

超小型人工衛星に関する研究

— 太陽センサの開発 —

宮崎研究室

田中 惇

1. 緒言

近年、企業や大学による低コスト・短期間での宇宙実証実験や学生の宇宙工学教育を目的とした超小型人工衛星の開発が盛んに行われている。

日本大学でも超小型人工衛星「SEEDS」を打ち上げ、現在も運用を続けている。また、SEEDSで培われた基本技術を基に、後継機の「SPROUT」の開発を進めている。Fig.1にSPROUTの外観を示す。

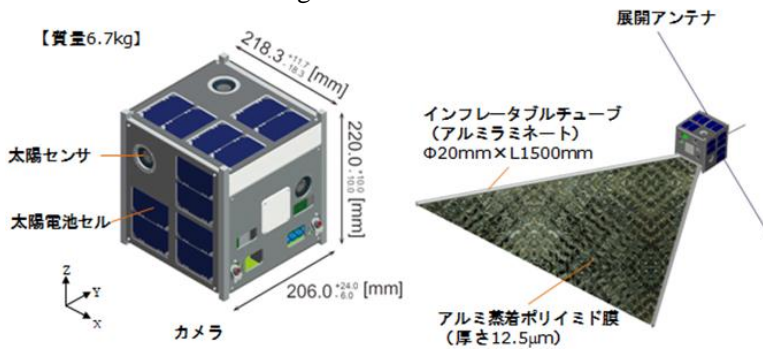


Fig.1 SPROUT

SPROUTでは宇宙開発の先進的なミッションとして、複合膜面構造物の展開実証、デブリ問題の解決手法の実証を行う。超小型人工衛星は、大型人工衛星に比べ運用期間が短く、打ち上げ数が年々増加している。そのため、運用を終えた人工衛星が次々とスペースデブリになることが懸念されている。SPROUTでは、その解決方法として複合膜面構造に着目し、宇宙空間において膜面を展開し大気抵抗を増加させることで軌道降下率を高め、より短期間に大気圏に突入させ燃え尽きさせることで、デブリ化を防ぐ。さらにミッションの1つとして自作磁気トルカによる3軸の姿勢制御系の実証実験を行う。これまでの超小型人工衛星開発において姿勢決定・制御の実証例は少なく、姿勢決定・制御技術はまだ確立されているとはいえない。超小型人工衛星で姿勢決定・制御する場合、搭載可能な機器のサイズや重

量に限りがあり、スターセンサ、スラスタ、リアクションホイールなど比較的大型の機器は搭載が困難である。したがって、SPROUTでは姿勢検出センサに地磁気センサ・ジャイロセンサ・太陽センサ、姿勢制御アクチュエータに磁気トルカを採用した。これらの機器は衛星構体のパネル面に取り付ける。また、低コストを実現するために宇宙用部品を用いるのではなく、民生品を組み合わせることにした。このような簡易なセンサやアクチュエータを用いて、超小型人工衛星でどこまで姿勢決定・制御が可能かを調査することが、SPROUTにおける姿勢制御系の実証実験の狙いである。これまでのSPROUT開発において、ジャイロセンサ・地磁気センサ・磁気トルカについては動作確認済みである。しかし、太陽センサについてはまだ動作確認や精度評価ができていない。本研究では残す太陽センサの開発を行い、その精度評価をする。

2. 太陽センサ

2.1. 太陽センサとは

太陽センサは、太陽の方向を検出することにより、衛星の姿勢角を求めるセンサである。太陽センサは“粗太陽センサ”と“精太陽センサ”に大別され、本研究で開発するのは粗太陽センサである。粗太陽センサは広視野で簡単・確実に太陽方向を直接検出できることから、定常運用時の他に安全を確保する初期姿勢捕捉センサとしても使用される^[1]。一般的な衛星では、粗太陽センサの次に精太陽センサを用いて高精度で太陽を観測し姿勢を決定するが、精太陽センサは高価で大型であることから超小型人工衛星のサイズ的设计要求を満たすことができない。したがって、SPROUTでは粗太陽センサのみを用いて姿勢決定することを試みる。

2.2. 太陽センサの動作原理

光の入射位置を検出する方法として多数の小型検出器を並べたり、多分割された CCD などの検出器を用いて行う方法がある。これに対し、1個の検出器で光の入射位置を検出するものとして PSD (Position Sensitive Detector: 位置検出素子)がある。PSDは、フォトダイオードの表面抵抗を利用した非分割型の受光素子のため、連続した電気信号が得られ、位置分解能・応答性・信頼性に優れている。

本研究では浜松ホトニクス社製の 2次元 PSD S5991-01 を光検出素子として用いることにした。

Fig.2 に外観を示す^[2]。この素子の表面には Fig.2 のように平面座標に対応する出力電極がある。受光部に光が入射すると、入射位置には光量に比例した電荷が発生する。この電荷は光電流として両端に設置された電極までの距離に逆比例して分割され、電極より出力される。出力される電流は微小であり、オペアンプによって増幅・電圧に変換し、A/D コンバータを介してデジタル化しマイクロコンピュータで読み込む。読み込んだ値を 2.3.節の位置換算式に代入すれば容易に入射位置の座標が求まる。

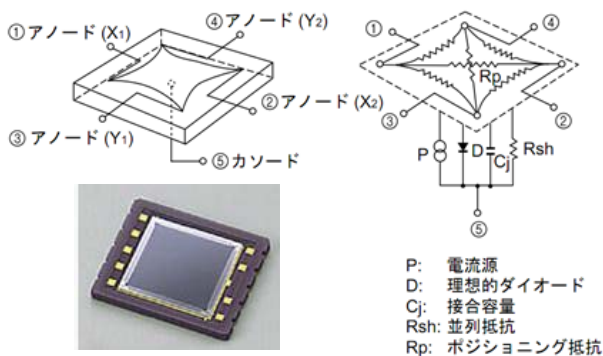


Fig.2 2次元 PSD

2.3. 角度測定原理

各出力電極からの微小電流を $I_{X1}, I_{X2}, I_{Y1}, I_{Y2}$ とし、 x, y 軸方向の受光面の長さを L_x, L_y とする。

入射位置換算は式(1)で表される^[2]。

$$\begin{aligned} x &= \frac{L_x \{ (I_{X2} + I_{Y1}) - (I_{X1} + I_{Y2}) \}}{2(I_{X1} + I_{X2} + I_{Y1} + I_{Y2})} \\ y &= \frac{L_y \{ (I_{X2} + I_{Y2}) - (I_{X1} + I_{Y1}) \}}{2(I_{X1} + I_{X2} + I_{Y1} + I_{Y2})} \end{aligned} \quad (1)$$

受光面の原点から入射光位置までの距離 r は三平方の定理より求まる。また、受光面からピンホールまでの距離 h は既知であるため、式(2)より入射角度 θ が求まる。

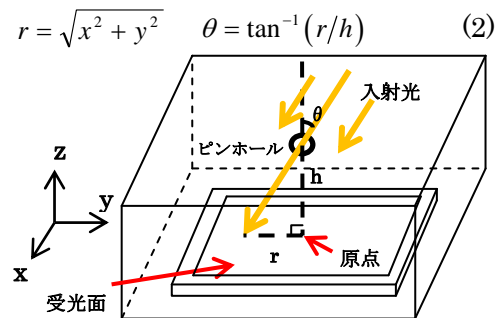


Fig.3 角度測定原理概念

2.4. 光の整形

PSD は入射された光の位置によって座標を決定するため、太陽光をスポット光に整形させる必要がある。整形する精度により太陽センサの性能に影響を及ぼすため、本研究ではシグマ光機社製の精密ピンホールを用いることにした。このピンホールはニッケル製の基板に特殊加工により穴をあけたもので、ほぼ完全な真円の形状を有する^[3]。また、ピンホールの直径 ϕ は PSD のデータシート^[2]より 0.2[mm] とした。



Fig.4 精密ピンホール PA-200

2.5. 電流-電圧変換 (I-V 変換) および増幅回路

本研究では、微小電流を増幅し電圧に変換する IC として、National Semiconductor 社製の CMOS クワッドオペアンプ LMC6464 を用いることにした。これを選定した理由は、動作温度範囲が $-65^{\circ}\text{C} \sim +150^{\circ}\text{C}$ と比較的広いためである。Fig.5 に回路図を示す。PSD から出力された微弱電流を最初のオペアンプで電圧に変換・増幅する。その際、出力電圧が反転され負電圧となり A/D コンバータ (MCP3208) で検出できなくなるため、次のオペアンプで反転増幅させる。増幅率は I-V 変換時に 10^5 倍、反転増幅時に 10 倍しており、最終的な入力に対する出力の

増幅率は 10^6 倍である。この倍率に設定した理由は、A/D コンバータの動作限界が 5V であり、これを超えない数値にするため実験を繰り返し適当な値を選択した。

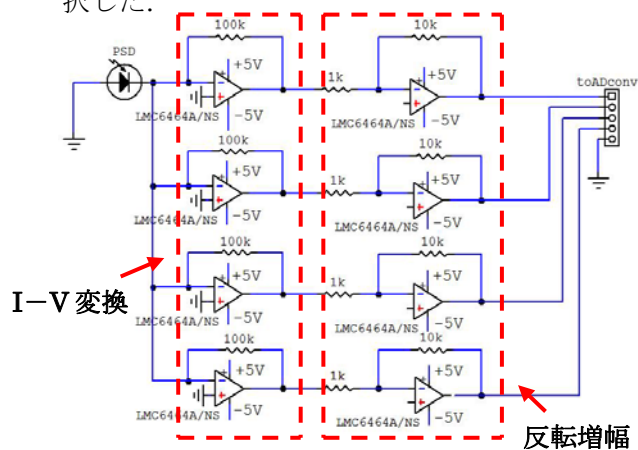


Fig.5 電流-電圧変換・増幅回路

2.6. ハードウェアの開発

SPROUT では構体の各面に一つ太陽センサを取り付ける予定である。全空間を太陽センサで把握しようとした場合、取り付ける場所にもよるが1つのセンサで $\pm 54.8[\text{deg.}]$ 以上把握する必要がある。しかし、検出範囲を拡大するには PSD に入射した光の位置をより正確に判断することが求められるため、安易に検出範囲を拡大することはできない。そこで、最大検出角が $\pm 50[\text{deg.}]$ 、 $\pm 55[\text{deg.}]$ 、 $\pm 60[\text{deg.}]$ の3つのカバーを作成しそれぞれの精度評価をすることにした。それぞれのカバーの違いは、PSD の受光面からピンホールまでの距離 h である。また、ピンホールは上下カバーによって固定している。Table 1. Fig.6 に太陽センサの仕様と外観を示す。今回、材質については加工費や納期の都合上、A2017 を使用したがフライトモデルでは構体と同一の材質にするため A6061 を用いる予定である。

Table 1. 太陽センサ仕様

最大検出角 θ [deg]	受光面とピンホールの距離 h [mm]	外形寸法[mm] (縦×横×高さ)	重量 [g]
± 50	3.6	40×40×0.80	33
± 55	3.1	40×40×0.75	31
± 60	2.6	40×40×0.70	30

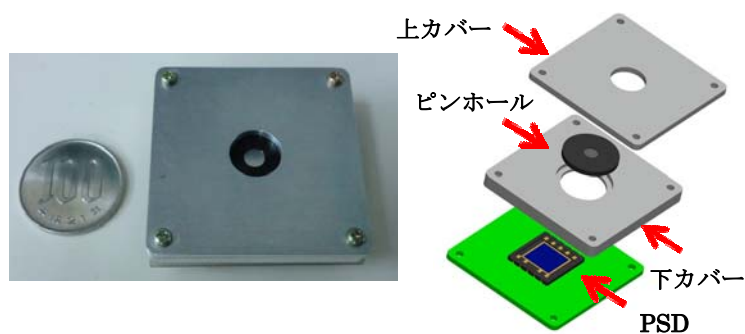


Fig.6 太陽センサの外観

3. 角度検出実験

3.1. 実験方法

本実験では、不要な背景光をカットするために、室内に暗室を設置しその中で角度検出実験を行った。太陽光を模擬するために、セリック株式会社製の人工太陽照明灯(SOLAX)XC-500Eを採用した。この照明灯は、放射波長域 370~780[nm]で太陽光とほぼ一致したスペクトルを出すことが可能である。Fig.7 に自然太陽光と人工照明灯の分光分布比較を示す^[4]。

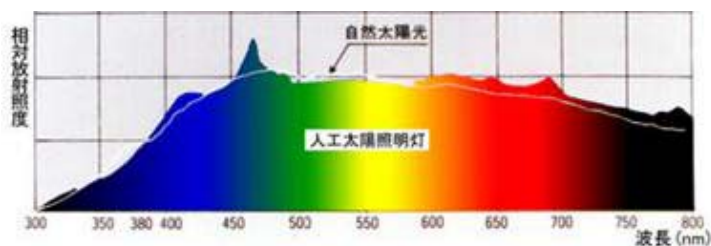


Fig.7 分光分布比較

また、3 軸角度計機能付き三脚に太陽センサを取り付け、三脚を回転させることにより入射角 θ を $5[\text{deg}]$ 刻みで変化させ、そのときの太陽センサが出力する電圧を測定した。Fig.8 に実験の様子を示す。

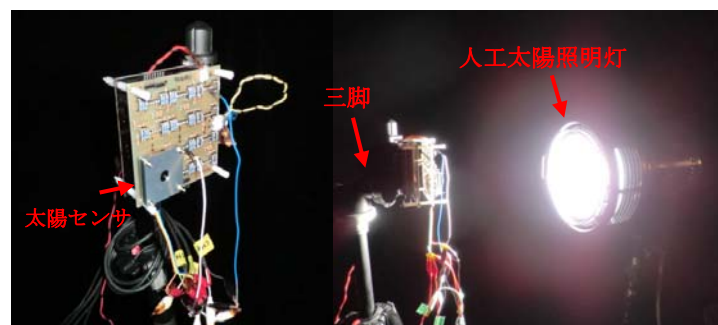


Fig.8 角度検出実験の様子

このとき、電圧データ収集にはキーエンス社製の NR-2000 を用いた。測定した電圧を式(1),(2)に代

入して入射角を求める。

3.2. 結果および考察

角度検出実験の結果を Fig.9,10,11 に示す。開発した最大検出角 $\pm 50[\text{deg.}]$ $\pm 55[\text{deg.}]$ $\pm 60[\text{deg.}]$ の3つの太陽センサはそれぞれ、 $\pm 3.7[\text{deg.}]$ 、 $\pm 5.3[\text{deg.}]$ 、 $\pm 15.9[\text{deg.}]$ 以下の誤差で検出できている。

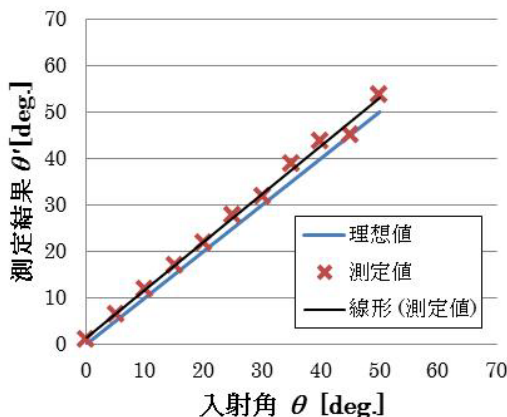


Fig.9 太陽センサ 最大検出角 $\pm 50[\text{deg.}]$

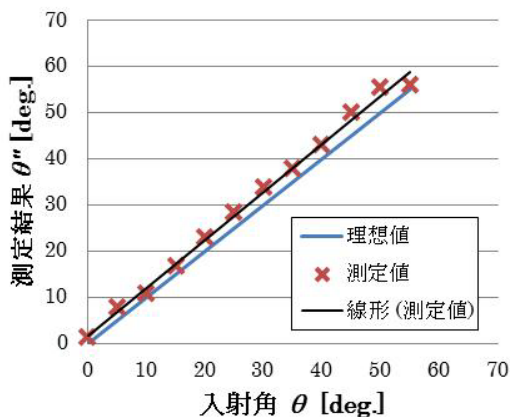


Fig.10 太陽センサ 最大検出角 $\pm 55[\text{deg.}]$

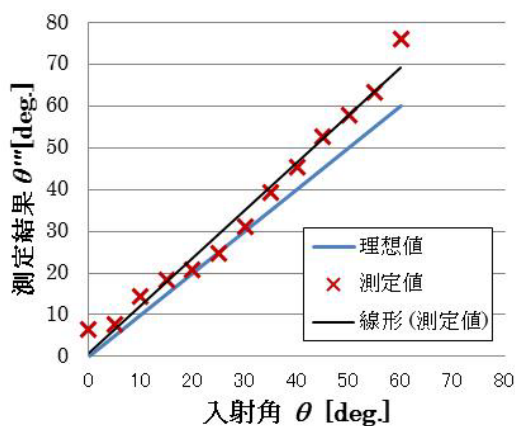


Fig.11 太陽センサ 最大検出角 $\pm 60[\text{deg.}]$

誤差の原因は以下の通りである。PSD 表面は素子を保護するため、シリコン樹脂でコーティングされている。このため斜めから入射した光がシリコン樹脂によって屈折・散乱していることが考えられる。また、斜めから入射した光は PSD に届く際、円ではなく楕円になる他、PSD は原点を中心として周辺部は中心部に比べ位置検出誤差が大きいため^[2]、入射角の増加とともに誤差も増加していると考えられる。

本実験では、最大検出角 $\pm 50[\text{deg.}]$ の太陽センサが最も精度良く入射角を検出できていることが確認できたが、2.6.節で述べたように、太陽センサを6面につけて全空間を把握しようとする1つのセンサあたり $\pm 54.8[\text{deg.}]$ 以上把握する必要がある。本実験で最大検出角 $\pm 55[\text{deg.}]$ の太陽センサでも、比較的精度よく検出できると確認したので、今後はこの太陽センサを用いることにした。これにより、SPROUT は太陽光をほぼ全空間で捕捉することが可能となる。

4. 結言

最大検出角 $\pm 55[\text{deg.}]$ の太陽センサを開発し、 $\pm 5.3[\text{deg.}]$ 以下の精度で検出することが可能である。これにより、SPROUT で姿勢決定・制御実験する際に必要となる機器は揃った。今後はこれらの機器の統合や振動・熱・真空などの環境試験を行う。

参考文献

- [1]姿勢制御研究委員会:人工衛星の力学と制御ハンドブック, 培風館(2007),pp.341
- [2] 浜松ホトニクス, PSD の特性と使い方
http://jp.hamamatsu.com/resources/products/sd/pdf/tech/psd_technical_information.pdf
- [3] シグマ光機株式会社, 精密ピンホール
<http://www.sigma-koki.com/pdf/jp/C020708.pdf>
- [4] セリック株式会社, 人工太陽照明灯
<http://www.seric.co.jp/product/lig/lig02.html>