

一番星へ行こう！ 日本の金星探査機の挑戦 その4

～ 中間赤外カメラ／紫外イメージャ用ステッピングモータの耐久試験 ～

福原 哲哉¹，山田 学²，佐藤 光輝³，田口 真⁴，山崎 敦¹，
渡部 重十³

(要旨) PLANET-Cに搭載される中間赤外カメラと紫外イメージャは、それぞれシャッタおよびフィルタホイールを駆動するために回転角度の制御が可能なステッピングモータを採用している。これらは宇宙機用の国産品としては最小クラスの新規開発品である。我々はシャッタおよびフィルタホイールの「機構モデル」を製作し、真空中における耐久試験を実施して目標回数の動作を確認した。

1. はじめに

今回は金星探査機PLANET-C[1,2]に搭載する中間赤外カメラLIR(Longwave InfraRed camera)の性能評価試験について紹介し、検出器の画素ごとのばらつきを除去するためにはシャッタ(常温の黒体)の画像を取得する必要があることを述べた[3]。このシャッタを駆動するため、LIRには回転角度を制御できるステッピングモータが採用されている[4]。これは宇宙機用の国産品としては最小の新規開発品であり、ミッション期間中の動作回数は最大12万回と見込まれている。シャッタの動作には高い信頼性が求められるため、我々は「シャッタ機構モデル」を製作して12万回の2倍である24万回を目標動作回数とした真空中の耐久試験を行った。一方、金星雲頂からの散乱光を捉える紫外イメージャUVI(UltraViolet Imager)[1,2]にも宇宙機用として国産最小クラスの新規開発のステッピングモータが採用され、2枚の干渉フィルタと拡散板、および遮光板を装着したフィルタホイールを回転させる。ミッション期間中の回転数は3万回以上と見込まれている。フィルタホイールが回転に対する耐久性を備え、予想される最大枚数の観測画像を確実に取得できることを確認するため、我々はUVIの「フィルタホイール機構モデル」も製作し、LIRと同時に12万回転を目標

とした耐久試験を行った。

2. ステッピングモータの動作原理

ステッピングモータは、内蔵するコイルの電流を切替えることにより基準位置から一定角度間隔で任意に回転させることができる。「位置決め誤差が累積しない」、「デジタル制御系との整合性がよい(制御回路を作りやすい)」などの特徴を持つため、工業製品やパソコンなどの幅広い分野で活用されている。ステッピングモータの内部構造を図1に示す[5]。モータの軸は磁歯と呼ばれる永久磁石と一体となっており、ロータと呼ばれる。ロータの周りにはステータと呼ばれる90°位相がずれた二つのコイル(以下、A相／B相と呼ぶ)が取り付けられている。ステータのA相、B相それぞれに通電して励磁し、更に電流の向きを順次切替えて磁場の向きを変化させると、ロータを磁歯の刻み角度(1ステップ)ごとに回転させることが可能となる。電流の向きを固定してロータの位置を安定させた状態での保持トルクをホールディングトルクと呼び、電流を切った状態での保持トルクをデティントトルクと呼ぶ。LIRとUVIに採用されるステッピングモータの仕様は表1のとおりである。

1. 宇宙航空研究開発機構

2. 東北大学

3. 北海道大学

4. 立教大学

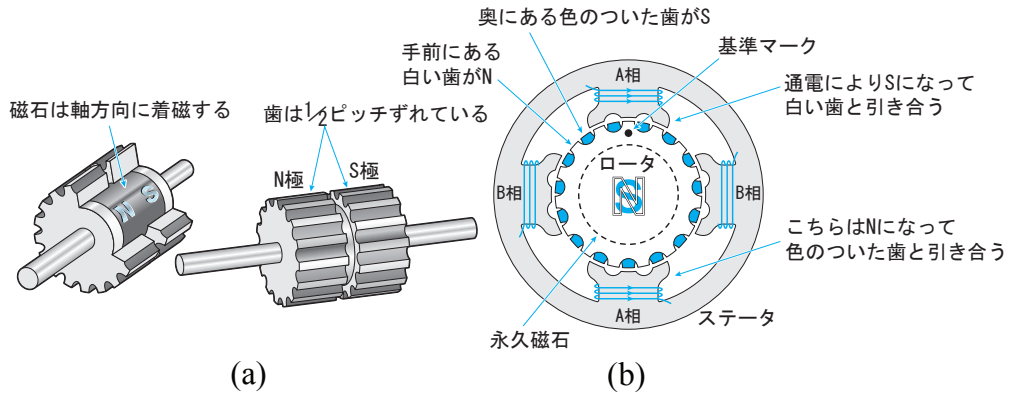


図1： ステッピングモータの内部構造(参考文献[5]より引用)：(a)ロータの磁歯構造 (b)ロータとステータの配置

3. 耐久試験

表1：LIR/UVIステッピングモータ[多摩川精機(株)製]仕様

	LIR	UVI
全長(mm)	60	73
高さ[幅](mm)	25	28
重量(g)	130	180
基本ステップ角度(°)	1.8	1.8
定格電圧(V)	3.5	1.0
定格電流(A)	0.35	1.5
ホールディングトルク[定格電流通電時](Nm)	0.013	0.049
ディテントトルク(Nm)	0.001	0.001

3.1. LIR (Longwave InfraRed camera)

シャッタ機構モデルはシャッタ部のみを模擬したモデルで，真空中での忠実な動作環境を実現する．図2に真空槽内に設置したシャッタ機構モデルを示す．モータは1回の動作で24ステップ(43.2°)回転し，シャッタが「閉」から「開」，またはその逆向きの「開」から「閉」に移行する．モータの発熱がシャッタ温度に影響を与えないよう，モータ非動作時はステータへの通電を切って非励磁状態とした．シャッタには温度センサ(白金抵抗)とその配線が取り付けられている．宇宙空間での環境を模擬するため，配線を含むシャッタ機構モデルは，あらかじめ振動試験と1kGyの吸収線量に相当する γ 線の照射試験に供された．モータ制御には市販の制御回路が用いられ，試験中のシャッタの開閉は数秒の間隔をおいて繰返されたが，目標動作回

数24万回を達成するには24時間連続で試験を実施しても約1ヶ月を要する．

試験は2007年8月13日に開始された．当初は順調に動作していたが，動作回数が10万回を超えた頃からシャッタの停止位置が不安定となり，「閉」と「開」の中間に来てしまうようになった．試験を中断して調べてみると，温度センサ用の配線が原因の一つであることがわかった．モータの非動作時に通電を切ると，ロ

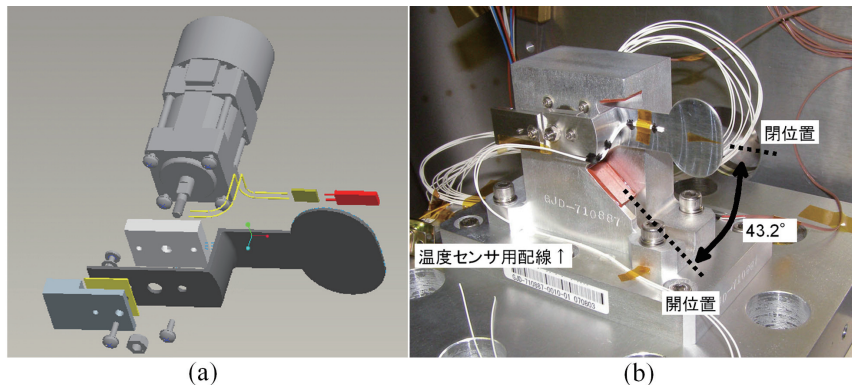


図2： LIRシャッタ機構モデル：(a)シャッタおよびモータの取付状態 (b)真空槽に取り付けられたシャッタ機構モデル

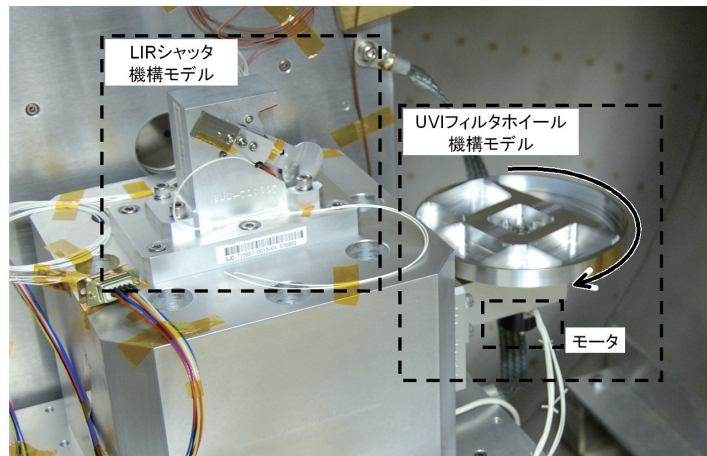


図3：真空槽内のUVIフィルタホイール機構モデルとLIRシャッター機構モデル

ータ位置はデイトントルクによって保持されるが、一方でセンサ用配線は円弧状に設置されているため張力を持ち、ロータに回転トルクを与える。これがデイトントルクを上回る $\sim 0.002\text{Nm}$ にまで達し、シャッターを動かしてしまうのである。また、通電を切った状態での磁歯の安定点は2相のステータ(A相およびB相)に通電している状態での安定点から僅かにずれているため、2相の通電を同時に切るとシャッターが動いてしまうことも原因の一つであることがわかった。我々はシャッターの非動作時にも定格電流をステータに流して励磁状態とし、ロータをホールディングトルクによって安定させる応急処置を施すこととした。これにより試験再開が可能となり、モータは目標動作回数24万回を達成した。

ステータに常時定格電流を流しておくことでロータは安定するが、その発熱はシャッター温度に影響を及ぼし、探査機の電力供給にも負荷を与えてしまう。これを解決するため、我々は以下に示す3つの改善を施した。①シャッター非動作時にはステータへ定格電流の1/4だけを流して配線トルクを上回る保持トルクを確保する。これによりシャッターへの発熱の影響や探査機の電力供給の負荷を最小限に抑えることができる。②これまで用いられていた耐放射線性と曲げ応力に対する耐久性に優れた線材を、耐久性に問題がない程度の張力の弱い線材に変更する。③ステータへの通電を切るときは1相ずつ段階的に行う。ステータの1相だけが励磁された状態での磁歯の安定点は、2相とも通電を切った状態での安定点と一致する。この操作により2相の通電

を同時に切った時にシャッターが動いてしまう現象を防ぐことができる。改修されたシャッター機構モデルには再度放射線が照射され、2008年3月12日に2回目の試験が開始された。この試験ではシャッターは正常に動作し続け、無事に目標動作回数24万回を突破した。試験は2008年4月30日現在も継続中であり、シャッター機構モデルは累計80万回を超えてなお全く正常に稼働している。

3.2. UVI (UltraViolet Imager)

UVIは2枚の干渉フィルタ(波長283 nmおよび365 nm)と拡散板、遮光板の計4枚が 90° 離れてフィルタホイールに設置されている。観測時はステッピングモータにより 90° ずつ回転させてそれぞれ撮像を行うことにより、2波長での雲画像の取得と、探査機上での画像の補正に必要なデータを取得する。現在考えている定常観測計画ではミッション期間中にフィルタホイールは約3万回転するが、今回の試験では可動部位の耐久性を確認するためにこの4倍の12万回転の目標を設定した。フィルタホイール機構モデルは図3に示すようにLIRのシャッター機構モデルと共に真空槽内に設置された。衛星飛翔時の無重力状態に近づけるため、モータ軸に過負荷がかからないようモータ軸を重力方向になるよう設置している。また、フィルタホイールの重量中心はモータ軸上となるよう設計し、重量アンバランスによる偏心を最小限に抑えている。耐久試験に先立ってフィルタホイール機構モデルの振動試験を行い、打上時の機械環境を模擬した。

試験ではフィルタホイールを単一方向に180°回転させることを一回の動作とした。フィルタホイールの動作タイミングはLIRシャッタの動作タイミングと同期させ、計24万回の動作、すなわち12万回転を目標とした。モータ駆動制御には市販の回路を用い、UVIのエレクトロニクスと同等の電流・電圧を与えた。動作タイミングの制御はPCを用いて行い、1回転を8秒とした。LIRのシャッタ動作不安定により一時中断したものの、2007年8月13日から開始された試験では無事に目標の12万回転を達成した。これによりUVIフィルタホイールの耐久性が確認された。

4. おわりに

今回の耐久試験により、我々はLIRのシャッタ機構とUVIのフィルタホイール機構の開発課題を解決してフライト用モータを製作する段階に至った。試験中は開発担当メーカとPLANET-Cチームが一丸となって課題に取り組んできた。そして開発担当メーカが有する高い技術力と開発に対する熱意が惜しみなく提供された。このような作業が観測データ利用者の目に触れることはほとんどないが、観測を成功に導くためには避けて通ることができない重要なものであることは言うまでもない。

謝 辞

本稿に記した耐久試験を実施するにあたり、多摩川精機(株)の唐澤豊氏からステッピングモータに関する技術協力をいただきました。また、シャッタおよびフィルタホイールの「機構モデル」製作には、NEC東芝スペースシステム(株)の檜川了一氏、東野勇氏、佐藤康志氏を中心とする開発チームから技術支援をいただきました。ここに感謝の意を記します。シャッタ機構モデルへの放射線照射には東京大学の岩上直幹准教授のご協力を得ました。ここに感謝の意を記します。本稿の図1を掲載するにあたり、参考文献[5]の著者である見城尚志氏、佐渡友茂氏、木村玄氏、および(株)技術評論社の富田裕一氏から引用の承諾をいただきました。ここに感謝の意を記します。真空試験は情報・システム研究機構国立極地研究所の施設を利用して実施されましたので厚く御礼申し上げます。

参考文献

- [1] Nakamura, M., et al., 2007, Planet. Space Sci., 55, 1831.
- [2] 今村剛他, 2007, 遊・星・人, 16, 226.
- [3] 福原哲哉他, 2008, 遊・星・人, 17, 77.
- [4] Taguchi, M., et al., 2007, Adv. Space Res., 40, 861.
- [5] 見城尚志他, 2006, 「最新小型モータの全てがわかる」, 技術評論社.