

SELENEレポート

～システムプロトフライト試験～

中澤 暁¹

(要旨) 打上げまで半年に迫った月周回衛星SELENEの進捗状況について報告する。観測センサーなどの単体の製造は完了し、衛星組立後の電気性能試験、音響試験、振動試験、熱真空試験などの試験を無事乗り越えてきた。準備は着々と進められており、現在は衛星を射場に輸送する前の最終チェックであるシステムプロトフライト試験最後の電気試験を行っている。軌道上で不具合を出さないために、地上試験で出来る限り潜在する不具合を洗い出すことを目指している。

1. はじめに

いよいよ月周回衛星SELENEの打上げが半年後に迫った。探査計画のプロポーザルから関わっているメンバーにとっては10年越しであり、ようやくである。

現在、筑波宇宙センターにおいて、射場に輸送する前の最終チェックであるシステムプロトフライト試験の終盤を迎えている。本稿ではこれまでの進捗について報告する。

2. SELENEの開発シナリオ

一般的に科学衛星は以下のステップで開発される。

- 1) 衛星のミッション目標から必要な機能・性能・インターフェイス条件(仕様)を決めて図面を作成し、
- 2) 機器毎に開発・製造した後、試験で機能・性能を確認し(単体試験と呼ぶ)、
- 3) 衛星を組み立てて最終確認を行い(システム試験と呼ぶ)、
- 4) ロケットに載せて打ち上げる。

現在、SELENEはステップ3)の終盤にきている。

衛星には、観測センサーから電源バッテリーや通信用

アンテナなど様々な機器が搭載されており、一般に複数のメーカーがそれぞれを製造する。各々が図面通りに製造した物を持ち寄って組み立てて、すんなり上手くいけばこの4つのステップで打上げられるが、なかなかそうはいかない。とくに観測機器の性能は衛星に組んだ状態でないと正しく評価できない。機器完成後に改修が必要となった場合には、大きな後戻りになってしまうため、ステップ2)とステップ3)を繰り返して、製造途中段階で機器同士を接続して試験を行うことがリスク低減に有効である。SELENEもこの開発ステップを取り込み、機器完成前にシステム噛合試験を実施した。

3. SELENEの特徴

個々のミッションは過去の本誌で紹介されたので省略するが、SELENEは月周回軌道において15のミッションを行う。この状況は乗合バスに例えることができる。15人の乗客が、それぞれ好きな道具をもって乗車するところを想像して頂きたい。この15人は目的地に着くと銘々が好きなことを行う。その結果、方位磁石で北を探そうとしている人の隣の人が強い永久磁石をもっていたり、遠くの微弱なラジオ番組を聞きたいの

1. 宇宙航空研究開発機構



図1：フルコンフィギュレーションのSELENE（質量特性計測時）。打上げ時の質量とモーメントを計測している。子衛星2機（リレー衛星、VRAD衛星）も衛星上部に搭載されている。

に前の人が強力な電波を出していたり、望遠カメラで撮影しようとしているがバスが揺れて写真が撮れなかったりすることがある。つまり別の機器によって邪魔をされてしまうことが発生する（干渉と呼ぶ）。

SELENEのようにセンサが多いほど観測に必要な条件が多くなり、センサが高感度になるほど条件が厳しくなる。結果として、干渉が発生しやすくなる。そこで、それぞれの観測条件（要求事項）をあらかじめ示し合い、要求事項に関する調整や可能な対策の検討を行い、設計・製造に反映する必要がある。しかし、干渉の有無は設計確認や単体試験だけでは十分な確認はできないため、衛星全体を組んだ状態で試験して確認することが重要である。

SELENEでも機器の製造途中段階から、全機器を接続した、電氣的干渉確認試験、システムEMC試験、システム磁気試験、マイクロフォニック試験（微小振動の確認）などの干渉確認を行ってきた。

4. システムプロトフライト試験

前述のステップ3）のシステムプロトフライト試験（以下、システムPFT）は、射場輸送前の最終確認試

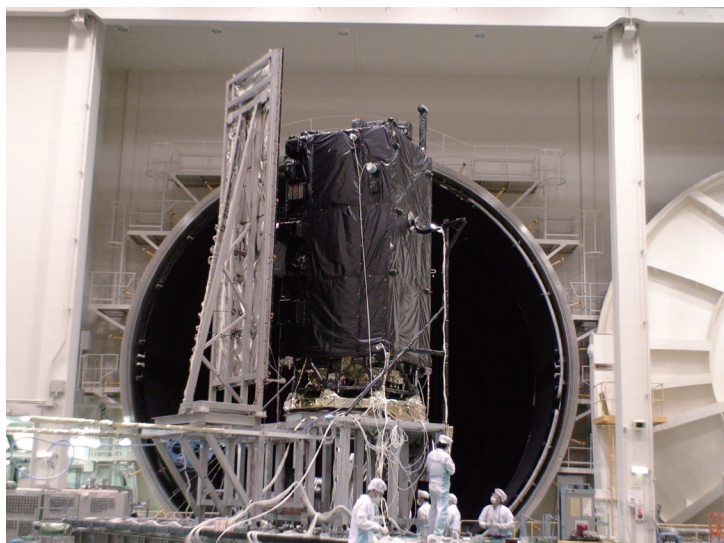


図2：熱真空試験前の準備をしている様子。向かって左側の衝立は月面からの赤外輻射を模擬するためのヒータパネルである。奥にはφ13mスペースチャンバーが見える。

験であるが、SELENEでは2回に分けて実施した。システムPFT前半では、開発当初より課題であったシステムEMC試験と電氣的I/Fの確認を実施した。その結果、これまでの検討と対策が実を結び、従来の衛星以上に低ノイズな環境が達成されていることが確認された。

システムPFT前半で、大きな課題が無く機器改修など必要ないことを確認した後に、機器単体は最終工程である基板コーティングなどを行った。以降にシステムPFT後半の主な項目と結果について述べる。

4.1 初期電気性能試験

この試験の目的は、(1)衛星組立状態で機器の機能・性能に問題ないことを確認すること、(2)最後に行う最終電気性能試験と比較するための初期データを取得すること、である。機器毎に順次試験を行った結果、オンボードソフトの不具合などが見つかったが、大きな課題なく次の試験に進むことができた。

4.2 音響試験

この試験の目的は、打上げ時に衛星周囲を覆っているロケットフェアリングから受ける音圧とその音圧による振動を受けても問題ないことを確認することである。防音壁に囲まれた反響室（容積1600m³）に衛星を設置し、巨大なスピーカにより打上げ時と同じ音圧を与える。衛星外部に搭載された機器はこの音響によって大きな加速度（振動）を受けることになる。

防音壁の外にいとほとんど何も分からず、あっという間に試験は終了した。各機器とも単体振動試験をクリアしてきており、何の問題も発生しなかった。

4.3 振動試験

音響と同様に衛星は打ち上げ時にロケットからも大きな振動を受けるため、衛星を振動台に載せて加振する。試験はXYZ各軸ごとに行い、打上げ時と同条件の振動を周波数をスイープさせて与える。

振動周波数が衛星の固有振動数と一致すると共振し

て大きなうなり音が発生する。そのたびに衛星が壊れないか不安になるが、やはり単体の振動試験で確認されてきており、何の問題もなくパスすることが出来た。

4.4 熱真空試験

宇宙空間では真空断熱により衛星の太陽側と反対側で100℃以上の温度差が発生する。さらに月周回軌道では、月面からの強烈な赤外輻射を受ける。システム熱真空試験において、ヒータや放熱板などによる熱制御が設計通り行われ、各機器が所定の温度範囲に収まっていることを確認するとともに、衛星全体の熱解析モデルのコリレーションを行う。

電源ON時の基板突入電流増加などが見られたが、大きな問題なく試験を完了できた。衛星の熱解析モデルは、この試験結果を用いてさらにコリレーションを行い、軌道上温度予測解析の精度を向上させた。

4.5 最終電気性能試験

一連の環境試験（音響・振動・衝撃・熱真空）実施後に各機器の機能・性能に変化がないことを確認する。初期電気性能試験で取得したデータから変化が無いことと、射場に輸送する前の最終確認を行う。現在も試験を実施中である（07年1月末 現在）。

システムPFT後半では特に大きな問題なく進んでいる。しかし、単体試験や過去のシステム試験において



図3：観測機器データ解析中の様子（システム熱真空試験時）。各機器それぞれに状態監視とデータ解析を行っている。衛星の温度状況に合わせて進行するため、昼夜の区別無く試験が行われた。

は多くの不具合が発生しており、それぞれについて原因を究明し対処してきた。現在順調なのは、その努力の結果と思いたい。

5. 不具合について

衛星開発において「一生懸命つくっても不具合（バグ）は潜んでいる。打ち上げてから不具合が見つかったでも対処のしようがないため、地上試験で出来る限り潜在する不具合を洗い出し、対処して打上げに臨む」ことが重要である。

勿論、図面ミスや極性ミスなど確認不十分なために発生する不具合（“浅い不具合”）の弁護をするものではない。このような不具合は設計段階、初期の試験で枯らしておかなければならない。しかし、ある条件下でしか発生しない不具合などは図面通りにものを作っても発生しうるものである（“深い不具合”）。このような不具合は、設計や製造で完全に防ぐことは困難で、実運用を想定して厳しい試験や念入りな試験を実施していないと見つかることができない。

軌道上で不具合が発生しても、人が行ってテスターを当てるわけにもいかず、情報が限られるため十分な調査は困難である。潜在している不具合は地上にある間に炙り出しておかなければならない。

電化製品も車も、出荷後に不具合が発生するから良くないのであって、出荷前に見つけて処置すればよい。不具合は出荷前（＝打上げ前）にとことん出しておくに限る。そのためには想像力を働かせ、軌道上で有り得る厳しい条件を洗い出して周到な試験計画を立てておくことが非常に重要である。この数年でつくづく痛感した。

軌道上で不具合が発生しても困らないよう、衛星では一般にバックアップ機能や対策を施してある。しかし、「準備している不具合は発生しない、準備していない不具合が発生する」のが世の常である。しかし裏を返して、想定をすればするだけ不具合が発生しなくなることを示唆していると思いたい。試験において不

具合が発生するたびに、原因究明と対策処置に多くの時間と労力が費やされるが、今不具合が見つかって良かったと思ひ直し、処置に当たっている。

6. おわりに

現在、最終電気性能試験が終わろうとしている。衛星が地上にある間に万事を尽くして、打上げを迎えたい。本稿が皆さんに読まれる頃には、種子島への輸送作業が始まっているだろう。