは姿勢喪失時に宇宙機搭載構造物の影が太陽電池パネル面に落ちる場合には、影となったセルが逆バイアス状態となる。最悪のケースは1直列回路中の1枚のセルのみが完全に影となる場合であり、セルの逆バイアス耐圧を超えてブレークダウンを起こさない様にする為、影対策用バイパスダイオードを設置すること。一般的なシリコンセルでは逆耐圧が30V程度ある為、30直列程度毎に影対策用バイパスダイオードを設置する事が望ましいが、逆耐圧は温度依存性が有る為、使用する太陽電池セルの温度特性・ばらつきを把握し適切なディレーティング(50%以下を推奨)を考慮の上挿入段数を設定すること。また一般的にIII-V化合物系太陽電池セルは逆耐圧が低い為、セル1枚毎に影対策用バイパスダイオードを設置すること。影対策用バイパスダイオード部品選定にあたっては、ディレーティング(50%以下を推奨)を考慮した上で1直列回路分の電流を通電可能な品種を選定すること。尚、セルの種類によってはバイパス機能内蔵 (IBF; Integrated Bypass diode Function) のセルがあり、IBFセル使用の場合には、独立した影ダイオードを省略できるので、パネルインテグレーションの簡素化等を図る事が可能である。

(9) チャージアレイレイアウト

チャージアレイを有する太陽電池パドルでは、チャージアレイのレイアウトに対して下記の点に配慮すること。

- (a) ESDによる電力低下リスクへの配慮

帯電解析に基づき、ESD によるチャージアレイの発生電力低下リスクを少なくする位置へのアレイレイアウトを考慮すること。

(b) 宇宙機本体等影影響の最小化

宇宙機本体等によるチャージアレイ上に落ちる影の影響による発生電力低下を少なくする位置へのアレイレイアウトを考慮すること。

5.1.1.4 太陽電池パドル/パドル駆動機構間インタフェース設計

太陽電池パドル/パドル駆動機構間での電氣的インタフェース設計として、

- 1) 「パドル駆動機構スリップリング設計」
- 2) 「アレイ回路発生電圧とスリップリング耐圧設計」
- 3) 「スペアリングの処置」
- 4) 「グラウンドラインへの設計注意点」

について、下記設計配慮を行うこと。

(1) パドル駆動機構スリップリング設計

発生電力解析、テレメトリ（温度センサライン、角度検出信号ライン等）／コマンド、ヒータライン及びグラウンドライン等の設計に基づき、パドル駆動機構に必要なスリップリングの電気設計（リング電流量及びリング数）を行うこと。またスリップリング電流量選択においてはディレーティング（50%以下を推奨）を考慮すること。

電力用 HOT 側リングの電流量を決定するにあたっては、シャントがパドル駆動機構より太陽電池アレイ側に搭載（所謂ヨーク搭載）されるか、宇宙機構体側に搭載されるかによってリング容量選択条件が異なる。構体側搭載の場合は、電力用 HOT 側リング容量はシャント素子に繋がる 1 アレイ回路に対応する電流量のスリップリングを選択すること。ヨーク搭載の場合は HOT/RTN リングとも選択可能な範囲で大容量スリップリングを使用可能である。

尚、電力用スリップリング容量選択においては、姿勢異常等も含めたワーストケース（発生電流が最大となる条件（BOL、太陽光垂直入射、高温条件及びアレイ回路シャント状態））に対してディレーティングを考慮し選定すること。

また、太陽電池アレイカバーガラス等の未接地絶縁物の帯電・放電による容量性サージ電流が、スリップリング、ハーネス及びコネクタ（コネクタピンを含む）を流れる可能性が有る。放電によるサージ電流は、最大 100A 程度、継続時間は数十 μ 秒程度（絶縁物容量及び帯電

電位等に依存する) であるが、スリップリング等の容量選定においては、本容量性サージを考慮することが望ましい。

(2) アレイ回路発生電圧とスリップリング耐圧

隣接するスリップリング間耐圧及びブラシ間耐圧については、太陽電池アレイが発生する最大電圧(電源(EPS)系インタフェースにおけるPDM出力端電圧)及びその他信号電圧に対して、十分な放電耐性を有する沿面距離及び空間距離を設計配慮すること。また耐圧距離設計に際しては、スリップリング/ブラシ間摺動による磨耗粉の影響も考慮すること。尚、ハーネス、コネクタも含めた開放モード故障に関しては、常にワーストケース電圧に対して検討すること。

(3) スペアリングの処置

帯電・放電の観点より(詳細はJERG-2-211帯電・放電設計標準による)、浮遊導電体を残さない為に、スペアリングについては接地処置すること。また、大電流を流しうる信号が隣接リングに配置されている空きリングは、接地を行う際には抵抗を挿入することが望ましい。

(4) グランドラインへの設計注意点

ブリーダ抵抗(グランドライン抵抗)を実装せずに、太陽電池アレイのサブストレート地絡の許容を前提とする設計を取る場合には、想定する最大地絡電流に対して十分許容範囲となるスリップリング数及びグランドラインワイヤ電流容量を設計考慮すること。

5.1.1.5 シャントインタフェース設計

発生電力解析に基づき、シャント回路に対し最大許容電流を満たす設計であることを明示すること。

太陽電池パドル/シャント間の電氣的インタフェース設計として、電流及び電圧に対し下記の設計を考慮すること。

(1) 電流インタフェース

1 アレイ回路の電流容量設計は、姿勢異常等も含めたワーストケース(発生電流が最大となる条件(BOL、太陽光垂直入射、高温条件及びアレイ回路シャント状態))において、ディレーティングを踏まえたシャント素子の許容電流を超えないこと。

(2) 電圧インタフェース

シャントがパドル駆動機構より太陽電池アレイ側に搭載（所謂ヨーク搭載）される設計で、衝撃環境等によりブラシチャタリングが想定される場合には、アレイ回路発生電圧としてワーストケース電圧（BOL、低温条件及びアレイ回路開放状態）に対してシャント素子耐圧との整合性について確認すること。不整合である場合には、電源系シャント設計に対し対策の必要性を明示すること。

5.1.2 動作モード及び消費電力設計

パドル系サブシステムの各動作モードに於ける消費電力を明示すること。主にはパドル駆動機構駆動電力、ダンパヒータ電力等である。

5.1.3 電磁適合性設計

接地系統設計、ボンディング及び電磁干渉限界について設計要件を記載すること。

5.1.4 信号設計

5.1.4.1 信号配線の浮遊容量

太陽電池パドルのテレメトリ設計においては、展開ステータス信号、パネル温度等は PA（パッシブアナログ）テレメトリを用いる場合がある。太陽電池パドルではこれらの信号配線経路が長くなること及び温度（低温環境）の影響から、配線浮遊容量に係わる時定数が大きくなる。これは大型の太陽電池パドル地上試験で、低温環境を模擬した宇宙機システムとの End-to-End 試験による整合性確認が困難な部分である。従ってデータハンドリング系のデータサンプルタイミングと上記 PA テレメトリ信号の時定数との整合性に対して設計及び解析にて考慮すること。（浮遊容量の低減、サンプルタイミングインタフェース整合性確認、アクティブアナログによる設計対応、若しくは展開後の時定数を小さくする展開ステータス設計）

5.1.4.2 シャント動作に伴う電力ラインからのノイズ影響考慮

太陽電池パドルの信号ライン（温度テレメトリ等）については、電力ラインからのシャント動作に伴うノイズの影響を受けやすい。大型の太陽電池パドル地上試験では、宇宙機システムとの End-to-End 試験による整合性確認が困難な部分である。従って信号ラインに対しては、必要

ならば展開信頼性に支障の無い範囲でシールド線の採用、若しくはラインルーティングにおいて電力ラインとの分離等の設計配慮を行うこと。対処が困難な場合には、ノイズ影響を受けやすい信号ラインは、テレメトリモニタのみの機能配分として設計し、オンボード制御等に使用しないこと。

5.2 構造設計・解析

ここでは太陽電池パドル構造設計に関して、注意すべき設計事項及び解析について述べる。

構造設計・解析を実施することにより確認する設計項目を以下に示す。また、構造設計フローを図 5-2 に示す。

- ・太陽電池パドル収納状態においては、宇宙機システムから提示される荷重条件に対して必要な強度を有し、太陽電池パドル系への剛性要求を満足すること。構造設計・解析の際は、打上げ時加速度・正弦波振動試験時加速度・累積疲労・音響環境・衝撃環境・構体／太陽電池パドル間熱荷重等に配慮すること。また、太陽電池パドル系に他サブシステム機器が搭載される場合には、機器搭載部の機械環境について適切なインタフェースを設定すること。また、太陽電池パドル取付け部のシステム構体側剛性不均等による荷重集中を配慮すること。
- ・太陽電池パドル展開動作時においては、展開ラッチの衝撃に対して十分な強度を有すること。
- ・太陽電池パドル展開状態においては、宇宙機軌道制御や姿勢制御などの外乱に耐える強度を有するとともに、姿勢制御系とのインタフェース要求を満足する剛性を有すること。また、サーマルスナップなど太陽電池パドルが振動源となる軌道上擾乱に対しても、姿勢制御系とのインタフェース要求を満足する必要がある。

構造設計フロー

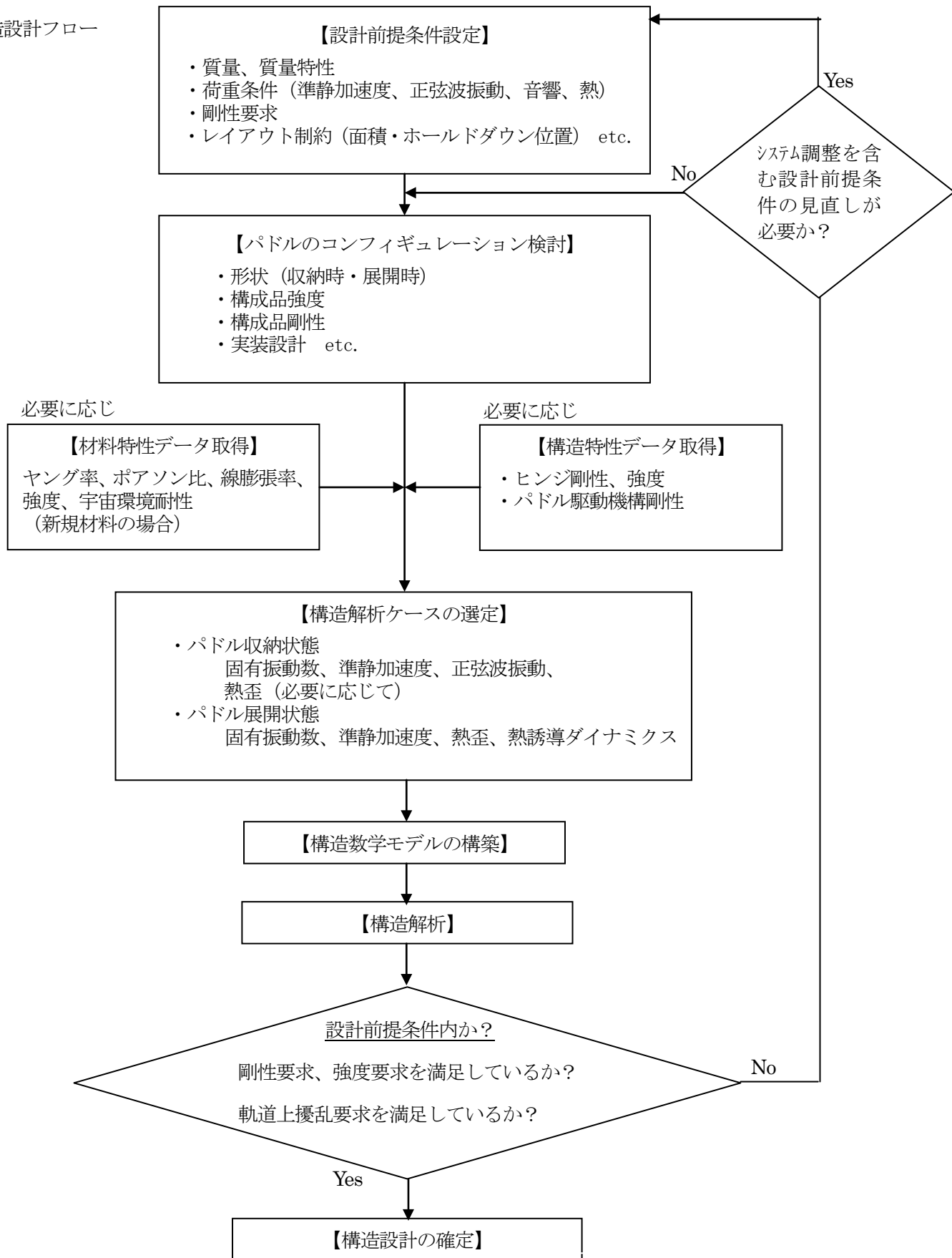


図5-2 構造設計フロー

5.2.1 パネルサブストレート設計

サブストレートは太陽電池パドルの主要部品である太陽電池アレイを搭載するパネルである。サブストレートに関する設計項目を下記に示す。

- ・サブストレートは太陽電池パドルの主要構造部材であり、通常は軽量・高剛性を実現するためにCFRP フェースシートハニカムパネル構造を採用する。サブストレート表面のCFRP フェースシートは導電性材料のため、太陽電池アレイ搭載面にはポリイミドフィルムを貼り付け短絡を防止する必要がある。レイダウン開始前にポリイミドフィルムの絶縁抵抗確認を行うこと。
- ・ハニカムコアはパーフォレーションが確実に開いていることを確認して使用すること。t10（10mm厚）以下を使用する場合は、パーフォレーションが無いことの影響に注意すること。
- ・太陽電池セル面が高温になるのを防ぐために、サブストレート裏面に熱制御材を貼り付けるか、又は、面粗さを大きくし放射率を向上させること。
- ・サブストレートホールドダウンについては、接合面が軌道上で固着することを防ぐために表面処理を施すか、表面処理を施したパッドを噛ませて使用すること。また、展開の際に、宇宙機構体／パドル間の線膨張差により、ホールドダウン同士が接触して展開を阻害することが無いように配慮すること。
- ・サブストレートは厳しい温度環境に晒されることが多いため、CFRP との接着物には線膨張係数差が極力小さい材料を選定すること。接着剤の使用に関しては十分に厚みを管理し、熱環境化で割れが発生しないよう配慮すること。使用温度範囲内でガラス転移点が存在する材料については、最高・最低温度での物性値を使用して評価を行うこと。
- ・サブストレートに搭載する金属材料は全て宇宙機と電氣的に結合されている導通基準点（サブストレートのグラウンドポイント）と電氣的に結合し、電位差が生じないように配慮すること。ハニカムコアを連結して使用する場合でも、ハニカムコア間の電氣的結合が取れるよう配慮すること。
- ・宇宙機搭載時にサブストレートと宇宙機構体の熱歪差による損傷が発生しないように配慮すること。
- ・サブストレート角部・中央部など振動環境下で変位が大きい部位には接触防止処置を施すこと。接触防止処置部には固体潤滑やセラミクス皮膜処理を施し、軌道上で接合部が固着しないように配慮すること。また、展開を阻害することが無いこと。

5.2.2 ブーム・ヨーク設計

ブーム・ヨークは軌道上において太陽電池パネルを宇宙機本体から適切な距離まで展開し保持する機能を有する。ブーム・ヨークの設計は、宇宙機搭載物の影の範囲や、質量特性要求、宇宙機本体構造部材配置（ハードポイント）、太陽電池パドル同期機構レイアウト、ハーネスレイアウト等を条件に決定する。

ブーム・ヨークに関する設計項目を下記に示す。

- ・ブーム・ヨーク部材長さは、宇宙機システムの要求（宇宙機搭載物影解析、質量特性解析）に従い設定すること。
- ・ブーム・ヨーク部材と太陽電池パネル間の距離を確認し、ブーム・ヨーク部材が振動環境で振れた際にもパネルに接触しないよう部材設計を行うこと。
- ・ハーネス配線について、特に宇宙機構体に近い部位については宇宙機構体からの照り返しでハーネス温度が上昇しやすい状態であることに配慮し、できるだけ太陽光が直射する位置に配線しないようにすること。太陽光が直射する位置に配線することが避けられない場合は、MLI や SLI で遮蔽すること。
- ・ホールドダウン部の固着について、サブストレートと同様の設計配慮を行うこと。
- ・CFRP 部材への接着に関して、サブストレートと同様の設計配慮を行うこと。
- ・ブーム・ヨークに搭載する全ての金属材料に関して、電気的結合を取ること。

5.2.3 保持解放部設計

保持解放部は、宇宙機打上げ時に太陽電池パネルやブーム・ヨークなどの被保持物をボルト等でスタックして保持し、火工品等の保持解放部品を内蔵し、軌道上で解放する機能を持つ。

保持解放部に関する設計項目を下記に示す。

- ・保持解放動作の際に、プリロードボルトがどのような軌跡を取ったとしても他構造部材と接触しないことが望ましい。接触する場合には、引掛かりが発生して展開を阻害しないよう十分に確認すること。
- ・保持解放後のプリロードボルトが逆行して戻らないようにするために、戻り防止のばね材を設けるなどの処置を行うこと。
- ・ホールドダウン部の固着について、サブストレートと同様の設計配慮を行うこと。
- ・システム構体への搭載条件を考慮し、必要に応じて保持コンソール位置決め用のテンプレートを用意すること。

- ・火工品を搭載する場合には火工品の位置決めが容易であること。また、火工品へのアクセスが容易であること。
- ・システム側 EED ハーネスとの結合インタフェースを明確に設計すること。EED ハーネス側の MLI 等の有無、パドル構造部材展開軌跡との干渉が無いことを確認すること。
- ・保持コンソールに MLI 等を装着する場合には、テープの有無などシステム構体側 MLI とのインタフェースを明確にすること。
- ・ワイヤなどで、搭載する火工品との電氣的ボンディングをとること。
- ・保持解放発生衝撃について、システム構体と適切なインタフェースを規定すること。サブシステムレベルで確認試験を実施する場合には、治具構成などできるだけ実機と合わせたコンフィギュレーションとすること。

5.2.4 構造解析

5.2.4.1 収納時構造解析

- ・収納時固有値解析を実施し、太陽電池パドルへの剛性要求を満足することを確認する。
システム構体との境界条件を明確にすること（通常は完全固定）。
- ・打ち上げ時加速度荷重強度解析及び正弦波振動試験時強度解析を実施し、太陽電池パドルへの強度要求を満足することを確認すること。
強度評定の例を下記に示す。なお、実機の強度評価の際は、できるだけ実機を模擬したモデルの試験結果を使用すること。

－材料破壊 (Tsai-Wu)

－フェースシート層間せん断

－表皮座屈 (イントラセルバックリング(*1)またはリンクリング(*2))

－インサート接合部評価 (口開き、滑りなど)

(*1)ハニカムパネルフェースシートがハニカムコアセル内の領域で座屈する破壊モード

(*2)ハニカムパネルフェースシートが小さい波長でハニカムコアセルコアの壁面を横切って座屈し、荷重が伝えられなくなりパネルが破損する破壊モード

5.2.4.2 パドル展開後構造設計・解析

(1) 展開後柔軟構造モード

太陽電池パドル系サブシステム側は、軌道上において正常に展開を完了した後の太陽電池パドル系の柔軟構造を、構造解析用有限要素法等（有限要素法、微分方程式数値解、微分方程式解析解、等）を用いて解析すること。モデル化・解析の対象は太陽電池パドル系全体とし、パドル駆動機構を持つ場合は、パドル駆動機構も含めること。解析には、宇宙機本体取り付け部を完全に剛なインタフェース面と仮定する Fix-Free の境界条件を適用すること。この解析により、最低次モードから宇宙機システム側と調整し規定した周波数帯までの固有振動数と、それぞれに対応する 0 次及び 1 次の結合係数ベクトルとモード減衰比を示すこと。また、これらの柔軟構造パラメータとそれぞれの許容誤差を規定し、宇宙機システムに提示するとともに、これらの柔軟構造パラメータとその許容誤差が、宇宙機システムが規定した柔軟構造パラメータの許容範囲に入っていることを確認すること。

宇宙機システム側では、サブシステム側から提示された Fix-Free 境界条件の柔軟構造パラメータを宇宙機モデルに組み込み、Free-Free 境界条件の柔軟構造パラメータを求め、このモデルを用いて宇宙機ダイナミクスや姿勢制御・姿勢安定の解析を行うこと。この際、宇宙機本体側の取り付け部の柔軟性も考慮すること。また、宇宙機システム側からの柔軟構造パラメータとその許容誤差を規定すること。特に、最低固有振動数を規定するのみでなく、姿勢制御・安定の必要に応じて、低次固有振動数の許容周波数帯を規定すること。

以上の解析・規定・評価を、必要に応じて、主要な展開異常モードに対しても行うこと。

展開後柔軟構造モードの検証については、少なくとも、個々の部品ないしは類似部品の剛性計測結果の積み上げにより全体モードを構築することにより行うこと。なお、サブシステムレベルの実機検証において、展開状態での剛性を静的に計測し、展開状態での低次柔軟構造モードの固有振動数を確認すること。

(2) 軌道上熱歪解析

サブシステム側は、軌道上で展開完了した後の太陽電池パドル系に対し、熱解析用有限要素法等（有限要素法、微分方程式数値解、微分方程式解析解、等）を用いて、熱的に定常サイクル状態に達した後の各部の周回温度変動を解析すること。この際、宇宙機本体の熱的影響とパドル（宇宙機本体）の回転を解析に考慮すること。また、パドル表裏の温度変化をモデル化すること。こうして求めた温度分布プロファイルを構造解析用有限要素法等（有限要素法、微分方程式数値解、微分方程式解析解、等）に入力し、姿勢の無制御状態における太陽電池パドル系の軌道周回の変形プロファイル（準静的熱歪プロファイルと動的応答プロファイル）と取り付け点トルクを求めること。このうち、食入り直後と食明け直後に発生する、日照中平衡状態と日陰中平衡状態間の準静的熱歪変動と動的応答からなる過渡応答を熱誘導ダイナミクスと呼ぶ。

(3) 強度解析

以下の荷重入力に対して、構造解析用有限要素法等（有限要素法、微分方程式数値解、微分方程式解析解、等）を用いて、太陽電池パドル系各部の強度解析を行い、M. S. が正であることを確認すること。

a) スラスタ噴射時及び大トルク印加時の太陽電池パドル系取り付け部への加速度、角加速度入力。この際、慣性はもとより、太陽電池パドル系の熱歪による変形に起因する重心オフセットを考慮すること。

b) (2)項の解析に基く太陽電池パドル系の軌道周回中の熱的要因による変形（準静的熱歪プロファイルと動的応答プロファイル）。

c) パドル駆動に伴うパドル駆動機構と太陽電池パドル及び宇宙機本体の連成振動。

また、特に、b)項、c)項については、ミッション期間中に印加されるサイクルに対する疲労耐性についても確認すること。その際、機構部のみでなく、サブストレートのような構造部材や、太陽電池セルのような電気部品、およびそれらの複合物の耐性についても確認すること。

(4) 熱誘導ダイナミクス解析

サブシステム側では、前述(2)項の熱歪解析における日照平衡状態と日陰平衡状態の間の過渡応

答の結果に基づき、Fix-Free 境界条件での熱誘導ダイナミクス解析を行うこと。解析は、有限要素法、運動方程式数値シミュレーション、解析解等によること。解析の結果得られたパドルの変形プロファイルや取り付け点反力トルク、重心変動、等を宇宙機システム側に提示すること。

宇宙機システム側では、サブシステム側の解析に基づき、宇宙機本体や他の柔軟構造、姿勢制御系の寄与も含めた熱誘導ダイナミクス解析を行い、擾乱として姿勢制御や姿勢安定化に与える影響を評価すること。

5.2.5 質量特性解析

- ・太陽電池パドルの実測値に基づいた質量評価を行い、太陽電池パドル質量要求を満足することを確認する。
- ・収納状態での質量特性解析を実施し、太陽電池パドル質量特性要求を満足することを確認する。質量特性試験実測値を元に解析モデルのチューニングを行い、全座標軸に対する質量特性値を算出する。
- ・軌道上展開状態での質量特性解析を実施し、太陽電池パドル質量特性要求を満足することを確認する。質量特性試験実測値を元に解析モデルのチューニングを行い、全座標軸に対する質量特性値を算出する。

5.3 機構設計・解析

太陽電池パドル機構部品（展開機構、同期機構）は、太陽電池パネルを軌道上で展開し、全ミッション期間に渡り展開状態を維持する機能を持つ。また、宇宙機軌道制御や姿勢制御などの外乱に耐える強度を持ち、姿勢制御系とのインタフェース要求を満足する剛性を有する必要がある。

ここでは太陽電池パドル機構設計に関して、注意すべき設計事項及び解析について述べる。

図 5-3 に機構設計フローを示す。

機構設計フロー

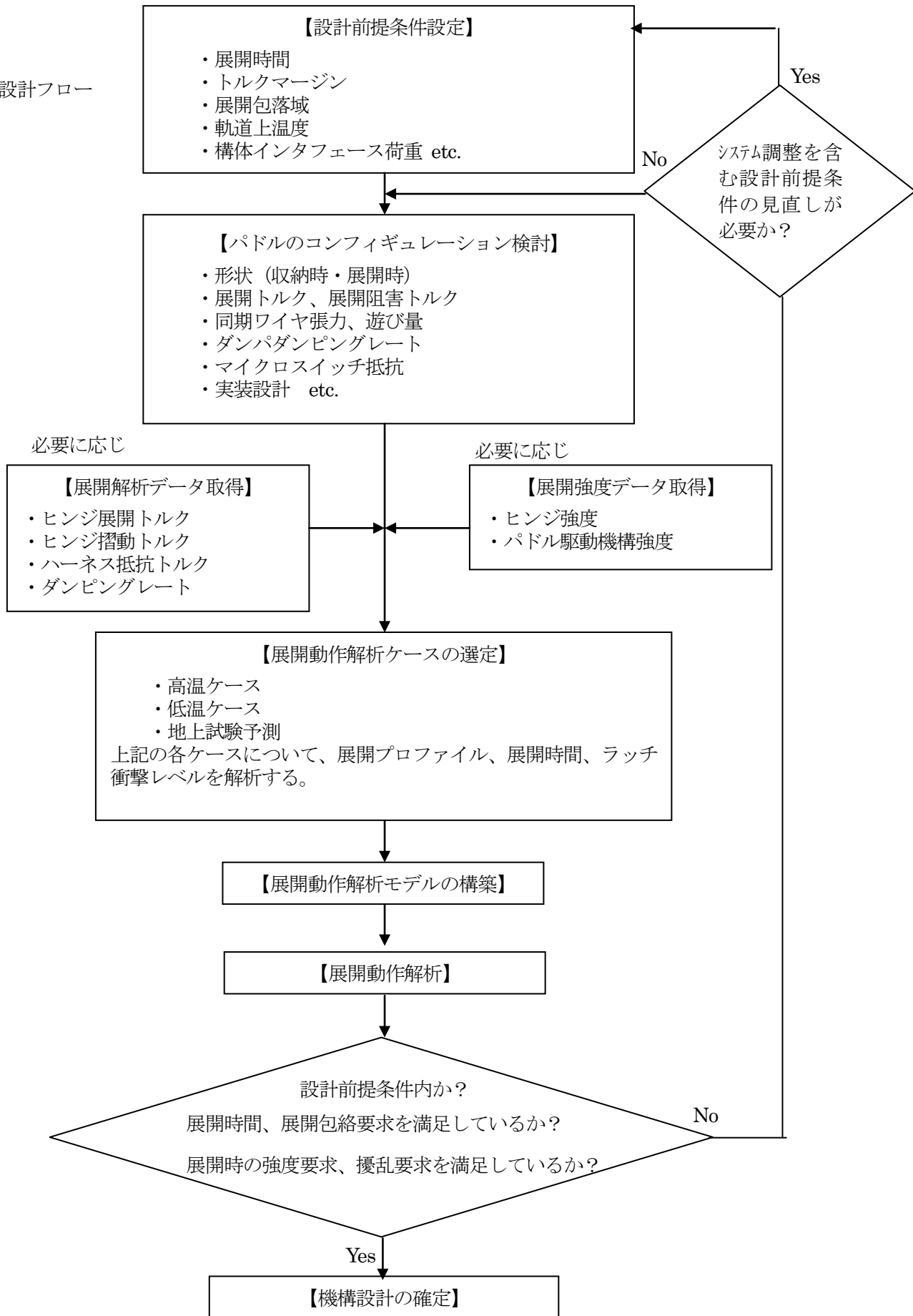


図 5 - 3 機構設計フロー

5.3.1 展開機構設計

展開機構は、軌道上で保持解放されたブーム、ヨークおよび太陽電池パネルを一定の速度で展開し、その展開状態を維持させる機構である。

展開機構に関する設計項目を下記に示す。

- ・ ヒンジ各部の展開時摺動部には固体潤滑などの表面処理を施し固着を防止する設計とする。
- ・ 軸受け部は負荷される温度範囲を考慮し、低温環境下でも外輪／内輪の隙間を確保する設計とする。
- ・ ヒンジラインの内、片側のヒンジについてはスラスト方向に遊びを設け、ヒンジラインを挟むパネル同士の線膨張差による変位差を吸収する設計とすること。
- ・ 下記の式により導かれる展開トルクマージンの算出結果が1以上となること。但し、要求が満足できない場合はプロジェクトにより判断すること。

$$\text{展開トルクマージン} = \text{展開トルク} / \text{抵抗トルク} - 1$$

(抵抗トルク = ハーネス抵抗トルク + ヒンジ摺動トルク)

- ・ ハーネス抵抗トルクは、極力実機相当のハーネスを使用した実測値に基づき設計を行うこと。
- ・ ヒンジ摺動トルクは、極力実機相当のヒンジを使用した実測値に基づき設計を行うこと。
- ・ ヒンジの展開完了を確認するテレメトリは、ヒンジに設けられたマイクロスイッチにより検知・出力される。マイクロスイッチを搭載する場合は、ヒンジ毎に異なる抵抗を接続し、抵抗値をモニタすることによりどのヒンジが展開完了したか確認できる設計とする。
- ・ 展開ラッチ衝撃評価の結果MSが正になるように設計すること。必要な場合はダンパを設け展開ラッチ時の衝撃を緩和すること。

5.3.2 同期機構設計

太陽電池パドルがブーム・ヨーク・太陽電池パネルなど複数の構成品がヒンジにより連結され、展開動作時に構成品間及び宇宙機本体との衝突が懸念される場合には、太陽電池パドルに各ヒンジの展開角を同期させる同期機構を設置する必要がある。

- ・ 展開同期機構は、パドル展開動作時・軌道上の温度変動を考慮し、同期ワイヤに適正な張力を付与する設計とすること。
- ・ 同期ワイヤ部はかしめ部品を含めてプルーフ荷重を負荷し、事前に健全性を確認すること。
- ・ 展開動作時の非同期によりできるだけたるみが発生しない構造とすること。同期ワイヤの展

開動作エンベロープには突起・段差が無い設計とし、接触があっても引っ掛からない設計とすること。

- ・ブーム・ヨークに搭載する同期ワイヤについては、同期ワイヤの遊びにより振動試験の際に振幅が出やすいため、パネルへの接触が発生しないピッチで振れ止めを配置すること。

5.3.3 展開設計・解析

サブシステム側では、軌道上における太陽電池パドルの展開挙動をマルチボディダイナミクス数値シミュレーション等（マルチボディダイナミクス数値シミュレーションソフトウェア、微分方程式数値解、微分方程式解析解、等）により解析し、展開コンフィギュレーションプロファイル、展開角プロファイル、展開信号プロファイル、展開時間、ラッチ衝撃トルク、取り付け点反力トルクプロファイル等を求めること。バネ等による受動的な展開の場合は、保持解放の瞬間から、また、モータ等による能動的な展開の場合は、モータ駆動直前から、解析を行うこと。また、解析におけるパドル固定端境界条件については、Fix-Free の場合だけでなく、必ず、空間を自由に回転しうる宇宙機本体を含めた Free-Free の場合も行うこと（Free-Free の場合を最低限の必須条件とする）。なお、Free-Free 条件での解析に用いる宇宙機本体は、他の柔軟構造物が展開していない場合は、剛体としても良い。サブシステム側は、少なくとも Fix-Free 条件の解析を実施すること。Free-Free 条件での解析は、サブシステム側ないしは宇宙機システム側あるいはその両者が実施するが、最終的責任は宇宙機システム側が持つこと。サブシステム側は、宇宙機システム側に対して、Free-Free での解析に必要な条件をインタフェースすること。Fix-Free、Free-Free いずれの場合も、解析ケースは、最低限、想定される最高の高温と最低の低温のそれぞれを包含した2ケースを行うこと。解析パラメータについては、ヒンジトルク、ヒンジ展開トルク、ハーネス抵抗トルク、ダンパ抵抗トルク、展開同期機構張力、温度、ヒンジオフセット、等とし、温度による特性の変化を含めて、要素試作試験等の結果に基き検証された値を用いること。また、解析パラメータの変動範囲を包絡し、最悪となるようなパラメータの組み合わせのケースを含めて解析し、展開の確実性を確認すること。解析結果に基き、展開時間、ラッチ衝撃トルク、ラッチ衝撃時 M.S.、展開コンフィギュレーション包絡域、等が、要求を満足していることを確認すること。宇宙機システム側は、さらに、展開時発生姿勢レート、展開時発生姿勢角が要求を満足していることを確認すること。

また、サブシステム側では、地上展開試験により太陽電池パドルの展開を検証するとともに、地上展開試験における太陽電池パドルの展開挙動を、空気力・摩擦力の寄与や境界条件（地上展開試験では、一般にFix-Freeのケースとなる）の違いも含めてモデル化し、軌道上における挙動と同様にマルチボディダイナミクス数値シミュレーション等により、解析すること。地上試験結果に整合するよう地上展開の解析パラメータをチューニングするとともに、そのチューニング結果を軌道上展開解析に反映すること。

さらに、必要に応じて、ハーネス抵抗トルクの想定範囲外の増減、ダンパの故障、展開同期機構の故障等を模擬した条件を設定して、軌道上の展開解析を行い、展開のロバスト性を確認すること。

5.4 熱設計・解析

太陽電池パドルにおける熱設計のフロー例を図5-4に示す。

5.4.1 熱設計

太陽電池パドル系システムを構成する部品やコンポーネントの機器許容温度から、自身の熱設計を行なうとともに、宇宙機システムに対する温度制御要求を明確化する。JERG-2-310 熱制御系設計標準およびプロジェクトで定める熱設計基準書に基づいて、設計の不確かさ（誤差、公差などの不確定性）や設計マージン（不測の事態のための余裕）等に関する設計方針を定める。

①前提条件

- ・ 内部発熱量（高発熱機器のある場合は発熱密度も考慮）
- ・ 外部熱環境（試験時、輸送・保管時、打上げ時、軌道上各運用モード時、姿勢異常時）
- ・ システム側から提示される熱インタフェース条件
- ・ 機器許容温度（部品やコンポーネントの固有の値）および許容温度変化率
- ・ 寿命および信頼性への要求
- ・ 発生電力要求（太陽電池セルは高温になるほど変換効率が低くなる）

②熱設計

- ・ パドルの基本構造を、以下の点を考慮して決定する。
 - 形状
 - 面積
 - カバーガラスおよびパネル裏面の熱光学特性
 - 取付方法
 - 表面処理
 - 温度規定点
 - 熱物性

- ・ 熱制御材（部品、材料）の選定
 - 熱物性（熱光学特性、熱伝導、熱容量）、信頼性、耐環境性（放射線、原子状酸素、帯放電など）、工程（品質、再現性）、アウトガス、清浄度、コンタミによる性能劣化、フライト実績、入手性、有効寿命、作業性などを考慮しつつ選定。
- ・ 熱制御材の導電性、接地
- ・ 放熱面積およびヒータ容量（電力）の最適化
- ・ 高温および低温の最悪予測温度の算出
- ・ 温度計測点および温度センサ
- ・ 接着剤の強度、アウトガス、劣化（経年、温度）
- ・ 打上げ時の振動および減圧環境下での強度・剥離
- ・ 宇宙機構体から剥離物の付着やその影の影響

③試験温度

- ・ 認定試験：最大予測温度範囲を 5°C 広げた温度範囲以上、各機器許容温度（部品やコンポーネント）を越えない温度範囲
- ・ 受入試験：最大予測温度範囲より外側で、各機器許容温度（部品やコンポーネント）の受入試験温度範囲を越えない温度範囲
- ・ プロトフライト試験：認定試験と同じ

5.4.2 熱解析

- ・熱インタフェース条件に基づき、太陽電池パドルの詳細熱数学モデルを作成する。また、その検証とコリレーションによる精度向上を図りつつ、太陽電池パドルの設計検討、軌道上温度予測、熱平衡試験評価、設計の妥当性確認、軌道上評価などを実施する。
- ・熱解析ケースとして、太陽電池パドルの高温ケース・低温ケースともにワーストケース（太陽光強度・熱インタフェース条件・熱光学特性等）を選定する。高温ケースについては、フルシャントを考慮すること。また、自己発熱を考慮したハーネス束及びコネクタの高温ワーストケースも考慮すること。
- ・必要に応じて、システム熱解析用のインタフェース熱数学モデルを作成する。また、試験や解析により、その妥当性を確認する。

参考として、JERG-2-310 熱制御系設計標準で規定される温度の考え方を以下に示す。

- ・設計予測温度範囲：季節変動や経年劣化等を考慮したノミナル設計温度
- ・最大予測温度範囲：実機と熱数学モデルの差、解析ツール、設計パラメータ、製造公差、計測誤差等の不確実性を考慮した温度

＜設計の不確かさ＞＝＜最大予測温度範囲＞－＜設計予測温度範囲＞ 例：10℃以上

＜設計マージン＞＝＜機器許容温度＞－＜最大予測温度範囲＞ 例：5℃以上

熱設計フロー

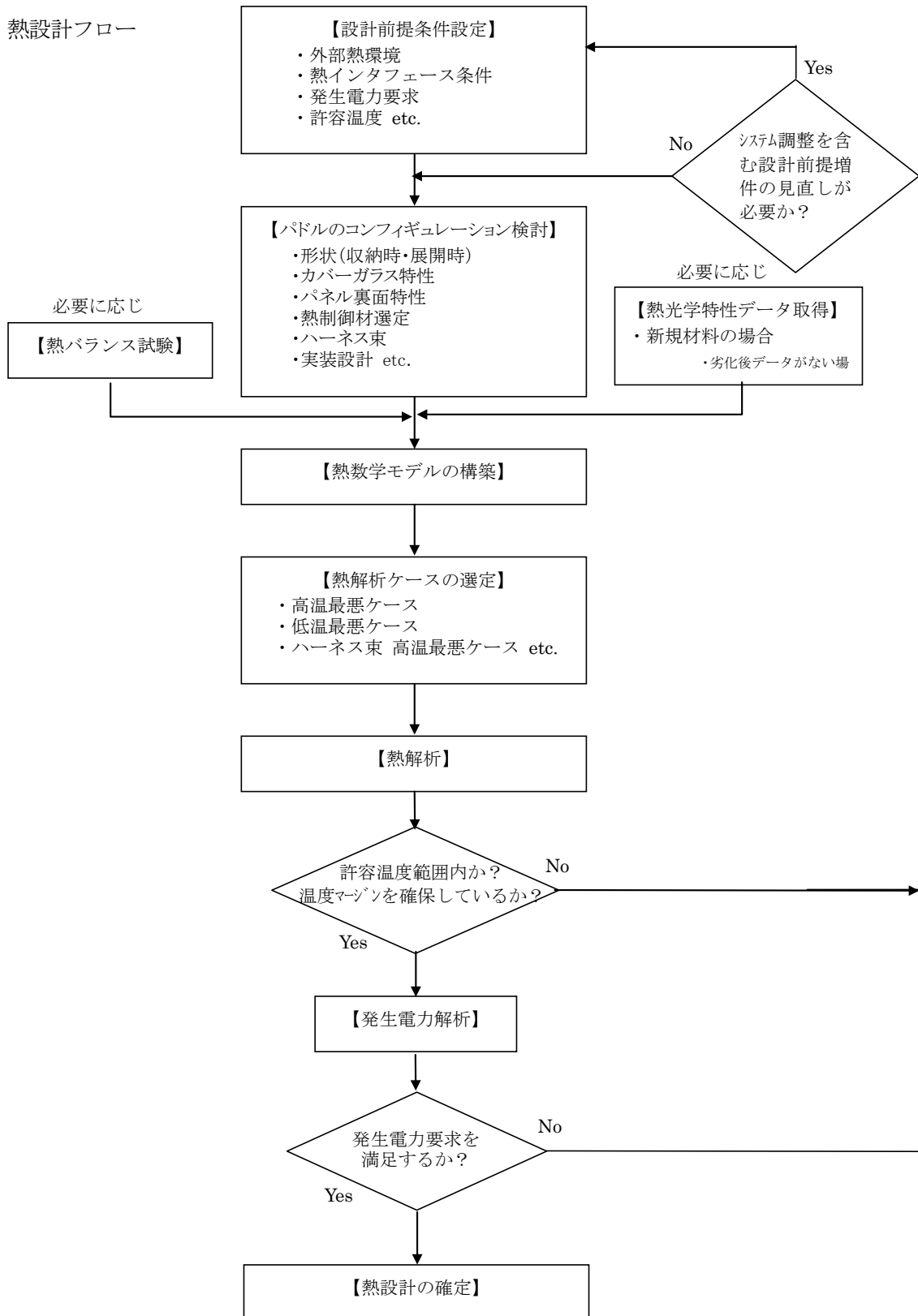


図 5-4 熱設計フロー

5.5 パドル駆動機構設計

パドル駆動機構の機能は、次の通りである。

- ① 太陽電池パドルを太陽方向に指向させるため、太陽電池パドルを1軸まわりに回転させる。
- ② 太陽電池パドルの発生電力を宇宙機本体へ伝達する。
- ③ 太陽電池パドルと宇宙機本体間に電気信号を伝達する。
- ④ 角度検出器により、駆動シャフト回転位置信号を出力する。
- ⑤ 基準点センサにより、駆動シャフト基準位置信号を出力する。(システム要求による)

5.5.1 電気設計

(1) アクチュエータ

アクチュエータは、下記項目の仕様について姿勢制御系／駆動回路との I/F 調整を実施の上、明確化すること。

(a) 駆動特性

- ・ 励磁回路方式
- ・ 励磁シーケンス
- ・ 巻き線インピーダンス／インダクタンス
- ・ 駆動電圧／電流
- ・ 駆動相逆起電圧
- ・ 消費電力、発熱量
- ・ パルスレート
- ・ ステップ角

(2) スリップリングアセンブリ

スリップリングアセンブリについては、下記項目の仕様について電源系、姿勢制御系との I/F 調整を実施の上、明確化すること。

- (a) リング構成： 電力用リング(RTN)、電力用リング(HOT)、信号用リング、それぞれについての定格電流値と員数

- (b) 最大使用電流値： 定格電流値の1/2以下であること。容量性サージを考慮することが望ましい。
- (c) 最大使用電圧： 各スリップリングへの最大印加電圧
- (d) コネクタ： 種類、員数、ピンアサイメント
- (e) 空きリング： 使用しない、かつ他との接続を持たない空きリング（予備リング）についてはシステムにて接地すること。
- (f) 静抵抗値 停止時に静抵抗が増大しないこと（但し、地上環境における一時的な増加（回転することで通常値に戻る場合）は許容する）
- (g) ダイナミック抵抗 回転時の抵抗値の変動幅を規定する。
- (h) 短絡防止 振動、衝撃等によりブラシがバリアを超え、隣り合うリング間で短絡が起きることを防ぐため、十分なバリア部の高さを持つこと。スリップリングケース内部は短絡防止を考慮すること。
- (i) 放電対策 スリップリング間で放電を起こさないようにするために隣り合うリング間の距離、ブラシ間の距離を適切に設計すること。

(3) 角度検出器

角度検出器については、下記項目の仕様について姿勢制御系／駆動回路との I/F 調整を実施の上、明確化すること。

- ・機械角度： （特に機械原点と角度検出器原点との関係の定義）
- ・角度／出力特性： （角度検出器単体精度含む）
- ・入力／出力インピーダンス
- ・入力電圧
- ・スリップリング使用員数
- ・コネクタピンアサイメント

(4) ハーネス、コネクタ及びコネクタピンの最大使用電流値選定

- ・スリップリング最大使用電流値の選定と同様に、PDM に使用するコネクタ及びコネクタピンに使用する最大電流値は、定格電流値の1/2以下であること。

但し、コネクタ総通電電流については、使用するコネクタ適用データシートに記載されるディレーティング指針及び最終的には熱解析によって許容可能温度範囲内での設計とす

ること。

・ハーネスについては、JERG-2-212 ワイヤディレーティング標準に準拠することとするが、外部露出ハーネス（宇宙機構体外、シャフト部ハーネス等）については、5.4.2 項熱解析の要求に従い適切な電流値とすること。

5.5.2 機械設計

(1) 構造特性の検討

パドル駆動機構は太陽電池パドル・宇宙機構体との I/F 条件を明確にした上、固有値解析、強度解析等を行ない、剛性要求及び強度要求を満足することを確認すること。主要な評価項目は以下である。

- ・許容荷重（並進力、曲げ、振り）
- ・許容温度（筐体／出力軸温度差）
- ・等価剛性（曲げ、振り）

(2) 駆動特性の検討

パドル駆動機構は駆動特性に関して、下記項目を検討し、明確化すること。

- ・回転方向
- ・ステップ角
- ・バックラッシュ
- ・回転角精度（最大累積誤差）
- ・出力軸発生トルクおよびトルクマージン（定義を明示すること）
- ・寿命解析／評価

(3) スタンバイモード、ホールドモードにおけるパドル駆動機構の保持トルクがパドル駆動機構に対する要求を満足していること。

(4) トルクマージン

トルクマージン M は、次式のように定義され、要求値は 1 以上である。

$$M = T_0 / (T_1 + T_D) - 1$$

- T_0 : 出力トルク
 T_I : 太陽電池パドルを加速させるためのトルク
 T_D : パドル駆動機構内部ドラッグトルク

出力トルク T_0 は、ステップモータの出力トルク×減速比で求められる。

内部ドラッグトルクは

- ・ハーモニックドライブ®の起動トルク
- ・ハーモニックドライブ®の効率
- ・駆動モジュール用ベアリングの摩擦トルク
- ・平歯車の効率
- ・スリップリングアセンブリの摩擦トルク
- ・駆動シャフト用ベアリングの摩擦トルク

により求められる、これらの値とステップモータ出力トルクは、温度によって値が異なるため、新規採用品に対しては事前に確認試験が必要である。

5.5.3 熱設計

パドル駆動機構は熱設計に関し、下記項目を検討し、明確化すること。

- ・機器発熱量 ・パドル駆動機構取付け（接触面積）
- ・搭載面発熱密度 ・取付面及び取付面以外の表面処理
- ・構成品温度解析および耐熱性評価

（特に電力用ワイヤハーネスについては通電による自己発熱以外に、外部熱環境からの熱入力を考慮した検討／解析を実施することが望ましい。）

- ・機器としての熱設計上の帰属
- ・パドル駆動機構 I/F 温度（取付け面、ハーネスコネクタ I/F 点）

5.5.4 耐環境性の検討

宇宙環境標準 JERG-2-141 への適合性を確認すること。（特にパドル駆動機構の外部露出部（ハーネス含む）については、UV・AO・熱サイクル・放射線等、複合環境に対する耐性を評価することが望ましい。）

5.5.5 試験計画・試験項目の明確化

パドル駆動機構は試験項目を含め、試験計画を明確化すること。

5.6 パドル駆動制御設計・解析

(1) パドル太陽追尾制御

一般に、パドル太陽追尾制御は、太陽電池パドル系に搭載された角度検出センサ（パドル太陽追尾角センサやパドル駆動機構回転角センサ）と駆動アクチュエータを利用して、宇宙機システム（多くの場合、姿勢制御系）が実施する。太陽電池パドル系サブシステム側は、規定された精度で角度検出センサ計測情報を出力するとともに、入力信号に基づき規定された精度で駆動アクチュエータを回転させること。また、センサ計測情報とアクチュエータ駆動のモデルを宇宙機システム側に提供すること。これらのセンサモデル、アクチュエータモデルには、アライメント情報等も含まれる。

宇宙機システム側（多くの場合、姿勢制御系）では、太陽電池パドル系より提供されたセンサモデル、アクチュエータモデルを基に、パドル太陽追尾制御系を設計し、追尾制御機能・性能（制御シーケンス、制御精度、擾乱等）を解析すること。

(2) 駆動モード設計

一般に、太陽電池パドル系サブシステム側は、太陽電池パドル系の駆動モードとして、パドル駆動機構のモードであるスタンバイモード、トランジションモード、ホールドモード、スルーモード、クロックモードなどを設計し規定する。一方、宇宙機システム側（多くの場合、パドル太陽追尾制御を実施する姿勢制御系）は、駆動モードとして、よりマクロな動作であるパドル太陽捕捉待機モード、パドル太陽サーチモード、太陽追尾モード、アレイトリムモード、自動アレイトリムモード、一定クロックレートモード、マニュアルアレイトリムモードなど（重複あり）を設計し規定する。太陽電池パドル系サブシステム側および宇宙機システム側は、それぞれの駆動モードの対応・組み合わせを明確にするとともに、相互にインタフェースすること。また、この駆動モードに関する駆動則・動作・シーケンスの情報を、それぞれの追尾制御機能・性能解析、パ

ドル駆動擾乱解析に反映すること。

(3) 故障検知同定再構成 (FDIR)

宇宙機システム側（多くの場合、パドル太陽追尾制御を実施する姿勢制御系）は、パドル太陽追尾制御の故障検知同定再構成 (FDIR) 機能を設計すること。この際、異常検知の判定条件、検知後の動作シーケンス、運用での復帰手順を明確にし、太陽電池パドル系サブシステム側に提示すること。太陽電池パドル系サブシステム側は、これらが太陽電池パドル系サブシステム側の設計と矛盾しないことを確認すること。

(4) パドル駆動擾乱

パドル駆動機構を有する太陽電池パドル系サブシステム側は、ステップモータ、ハーモニックドライブ®、ギア、太陽電池パドル柔軟構造モード、宇宙機本体からなる連成したダイナミクスをモデル化し、宇宙機システムより提示された追尾制御駆動信号に従い駆動した場合の駆動擾乱や振動プロファイル、反力トルク、重心変動等を、数値シミュレーションにより解析し、ダイナミクスモデルとともに解析結果を宇宙機システムに提示すること。また、サブシステム側は、解析結果が、宇宙機システムにより規定された範囲にあることを確認すること。

宇宙機システム側は、サブシステム側より提示されたパドル駆動擾乱モデルを、他の柔軟構造を含んだ宇宙機ダイナミクスモデルに組み込み、数値シミュレーション等により、姿勢・指向擾乱解析を行うこと。この際、宇宙機取り付け部の柔軟性も考慮すること。この姿勢・指向擾乱解析の結果により、姿勢・指向精度要求への適合を確認すること。同時に、太陽電池パドル系サブシステム側に対し、周波数帯に応じた許容擾乱量を規定すること。

擾乱管理の標準と手法については、擾乱管理標準 (JERG-2-152) 及び擾乱管理マニュアル (JERG-2-152-HB001) を参照すること。

5.7 宇宙環境設計

5.7.1 放射線設計・解析

放射線環境、放射線量および放射線劣化に関しては、宇宙環境標準 JERG-2-141 および耐放射線設計標準 JERG-2-143 に詳細に記述されているためここでは概要を以下に述べる。

- ・ 宇宙環境標準 JERG-2-141 が規定する放射線環境モデルを用いて宇宙機が遭遇する放射線環境や放射線量をミッションごとに予測すること。なお、太陽陽子線の予測に関しては、各ミッション期間に適用しなければならない信頼水準が定められているため宇宙環境標準 JERG-2-141 に従うこと。
- ・ 放射線量の予測にはかなりの不確実性が含まれているため、その結果を設計に反映させるときには適切なマージンを取っておくこと。
- ・ マージンを定量的に決めることは難しいが、重要な項目については十分に検討・評価し、確実に効率的な耐放射線設計を行なうこと。
- ・ 放射線による劣化がミッション期間に対して許容できるかどうか、可能であれば試験等で検証すること。
- ・ 運用を計画している軌道、期間に対してこれまでに実績のある材料を用いる場合に試験の省略を検討することもできる。

特に、太陽電池パドルの軌道上での放射線被曝による影響は、主に以下の2点で設計に反映する必要がある。

- (1) 太陽電池セルの被曝によるセル電気性能劣化
- (2) 使用材料の放射線被曝による物理的な劣化

上記(1)項については、予測される放射線環境条件から太陽電池セルの劣化度合いを定量化し、電気設計に反映（低下分を見込んで初期発生電力を決定）する。太陽電池セルの劣化予測手法としては、相対損傷係数（RDC）法と変位損傷線量（Dd）法がある。具体的な RDC 法および Dd 法による劣化予測方法は耐放射線設計ハンドブック JERG-2-143-HB001 にて詳細に述べているので、ここでは2手法の概略およびフローチャートを示す。

相対損傷係数（Relative Damage Coefficient : RDC）法のフローは以下の通りである。

- ①対象となる太陽電池セルの電子および陽子に対する放射線試験を実施する。もしくは既に取得済みのデータシートを準備する。
- ②放射線環境予測コードからミッション期間中の電子、陽子のフルエンスのエネルギースペクトル分布を求める。
- ③1MeV 電子線に対する太陽電池セルの劣化曲線を実験もしくはデータシートより準備する。
- ④対象となる太陽電池の電子および陽子に対する RDC（遮蔽材なし、放射線垂直入射）を算出する。また、10MeV 陽子線/1MeV 電子線換算係数を導出する。
- ⑤対象となる太陽電池の電子および陽子に対する RDC を放射線全方向入射、かつ、遮蔽材ありの条件で換算する。
- ⑥換算後の RDC と電子、陽子の粒子エネルギー分布を用いて、電子の場合は 1MeV 電子線の等価フルエンス、陽子の場合は 10MeV 陽子線の等価フルエンスを計算し導出する。そして、10MeV 陽子線/1MeV 電子線換算係数を用いて等価 10MeV 陽子線フルエンスを 1MeV 電子線フルエンスに換算し、先の電子線の等価 1MeV 電子線フルエンスに加える。これにより様々なエネルギー・フルエンスで飛来する電子・陽子によるセルの劣化が 1MeV の電子線に対する劣化という一つの指標に変換することが出来る。
- ⑦1MeV 電子線に対する劣化曲線において、得られた等価 1MeV 電子線フルエンスから太陽電池出力の劣化量（保存率）を算出することで、寿命末期におけるセルの出力が見積もることが出来る。

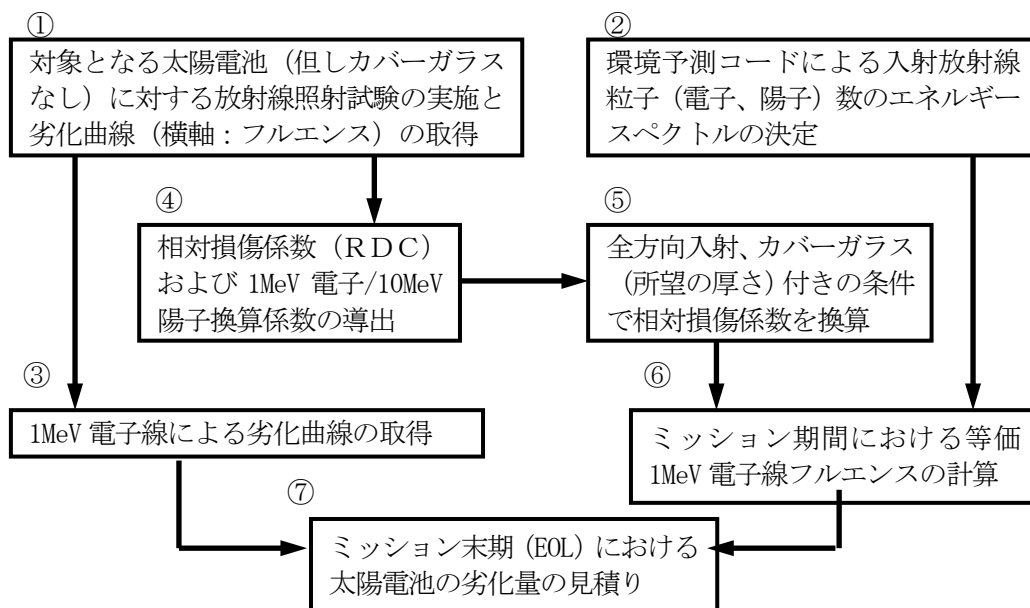


図 5.7-1 相対損傷係数（RDC）法による太陽電池劣化量の子測手順。

変位損傷総量 (Displacement Damage Dose : Dd) 法のフローは以下の通りである。

- ①太陽電池材料 (Si や GaAs など) の非イオン化エネルギー (NIEL) 値の粒子 (陽子線・電子線) エネルギー依存性を導出する。
- ②太陽電池の劣化特性データの横軸を電子線もしくは陽子線フルエンスを変位損傷線量 (Dd 値 =NIEL 値×フルエンス) と呼ばれる指標で表す。
- ③放射線環境モデルを用いてミッション期間中の放射線量を算出。
- ④遮蔽材 (カバーガラスやCFRP スキンなど) 透過後の放射線スペクトルを算出。
- ⑤太陽電池内に進入する放射線量と NIEL 値からミッション期間中の全 D_d 値を算出。
- ⑥セルの劣化データとミッション期間中の全 Dd 値から寿命末期におけるセルの出力を見積もる。

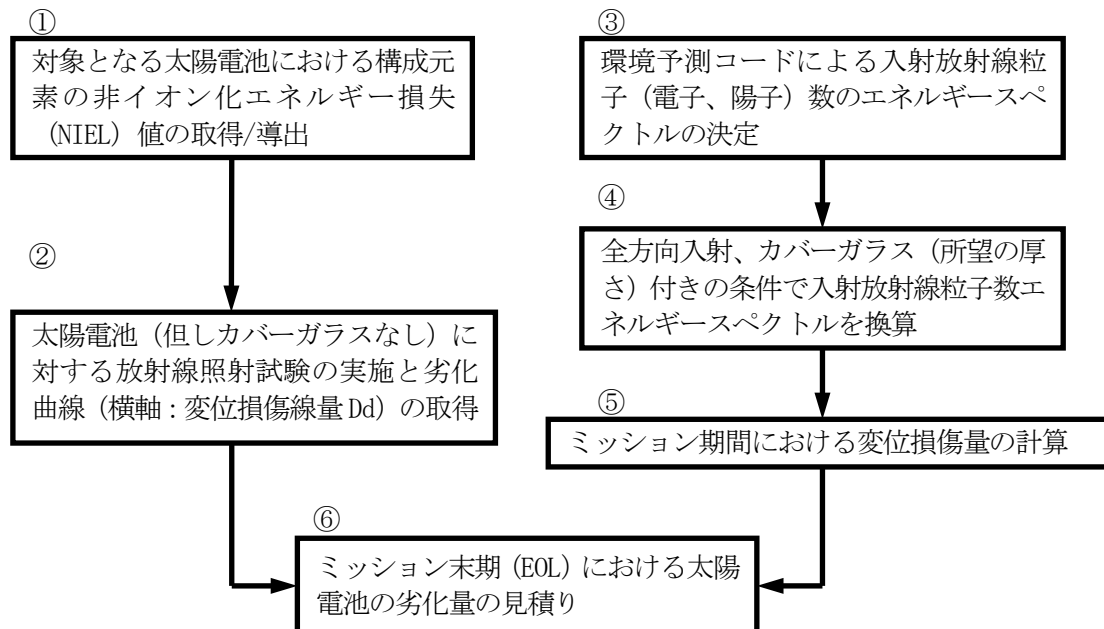


図 5.7-2 変位損傷線量 (Dd) 法による太陽電池セル劣化量の予測手順。

上記 (2) 項に関しては、トータルドーズ量を計算し、部品及び材料の耐放射線性データを基に使用する部品及び材料の特性の放射線劣化を推定する。トータルドーズ量の詳細に関しては、耐放射線設計標準 JERG-2-143 ならびに耐放射線設計ハンドブック JERG-2-143-HB001 を参照すること。

- ・ 太陽電池パドルに使用される材料 (ハーネス、接着剤、カバーガラス、熱制御材料など)

の熱光学特性ならびに機械特性の放射線劣化の評価、耐放射線性を考慮すること。

- 基本的には耐放射線性に優れた材料、もしくはこれまでのフライト実績を有する材料を選定することが望ましい。
- 例えば、太陽電池パドルの基本機能である発生電力の伝達に使用されるケーブルは、暴露部を含めて全て耐放射線性が優れた放射線架橋 ETFE を被覆に用いたワイヤが多く用いられている。同ワイヤは国内宇宙機・海外商用宇宙機において広く使用実績がある。
- 放射線架橋 ETFE を高レベルの線量を被曝する環境で使用しなければならず、被覆に亀裂などが発生してしまう恐れがある場合には、内部の電線が露出しても周辺部材との間で放電及び短絡を起こさない対策を施すこと。
- 部品及び材料の特性劣化が用途から見て許容値内であればその適用は妥当と判断される。
- 特性劣化が許容値を上回っている場合には遮蔽などの対策をとること。
- 遮蔽材の付加は、重量等の面で宇宙機設計に少なからぬインパクトを与えるが、宇宙放射線環境も含め放射線解析の分野ではまだ不確定な要素も多く、設計にはある程度のマージンを織り込む必要がある。
- 部品材料の耐放射線特性が不明な場合には、放射線試験の実施による劣化データの取得が必要である。
- 材料の放射線による影響は、放射線の種類、エネルギー、線量率によって異なる場合があるので、データの評価にあたっては留意すること。

5.7.2 紫外線 (UV) 対策設計・解析

太陽電池パドルで使用する材料に対する紫外線影響として、CIC 発生電力に対する紫外線劣化 (5.1.1.1(2) 及び 5.1.1.2(7) 参照) の他にハーネス皮膜等有機材料表面の特性変化 (特に白色ハーネス皮膜の褐色化による太陽光吸収率 α が増加し、またその増加傾向には温度依存性がある。) がある。軌道上ハーネスの温度解析 (特にハーネス束) に於いては、本劣化要因を考慮しハーネス許容使用温度逸脱の発生がないように注意すること。要すれば、紫外線が直接当たらない面へのハーネスルーティング、遮光板の設置若しくは SLI 等による保護等必要な対策を実施すること。

尚、紫外線によるハーネス等有機材料表面の特性変化の詳細については「ワイヤディレーティング試験データ集 (JERG-2-212-TM001)」を参照すること。

5.7.3 原子状酸素 (AO) 対策設計・解析

周回宇宙機が飛翔する低軌道には軌道高度に応じて原子状酸素が存在し、太陽電池パドルで使用する各種材料に対して侵食の影響を生じ、金属では銀とオスミウムが、また有機材料ではポリイミドに対する侵食率 (Erosion Yield) が顕著である。太陽電池パドルに使用される材料として、銀は太陽電池セル電極及び太陽電池アレイ回路のインターコネクタ・バスバーに、ポリイミドはパネルサブストレートサーフェイス及び SLI/MLI に使用されている。パドル設計に際しては、宇宙機軌道高度及びミッション運用期間に応じて、上記材料の機能維持に対し原子状酸素侵食による影響を生じない設計とすること。尚、侵食率解析においては AO の入射方向を考慮すること。対策例としては、機能維持に十分な材料厚さの採用若しくは反応率の低い材料によるコーティング (銀に対しては金メッキ、ポリイミドに対しては ITO, SiO₂ 若しくはゲルマニウムコーティング等) 等の対策がある。

尚、軌道高度に対する原子状酸素分布密度及び各材料の反応率等の詳細については耐放射線設計ハンドブック JERG-2-143-HB001 を参照すること。

5.7.4 デブリ・マイクロメテオロイド対策設計・解析

デブリ・マイクロメテオロイドの衝突確率、衝突影響及び対策設計の詳細については、微小デブリ衝突耐性評価標準 (JERG-2-144) に記述されているため、ここでは発生電力低下軽減の観点から対策設計について以下に述べる。

太陽電池パドルは宇宙空間に直接暴露される外部搭載機器であり、特に太陽電池アレイ回路はその機能動作上デブリ・マイクロメテオロイド防護対策を採り難い。従って、発生電力低下軽減の観点から以下の対策を考慮することが望ましい。

- (1) システム EMC 許容範囲での電力ハーネス HOT/RTN ラインの分離及び電力ハーネスルートの多ルート化による影響の軽減化
- (2) 遮蔽効果向上を意図した電力ハーネスの極力構造部材に密着させた実装 (但し、適切なストレスリリーフは維持する)。またハーネス実装と熱制御材装着を併用する場合は、熱設計への配慮、熱制御材接地の配慮を適切に行なうこと。
- (3) ブリーダ抵抗採用によるアレイ回路地絡防止

5.8 耐帯電/放電対策設計・解析

耐帯電/放電対策設計・解析の詳細については、帯電・放電設計標準(JERG-2-211)に規定されており当該設計要求(JERG-2-211 5.4 項「太陽電池パネル」、解析要求(JERG-2-211 6.2.2.4 項「コンピュータによるモデル及び解析結果」)及び試験要求(JERG-2-211 6.4 項「太陽電池パネル」)に準拠すること。尚、現状ではパネル表面側(アレイ回路側)を除いて、パネル裏面側、パドル駆動機構等の箇所に対する標準的設計指標が無いため、一次放電に起因した自己持続的な二次放電の発生可能性が考えられるクリティカル箇所を識別し、JERG-2-211 6.4.1.3 項「試験を必要としない場合」の規定に照らし合わせて、試験の要否を判断すること。

5.9 実装設計

ここでは太陽電池パドル実装設計で注意すべき事項について述べる。

(1)信頼性・サバイバビリティ向上用実装に対する注意点

表 5-1 に信頼性・サバイバビリティ向上のための実装に対する注意点を纏める。

これらは、信頼性・サバイバビリティ向上を目的として実装するが、その実装に当っては表に上げる様な観点に対し、注意を払わないと逆に故障ポイント若しくは設計意図と異なる結果となってしまう可能性がある為注意を要する。

表 5-1 実装設計における注意点

主たる役割 対象部品 or 実装	持続放電 抑制	地絡電流 救済	波及故障 回避	実装設計の注意点等
(1)セルギャップ間グラウティング	○	N/A	N/A	①次放電を抑制するために太陽電池列間にグラウティングを施す時は、ボイドが残らないように調合の時に十分な脱泡処理を行うこと。 ②グラウティング材料が軌道上での汚染源とならないように、十分なベーキングを実施すること。
(2)ブリーダ抵抗	N/A	○	N/A	①放電プラズマとのコンタクトを回避するため、RTV によりモールドする若しくは絶縁性(熱収縮)チューブで覆い、電極露出させないこと。ストレスリリース等の理由から当該実装が困難な場合は十分な距離をとる等の方法によって放電が発生しないよう考慮すること。 ②抵抗値の選定は軌道上での流入電子量に基づき適切に選定すること。また、地絡時の抵抗の定格電力を考慮して選定すること。 ③複数の回路地絡が発生し、同時にシャント ON 動作をした場合に、シャント素子定格を超える複数電流が同一シャント素子に流れ込む可能性がある為、ブリーダ抵抗を設置する場合には、可能な限り各パネル、ヨーク及びブーム間毎に抵抗を設置すること。 ④シャントヨーク搭載タイプのバドルの場合、ブーム・ヨークに対する電力ハーネス(HOT)の地絡は、バス短絡の単一故障モードとなる為、ブーム・ヨークに対するブリーダ抵抗設置は望ましい。 ⑤ブリーダ抵抗を設置する場合、展開同期機構(同期ワイヤ)がパネル間導電路となり得るため、上記③に対する本来の設計意図を機能させる為には、パネルヒンジとパネル間の絶縁を確保すること。この際、同期ワイヤがサブストレート若しくは振れ止め等に触れて、パネルヒンジとパネル間で接触導通要因とならないように配慮すること。
(3)ブロッキング or 分離ダイオード	○	N/A	○	①放電プラズマとのコンタクトを回避するため、RTV によりモールドする若しくは絶縁性(熱収縮)チューブで覆い、電極露出させないこと。ストレスリリース等の理由から当該実装が困難な場合は十分な距離をとる等の方法によって放電が発生しないよう考慮すること。 ②部品電極と電力ハーネスの半田不良は直接的な電力低下要因となり得る為、十分な熱サイクル耐性の確認及び冗長ルートとなるブロッキングダイオードの設置が望ましい。
(4)バイパスダイオード (パネル裏面設置を対象)	N/A	N/A	N/A	①放電プラズマとのコンタクトを回避するため、RTV によりモールドする若しくは絶縁性(熱収縮)チューブで覆い、電極露出させないこと。ストレスリリース等の理由から当該実装が困難な場合は十分な距離をとる等の方法によって放電が発生しないよう考慮すること。
(5)MTC/D-sub コネクタ	N/A	N/A	N/A	①絶縁設計標準(JERG-2-213)実装例に従い、コネクタ背面(ハーネス接続側)を RTV によりモールドし、放電プラズマとのコンタクトを回避するため電極を露出させないこと。
(6)8W8 コネクタ	N/A	N/A	N/A	①絶縁設計標準(JERG-2-213)実装例に従い、コネクタ背面(ハーネス接続側)を RTV によりモールドし、放電プラズマとのコンタクトを回避するため電極を露出させないこと。
(7)ホットラインハーネス容量及びスリップリング容量	N/A	N/A	○	①ブリーダ抵抗を設置した場合、複数の回路地絡が発生し、同時にシャント ON 動作をした際に、左記ラインへの電流集中による波及故障の回避を考慮した電流容量選定を行うこと。 (二つの短絡が発生した場合を想定した設計を行い、例えば一つの電力ラインに 2 倍の電流が流れた場合の発熱より他の電力ラインに故障波及することが無い等、2 つのアレイ回路の等価電力を超える損失がないこと。尚、ディレーティングの考慮は不要である)
(8)パネルグランドラインハーネス容量及びグランドラインスリップリング容量	N/A	N/A	○	①ブリーダ抵抗を設置せずに、アレイ回路地絡を許容する設計とする場合には、地絡による左記ラインへの電流集中による波及故障の回避を考慮した電流容量選定を行うこと。

(2) ワイヤ・ハーネス実装に対する注意点

ワイヤ・ハーネスをパネル面等に這わし固定する場合、下記の点に考慮すること。

- ・ 環境温度範囲に対するワイヤの熱収縮を考慮し、固定点間のワイヤストレスリリースを設けること。
- ・ パネルスルーホールを通す場合等ワイヤの曲げ加工を施す場合には最小曲げ極率を考慮

すること。複合的宇宙環境（放射線及び熱サイクル）下では、曲げ部分での皮膜亀裂の発生が生じやすくなることに配慮すること。

- ・ サブストレート端部等シャープエッジ近傍をルーティングする場合若しくは振動環境下又は展開動作等可動部近傍でハーネス皮膜が擦れる可能性が有る場合は、シャープエッジの養生及びハーネスの保護養生を実施すること。
- ・ ハーネス束をタイラップ等でブーム・ヨーク部に固定する場合、ハーネス皮膜のコールドフローを回避する為に適切な拘束力及びハーネス束拘束部のハーネス皮膜養生を考慮すること。
- ・ 信号線においては、その機能に対してノイズの影響がクリティカルである場合には、電力線との別ルート化若しくはシールド線の使用などを配慮すること。
- ・ ブーム・ヨーク部のハーネスルーティングに際しても、電流ループに伴う磁界の発生が最小となるように敷設設計することを原則とするが、サバイバビリティ要求、ロバスト性要求またはノイズイミュニティ要求等の観点から、多ルート化等による電流ループが発生する場合には、その許容量につきシステムと調整し ICD 等に規定すること。

5.10 インタフェース定義

5.10.1 外部インタフェース定義

パドルサブシステムが他のサブシステム間との間に有するインタフェース（電氣的、熱的及び機械的）を図に纏め明示すること。

5.10.2 インタフェース分界

電氣的、機械的及び熱的インタフェース分界を図示にて明示すること。

5.10.3 インタフェース条件

5.10.1 項で定義した各インタフェース条件において、少なくとも下記に示す項目に対する条件を整理・明示すること。

5.10.3.1 電氣的インタフェース条件

電氣的インタフェースとして、電源系、テレメトリ・コマンド系、姿勢制御系及び5.1 項で定

義したその他のインタフェースに対して、少なくとも下記に示す項目に対する条件を整理・明示すること。

5.10.3.1.1 電源系インタフェース

パドルサブシステムが発生した電力を電源系に伝える、電力供給に関わるパドル駆動機構～電源系間インタフェース、シャント回路との電圧/電流インタフェース、ダンパヒータ等パドル系が必要とする一次電源インタフェース及び火工品点火電力に関わる ODC バスインタフェースに関わる各インタフェース条件を整理・明示すること。また、アレイ回路のシャント動作順序については、特別なシステム要求が無ければ、電源系のシャント段とシャント動作アレイ回路の対応が解り易い様配慮し、且つその対応については ICD に明示すること。

その他インタフェースについては電源系設計標準(JERG-2-214)の規定に準じること。

5.10.3.1.2 テレメトリ・コマンドインタフェース

全てのテレメトリ・コマンドの一般要求は、電気設計標準(JERG-2-200)に従うこと。テレメトリ・コマンド項目設定基準と電氣的信号インタフェースの詳細は、信号インタフェース例(JERG-2-200-TM001)の規定に準じること。

太陽電池パドルシステムとして必要な推奨テレメトリ項目を表 5-2 に示す。

表 5-2 推奨テレメトリ項目

テレメトリ項目	対象コンポーネント	備考
太陽電池パネル温度	太陽電池パネル	<ul style="list-style-type: none"> 太陽電池セル温度を直接測定することが望ましいが、パネル表面側に温度センサを配置することが困難な為、パネル裏面に温度センサを配置し、熱数学モデル及び熱真空試験結果から、太陽電池セル温度を把握すること。 理想的には各太陽電池パネルを測定することが望ましいが、テレメ数・スリッピング数の制約が有る場合は、宇宙機構体最遠部パネルと最近部パネルの2箇所は少なくとも測定されることが望ましい。
ブーム・ヨーク温度	ブーム、ヨーク	<ul style="list-style-type: none"> ハーネス束が実装されている近傍を測定することが望ましい。
ハーネス温度	ブーム・ヨーク部艀装のハーネス束	<ul style="list-style-type: none"> ブーム、ヨーク部で束ねられたハーネス束の中心部を測定することが望ましい。
パドル展開ステータス	太陽電池パドル	<ul style="list-style-type: none"> マイクロスイッチ及び抵抗によって各ヒンジの展開ステータスをモニタすることが望ましい。
ダンパ温度	ダンパ	
パドル駆動装置温度 ・ シャフト温度 ・ フランジ温度	パドル駆動装置	<ul style="list-style-type: none"> パドル駆動装置ではベアリングの内外輪温度差を測定することが望ましい。
パドル駆動機構角度信号 ・ ポテンショメータ ・ セグメントスイッチ ・ 基準点センサ	パドル駆動装置	<ul style="list-style-type: none"> 基準点センサは単なるテレメトリではなく、制御系に用いられる信号であるため、姿勢制御系とのインタフェースを考慮して設計すること。
太陽追尾誤差角度信号	太陽追尾センサ	<ul style="list-style-type: none"> 太陽追尾センサは単なるテレメトリではなく、制御系に用いられる信号であるため、姿勢制御系とのインタフェースを考慮して設計すること。
シャント温度	シャント	シャントヨーク搭載の宇宙機の場合に適用する。
シャントドライブ信号	シャント	

5.10.3.1.3 姿勢制御系インタフェース

太陽追尾インタフェースとしてパドル駆動機構駆動に関わるインタフェース及びパドル駆動機構角度検出に関わるインタフェース条件を整理・明示すること。

5.10.3.1.4 その他の電氣的インタフェース

太陽電池パドルに太陽追尾センサ、展開モニタ（DM）及び加速度計 等が取り付けられる場合には、当該機器との電氣的インタフェース条件を明確にすること。

5.10.3.2 機械的インタフェース条件

太陽電池パドル収納状態でのパネルサイズ及び包絡エリア等に関して規定する。

太陽電池パドル～パドル駆動機構間、パドル駆動機構～構体間及び太陽電池パドル～構体間の保持・取付等に関する機械的インタフェース条件を明確にすること。 また太陽電池パドルに太陽追尾センサ、展開モニタ（DM）及び加速度計 等が取り付けられる場合には、当該保持・取付等に関する機械的インタフェース条件を明確にすること。

5.10.3.3 熱的インタフェース条件

太陽電池パドルからパドル駆動機構間、パドル駆動機構から構体間及び太陽電池パドルから構体間の保持・取付部に関する熱的インタフェース（伝導熱交換及び放射熱交換量の算出式等を含む）条件を明確にすること。 また太陽電池パドルに太陽追尾センサ、展開モニタ（DM）及び加速度計 等が取り付けられる場合には、当該保持・取付部に関する熱的インタフェース条件も明確にすること。

なお、熱解析の入力条件（姿勢異常時等の姿勢条件も含めた打上げから軌道上の各運用モードでの太陽光入射条件、及び軌道熱入力定数（太陽光強度、アルベド定数及び地球赤外強度）の組合せ等）を明確にし、熱設計基準等適用文書に規定すること。

上記太陽光入射光条件においては、システム構体熱制御材（OSR または Ag-Teflon®等）からの反射光の影響に注意すること。

5.10.3.4 ダイナミクスインタフェース条件

5.2.4.2節、5.3.4節、5.6節、等の設計・解析・検証のため、以下に挙げるダイナミクスインタフェース条件を規定し、宇宙機システムとインタフェースすること。ダイナミクスは、太陽電池パドル系と宇宙機本体及び他のサブシステムが相互にカップリングしてその挙動を変える。このため、パドル系端を剛に固定した状態でのトルクインタフェースでは、宇宙機とパドル系の運動を表現することが出来ないため、不十分である。従って、宇宙機システムで、全機のダイナミクス解析が出来るようなダイナミクスモデルによりインタフェースすること。

(1) パドル質量特性

- ・収納状態、及び展開状態における、質量、重心位置、慣性モーメント、慣性乗積、公差と許容範囲、規定座標系（正常展開後、及び、必要に応じて、展開異常時）

(2) パドル外部擾乱特性

- ・太陽輻射圧算出のための表面特性と面積
- ・残留磁気モーメント

(3) パドル柔軟構造特性

- ・固有振動数、0次結合係数ベクトル、1次結合係数ベクトル、モード減衰比、公差と許容範囲、規定座標系（正常展開後、及び、必要に応じて、展開異常時）

(4) パドル熱変形

- ・周回中の熱に起因する変形のモデル、変形プロファイル、取り付け点トルクプロファイル、準静的変形（反り）

(5) パドル熱誘導ダイナミクス

- ・熱誘導ダイナミクスのモデル、変形プロファイル、取り付け点トルクプロファイル、重心変動プロファイル

(6) パドル展開ダイナミクス

- ・展開コンフィギュレーションプロファイル、展開角プロファイル、展開信号プロファイル、展開時間、ラッチ衝撃トルク、取り付け点トルクプロファイル、姿勢角プロファイル、姿勢レートプロファイル（少なくとも高温・低温の二つの温度条件にて）

(7) パドル太陽追尾制御

- ・角度検出センサモデル
- ・駆動アクチュエータモデル

(8) パドル駆動擾乱

- ・ステップモータ、ハーモニックドライブ®、ギア、パドル柔軟構造モード、駆動プロファイルないしは駆動則のパラメータ
- ・駆動擾乱、振動プロファイル、取り付け点トルクプロファイル、重心変動

5.10.3.5 視野インタフェース

太陽追尾センサ等を搭載し、それら視野干渉に対する要求が有る場合には、視野インタフェースを ICD 等に規定すること。

5.10.3.6 可動部エンベロープ インタフェース

太陽電池パドルの展開動作時及び軌道上太陽追尾回転時の動作エンベロープ（宇宙機システムとの機械的干渉が発生しない領域）に関して ICD 等に規定すること。

5.10.3.7 地上支援装置とのインタフェース

太陽電池パドル系の製造、組立、試験、保守及び点検に必要な地上支援装置一式を明確にし、電氣的及び機械的インタフェースを明確にすること。

6. 検証

太陽電池パドル系が適切に設計され、発生電力等に関する要求が満足されることを検証すること。検証は、設計段階迄の EM 等の製作・試験の結果も踏まえた設計解析、製造・試験段階での PFM/FM の構成要素試験、系内組合せ試験、システム試験で行われる。

6.1 開発・検証計画

開発計画の立案においては、図 4-1 に示す各構成要素の要素試験及び開発試験の要否について類似性・解析等から要求仕様に対する技術分析を実施し、必要な要素試験モデル及び開発試験モデルの製作・試験を明確にした開発・検証計画を立案し、5 項設計・解析要求に対する要求事項確認マトリクス及び環境試験マトリクスとして整理すること。表 6-1 にシステム試験迄を考慮した開発モデル定義の例を示す。

表 6-1 開発モデルの定義例

項目	モデル名称	備考(目的)
太陽電池パドル	帯放電クーポンパネル	放電耐性評価に使用
	クーポンパネル (その他要素モデル)	熱サイクル寿命性確認に使用
	展開ヒンジ部モデル	展開要素パラメータの取得(トルク、剛性等)
	保持・解放機構部モデル	衝撃レベル確認
	etc	
	構造ダミー	システム構造モデルに使用
	熱ダミー	システム熱モデルに使用
	EM	全体設計検証に使用
	PFM/FM	フライト品質検証に使用
	P D M	寿命試験モデル
構造ダミー		システム構造モデルに使用
熱ダミー		システム熱モデルに使用
EM		パドル組合せ試験、システム電気モデルに使用
PFM/FM		フライト品質検証に使用

表 6-1 に示したモデルのうち、モデル製作にあたっての注意点を以下に記述する。

(1) クーポンパネル

過去のプロジェクトにおいて熱真空環境下での太陽電池セル破壊や、インターコネクタ溶接部の破壊が発生している。サブストレート・太陽電池セル・インターコネクタを変更する際には、クーポンパネル試験などで検証を行う必要がある。

従ってクーポンパネルの製造においては、フライト品同等の材料、設計及び製造工程にて製作され下記の点に配慮すること。

- ・太陽電池セルの他、フライト品に実装される部品（抵抗、ダイオード、コネクタ、熱制御材

及び要すればホールダウンパッド等のブラケット部等)を模擬すること。

- ・太陽電池セル交換模擬を含むことが望ましい。
- ・表面フィルムの継目（フライト品で継目が有る場合）を模擬すること。
- ・CFRP フェースシート積層数（ダブル境界部を含む）を模擬すること。

試験及び評価の要件に関しては、太陽電池パネル品質保証ハンドブック (JERG-2-216-HB001)を参照。なお、アレイ回路分離ダイオードを採用する場合には、別途ダイオード部通電状態を評定としたクーポンパネルでのサイクル試験実施が望ましい。

(2) 帯放電クーポンパネル

- ・セル間ギャップは製造公差規格範囲内で最小ギャップを模擬していること。

上記以外はクーポンパネル同様の模擬を反映すること。試験及び評価の要件に関しては、帯電・放電設計標準(JERG-2-211)を参照。

(3) 構造ダミー

構造ダミーは宇宙機システム構造モデルに組み込まれた後、システムの構造設計を検証するとともに、宇宙機システムと太陽電池パドル系の構造インタフェース設計の妥当性を確認するために供される。

構造ダミーは原則として下記に従い製作すること。下記は指定無き場合、太陽電池パドル・パドル駆動機構の両者に適用される。

- ・外形形状及び寸法は原則としてPFMと同一とする。
- ・取付け穴位置、取付け穴径（取付けファスナサイズ）、取付け部分の板厚は、公差も含めPFMと同一とする。
- ・質量・慣性能率はPFMノミナル値と同一とする。（許容誤差はシステムと調整）
- ・質量中心位置はPFMノミナル値と同一とする。（許容誤差はシステムと調整）
- ・PFMと同等の強度を有すること。
- ・主要モードの固有振動数はPFMと同一とすること。（許容誤差はシステムと調整）
- ・必要に応じてPFMの発生衝撃を模擬できるようにすること。

（太陽電池パドル構造ダミーのみに適用）

(4) 熱ダミー

- システム熱真空試験においては、通常、太陽電池パドル展開後の運用状態での熱制御状態の確認が主目的となる。そのため太陽電池パドルは、展開状態でシステム熱真空試験に供されることが本来は理想である。しかしながら、展開状態の太陽電池パドルを実装することは設備制約上、極めて困難であるため、要すればシステム試験の評価目的・評価項目に沿う様に、太陽電池パドルフライト品と等価な寸法形状（形態係数を極力一致させる様、配慮すること）、熱容量、熱光学特性を有する様に太陽電池パドル熱ダミーを製作すること。

但し、太陽電池パドル自体は宇宙機/PDMから断熱され独立熱制御であるためシステム熱真空試験での評価から除外され、さらにヨーク等を使用し宇宙機構体との熱結合が十分小さい太陽電池パドルの場合、宇宙機構体に搭載されたPDMへのソーラーアレイ模擬電源からの電力線接続等の試験コンフィギュレーション上の都合等もあるため太陽電池パドル熱ダミーは用いず、場合により構体への太陽電池パドル取付けインタフェースホルドダウンのみ取付けて試験に臨むことも許容される。

- パドル駆動機構の熱ダミーについても、システム熱真空試験においてフライト品パドル駆動機構の使用が困難である場合、システム試験の評価目的・評価項目を妨げない範囲内で、極力フライト品と等価な寸法形状、熱容量、熱伝導（取付面熱コンダクタンス）、熱光学特性、発熱量を有する様にパドル駆動機構の模擬品を製作し、システム熱真空試験に供する。

6.2 製造・試験

図 6-1 に太陽電池パドル系のプロトフライト製造・試験フロー例を示す。 図中注記及び 6.2 項(1)に、製造・試験フローの各工程における注意事項（不具合事例等の反映）を列挙する。 試験の実施項目及び実施順序については 5 項設計・解析要求を検証する上で適切に検討し、要求事項確認マトリクス及び環境試験マトリクスの検証項目を満たすこと。

またインプロセス工程における推奨確認項目を表 6-2 に示す。 太陽電池パドルのフライト品質健全性を確認するに際し、完成状態では確認出来なくなる重要項目に対しては、適切なクライテリアを設定しインプロセス作業中に健全性確認を実施すること。

表 6-2 インプロセス推奨確認項目

対象カテゴリー		対象品	確認項目
太陽電池パネル	サブストレート	実機	ポリイミド面絶縁抵抗検査 デインプル発生率、デインプル深さ
		並行サンプル	フラットワイズ強度試験 3点若しくは4点曲げ試験
	CICピール強度	条件出しサンプル	インターコネクタ溶接強度確認
展開同期機構	ヒンジ	実機	展開動作時摺動トルク・展開トルク 展開時剛性 同期ワイヤー(かしめ部)ブルーフ荷重耐性
			ロータリダンパ
保持解放機構	プリロードボルト	実機	ブルーフ荷重耐性

(1) 製造・試験フローにおける注意事項（不具合事例等の反映）

<太陽電池パドル>

●インプロセス作業

- ・ハンドリングにより発生するサブストレート/CIC等の外観不良（サブストレートの傷・凹み、かゝガラス割れ等）
- ・MTC コネクタ熱収縮チューブ作業におけるはんだの再溶融

●プロトフライト試験

- ・ハンドリングにより発生するサブストレート/CIC等の外観不良（サブストレートの傷・凹み、かゝガラス割れ等）
- ・展開支持装置の整備不良による展開未了
- ・ノッチレベル設定の不良による機構品破損
- ・火工品発生衝撃の規格逸脱
- ・熱真空試験での温度制御規格値逸脱等

<パドル駆動機構>

●インプロセス作業

- ・ならし不足によるスリップリング等の抵抗値増大、ノイズ発生
- ・スリップリングメッキ不全部の剥れ、ブラシへの異物混入によるスリバ発生

●プロトフライト試験

- ・基準点センサトリガ点の温度変化による規格逸脱
- ・ハンドリングにより発生する外観不良（筐体・コネクタの傷）
- ・熱真空試験での温度制御規格値逸脱等

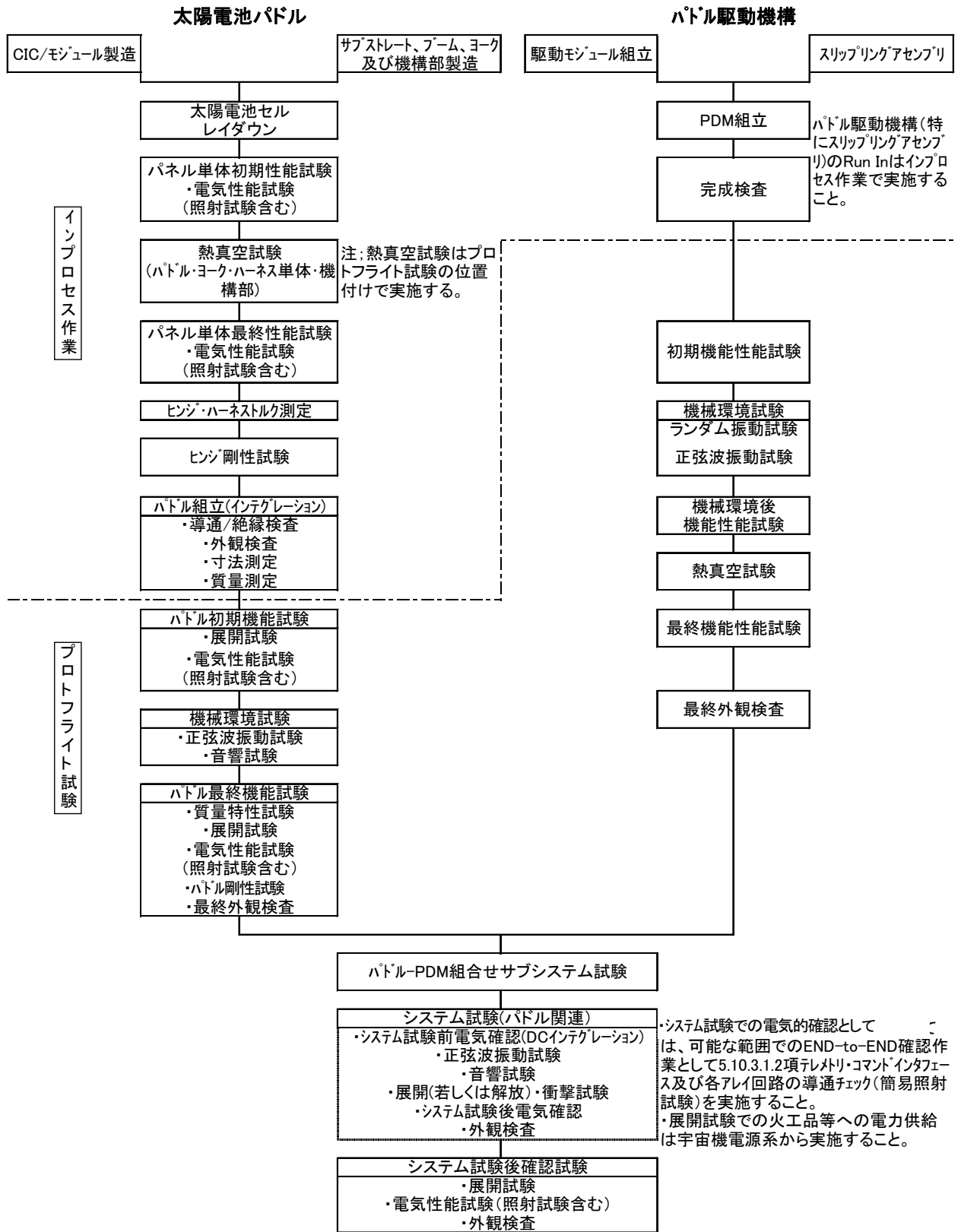
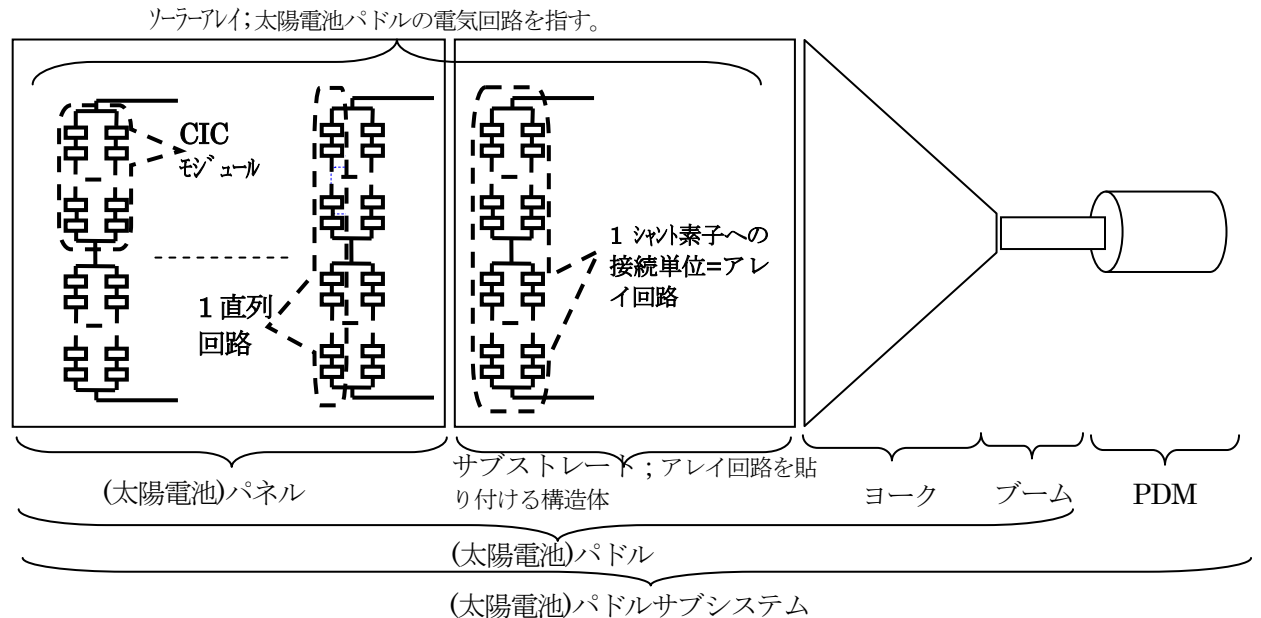


図 6-1 製造・試験フロー例

Appendix I 名称の定義

・ 名称の定義

本設計標準文書中で使用する範囲において、太陽電池パドルシステム各部名称を以下の様に定義する。



- ① 太陽電池セル; 太陽電池素子そのものを指す。単にセル又はベアセルとも言う。
- ② CIC(Cover-glass Integrated Cell 若しくは Connector Integrated Solar Cell); 太陽電池セルにインターコネクタとカバーガラスを実装したものを指す。
- ③ CIC モジュール; CIC を任意の直並列回路単位にインターコネクタで接続した単位。
- ④ アレイ回路; 1 シャント素子に対応して接続する等、系統的に一故障で喪失する並列単位。
- ⑤ 1 直列回路; アレイ回路の 1 直列分を言う。
- ⑥ サブストレート; アレイ回路を貼り付ける構造体を指す。
- ⑦ 太陽電池パネル; サブストレート 1 枚にアレイ回路をアセンブリした単位
- ⑧ ブーム; パドル駆動機構端と太陽電池パネル端を結合している構造体の一部をなす梁部材。太陽電池パドルシステムとして無い場合もある。
- ⑨ ヨーク; パドル駆動機構端と太陽電池パネル端を結合している構造体の一部をなし、太陽電池パネル側に付く二股形状の部材。太陽電池パドルシステムとして無い場合もある。
- ⑩ ヒンジ; 2つの構造体を自身の周りに相対的に回転させる機構。
- ⑪ 太陽電池パドル; 太陽電池パネル、ブーム及びヨークをアセンブリした単位。PAD若しくはSAPとも言う。

- ⑫ ソーラーアレイ；太陽電池パドルの発電回路の総称。
- ⑬ PDM(Paddle Drive Mechanism)；パドル駆動機構。SADM (Solar Array Drive Mechanism) とも言う。
- ⑭ 太陽電池パドル系；太陽電池パドルとパドル駆動機構を含めたサブシステム全系を指す。SPSもしくはPDLとも言う。

Appendix II 略語集

本設計標準に関連する略語を以下に示す。

AM0	Air Mass Zero	真空中（大気減衰のない）太陽定数
AO	Atomic Oxygen	原子状酸素
AU	Astronomical Unit	天文単位
BOL	Beginning Of Life	寿命初期
CFRP	Carbon Fiber Reinforced Plastics	炭素 繊維強化プラスチック
CIC	Cover-glass Integrated Cell /	太陽電池セルにインターコネクタとカバー
	Connector Integrated Solar Cell	ガラスを実装したもの
Dd	Displacement Damage Dose	変位損傷総量
DM	Deployment Monitor	展開モニタ
EED	Electro Explosive Device	電気着火式火工品
EM	Engineering Model	エンジニアリングモデル
EMC	Electro-Magnetic Compatibility	電磁適合性
EOL	End Of Life	寿命末期
ESD	Electrical Static Discharge	静電気放電
ETFE	Ethylene-tetrafluoroethylene	
FDIR	Failure Detection Isolation and	故障検知同定再構成
	Recovery	
FM	Flight Model	フライトモデル
HOT	Hot	ホット
IBF	Integrated Bypass diode Function	バイパスダイオード機能内蔵
ICD	Interface Control Document	インタフェース管理文書
MLI	Multi Layer Insulation	多層構成熱制御材
MPPT	Maximum Power Point Tracking	最大電力点追従機能
MS	Margin of Safety	安全余裕
NIEL	Non-Ionizing Energy Loss	非イオン化エネルギー損失
ODC	Ordnance Controller	火工品点火制御器
OSR	Optical Solar Reflector	熱制御ミラー

PA	Passive Analog	パッシブアナログ
PAD	Paddle	太陽電池パドル
PDL	Paddle	太陽電池パドル系
PDM	Paddle Drive Mechanism	パドル駆動機構
PFM	Proto Flight Model	プロトフライトモデル
RDC	Relative Damage Coefficient	相対損傷係数
RTN	Return	リターン
SADM	Solar Array Drive Mechanism	パドル駆動機構
SAP	Solar Array Paddle	太陽電池パドル
SLI	Single Layer Insulation	単層構成熱制御材
SPS	Solar Paddle System	太陽電池パドル系
UV	UltraViolet	紫外線
V-I	Voltage-Current	電圧－電流
α		太陽光吸収率
ε		赤外放射率