

光学センサにおける偏光技術の研究 Research on polarization characteristics of optical sensor

総合技術研究本部 エレクトロニクス技術グループ
Spacecraft Electrical Engineering Group
Institute of Space Technology and Aeronautics
松山 浩子 丹下 義夫
Hiroko Matsuyama, Yoshio Tange

Abstract

Measurement and analysis on polarization phenomena of optical sensor were carried out. These results could be utilized for the design and caribration of polarization characteristics on optical sensor.

1. はじめに

光学センサにおける偏光感度性能とは、入射光の偏光状態によってセンサの感度に変化する度合いを示すものである。海洋の水色観測のように、測定したい観測対象からセンサに入射する光の強度に対して、観測対象外から入射する光の偏光特性が観測結果に大きな影響を及ぼすセンサでは、入射光の偏光状態によらずセンサの感度を一定にする技術とともに、偏光に対する感度特性を正確に評価する技術が不可欠である。これまでの衛星搭載センサでは、偏光特性についての設計、試験手法に関する十分なデータや確立された技術がなく、偏光に関する十分な特性の把握とそれに基づく検討が必要である。

一方、偏光観測センサは、逆に観測対象からの入射光の偏光状態を検知することで、光強度測定だけではわからない観測対象の情報を得る技術である。偏光観測は、大気エアロゾルの解明に有効と考えられ、GCOM 搭載 SGLI では偏光観測機能の搭載に対する強い要求があるが、我が国では地球観測における衛星搭載の偏光観測センサの開発実績がない。最適な偏光観測方式、キーコンポーネントとなる偏光子の特性評価など、その基盤技術の確立が急務である。

本研究では、SGLI などの広画角マルチバンドセンサを想定し、センサを構成する光学素子ごとの偏光に関する特性の評価、解析を通じて、光学センサの偏光特性の制御、評価に必要な基盤技術を確立する。

2. FY15 研究の概要

平成15年度は、以下の項目について実施した。

2.1 近赤外波長域における偏光特性評価装置の構築

光学センサ及びそれらを構成する各種光学素子の偏光特性評価試験装置について、これまでに実施した可視波長域に加え、近赤外波長域において測定可能な評価装置を構築

した。

2.2 ガラス偏光子、有機膜偏光子の光学特性評価試験

SGLI 等、広画角なマルチバンドセンサでの偏光観測に有効と考えられるガラス偏光子及び有機膜偏光子について、偏光特性に関する評価試験を実施した。

2.3 光学素子ミューラマトリックスの評価測定

センサの偏光特性に対し、光学ガラスのマルチコーティング、BPF 等の特性が与える影響を把握するため、それらの偏光特性の評価を開始した。特にセンサの偏光特性に対する影響の大きい代表的な光学素子についてミューラマトリックスの測定を実施した。

3. 成果の概要

3.1 光学センサの偏光特性解析

光学センサにおいて、入射光とセンサ出力との間の偏光に関する関係は、下記で表される。

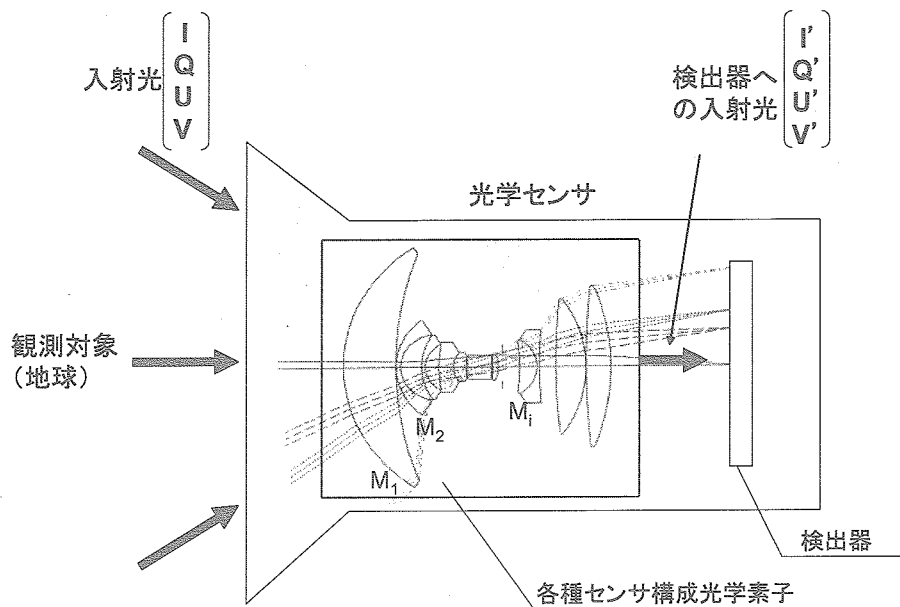


図 1. 光学センサにおける偏光モデル

$$\begin{pmatrix} I' \\ Q' \\ U' \\ V' \end{pmatrix} = \mathbf{M}_{\text{sensor}} \cdot \begin{pmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{pmatrix} = \mathbf{M}_1 \cdot \mathbf{M}_2 \cdots \mathbf{M}_n \cdot \begin{pmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{pmatrix} \quad (3.1.1)$$

ここで、 (I, Q, U, V) 、 (I', Q', U', V') は、それぞれセンサへの入射光、センサ内光学系の透過光（検知器への入射光）の偏光特性を表すストークスパラメータである。また、 $\mathbf{M}_{\text{sensor}}$ 、 $\mathbf{M}_1, \mathbf{M}_2, \dots, \mathbf{M}_n$ は、センサ及びセンサを構成する各光学素子の偏光特性を記述する4行4列のマトリックスである。

地球観測においては、偏光円偏光成分:V は微小であるとして省略して検討されている。

CCDなどの検出器で測定されるのは、光強度を示すI成分のみである。したがって、センサ出力は、

$$X = G \cdot (\alpha I + \beta Q + \gamma U) + C \quad (3.1.2)$$

Gはゲイン、Cは暗時成分である。

ここで、偏光観測センサの場合では、光路中に直線偏光子を挿入する。直線偏光子のミューラーマトリックスは、下記で示される。

$$\begin{pmatrix} I' \\ Q' \\ U' \\ V' \end{pmatrix} = \left(\frac{T_l + T_r}{2} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \begin{pmatrix} 1 & P_0 \cos 2\varphi & P_0 \sin 2\varphi & 0 \\ P_0 \cos 2\varphi & 1 - P_0 \sin^2 2\varphi & P_0 \cos 2\varphi \sin 2\varphi & 0 \\ P_0 \sin 2\varphi & P_0 \cos 2\varphi \sin 2\varphi & 1 - P_0 \cos^2 2\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 - P_0 \end{pmatrix} \quad (3.1.3)$$

$$P_0 = \left(\frac{T_l - T_r}{T_l + T_r} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.1.4)$$

φ は、基準方向に対する直線偏光子の方位角である。

偏光観測センサでは、観測対象からの入射光に対し、少なくとも3方位角に対する出力から、入射光のストークスパラメータ(I, Q, U)を求める。SGLIのようにラジオメトリック性能を重視した広面角なマルチバンドセンサにおいて偏光観測を行うためには、偏光子に対し下記のような性能項目が重要となる。

- ・ 透過率が高いこと
- ・ 消光比が高いこと
- ・ 入射角度依存性がないこと

消光比については、偏光度1%の精度で偏光観測を実施するのに必要な消光比を3桁以上と見積もった。

本研究では、上記条件を有し、広画面角な偏光観測センサに有効と考えられる偏光子として、ガラス偏光子、有機膜偏光子を選定し、その偏光特性について評価を実施する。

一方、センサ出力を表す(2)式において、校正係数 α, β, γ は各種光学機器の偏光特性（ミューラーマトリックス）の複合結果であり、波長及び入射角の関数である（直線偏光子を有する偏光観測センサでは、偏光子の方位角もパラメータとして含まれる）。偏光特性に関するモデル式は、センサ構成、及び使用する光学素子の特性によって大きく異なる。従って、輝度観測を目的としたセンサの偏光感度性能の向上、及び偏光観測センサの校正には、それを構成する各光学素子の偏光特性を把握し、設計段階でそれらを含めたセンサの校正式がどのようにモデル化されるべきかを考慮し、また校正の段階で評価が必要なパラメータとその評価方法を見越した開発方針が必要となる。

本研究では、センサの偏光特性の変動に対する影響の大きい代表的な光学素子数種についてミューラーマトリックスの測定を実施する。また、そのデータをもとにセンサの偏光特性のモデル化の検討、解析結果との比較を行い、そこから設計で生じやすい誤差要因について検討を行う。

3.2 評価測定

3.2.1 近赤外波長域における偏光特性評価装置の構築

平成15年度では、これまでに実施した可視域に加え、近赤外波長域での測定装置の構築を実施した。測定装置の概要を図3.2.1-1に、装置写真を図3.2.1-2に示す。

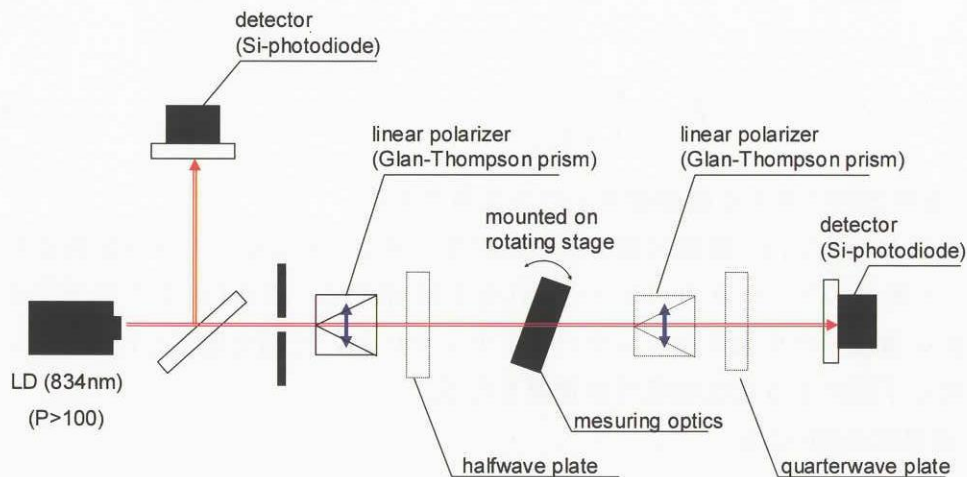


Fig.3.2.1-1 Polarization measurement system

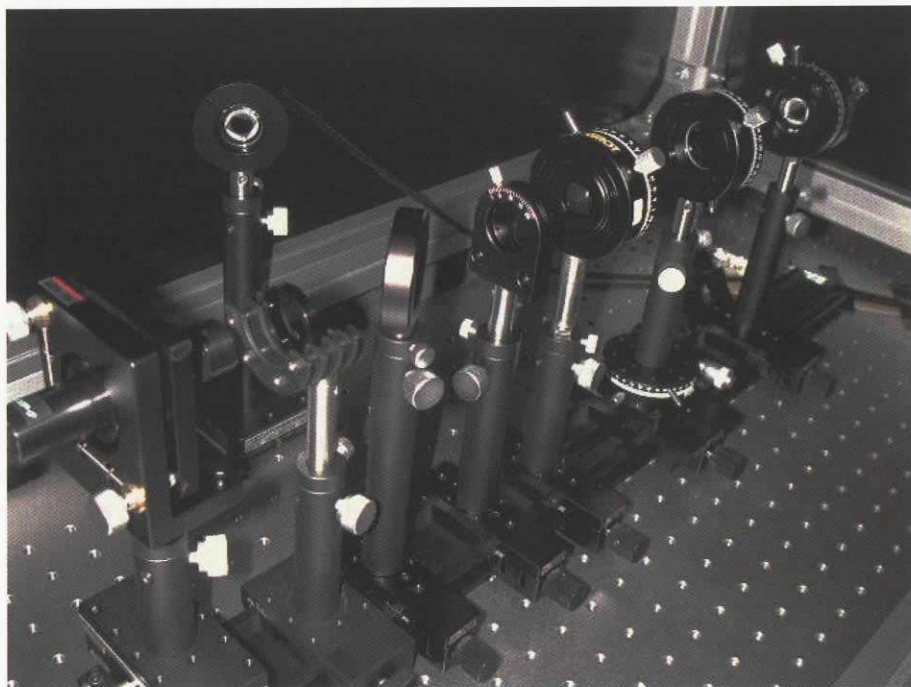


Fig. 3.2.1-2 Measuring equipment

光源には、レーザダイオード（中心波長 834nm、偏光度 ≈ 200 ）を用い、さらにグラントムソンプリズム（偏光効率 $>10^5$ ）を通して発生する直線偏光光を被測定対象を透過させ、光強度を Si フォトダイオードで検出した。グラントムソンプリズムの手前にハーフミラーを挿入し、光源の光量変化をモニタしている。入射角度依存性を測定するため、被測定対象は回転ステージに設置した。

偏光光源の方位角を変化させた測定を行う場合には、グラントムソンプリズム通過後に $\lambda/2$ 板を用いる。また、ミュラーマトリックス測定の際には、被測定対象を透過した光のストークスパラメータの測定が必要となるため、被測定対象の後ろにグラントムソンプリズムを設置して測定を実施した。また、さらに $\lambda/4$ 板を設置することにより V パラメータまで測定を行うことが可能である。

3.2.2 偏光子の特性評価

ガラス偏光子及び有機膜偏光子の光学特性評価について、昨年度に引き続き可視波長域用偏光子の評価を進めるとともに、平成15年度では、近赤外波長域用の偏光子についても評価を実施した。

(1) 近赤外波長用ガラス偏光子、有機膜偏光子の方位角特性

3.2.1 で構築した測定系を用いて、波長 834nm におけるガラス偏光子及び有機膜偏光子の偏光特性を取得した。ガラス偏光子としてコーニング社製の Polarcor (偏光中心波長 900nm)、有機膜偏光子としてルケオ社製の Polax30IR (赤外用) の評価を実施した。評価結果を Fig 3.2.2-1、Table 3.2.2-1 に示す。

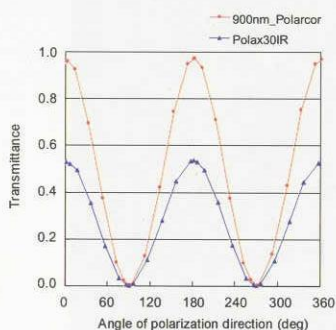


Table 3.2.2-1 Polarization performance @ 834nm(LD)

| | Transmittance(%) | Extinction ratio |
|-------------------------------------|--|------------------|
| Glass Polarizer (900nm_Polarcor) | 96.8 (parallel) 0.0000086 (perpendicular) | 1×10^5 |
| Film Polarizer (Polax30IR) | 53.4 (parallel) 0.0000078 (perpendicular) | 7×10^4 |

Fig 3.2.2-1 偏光子の方位角特性

波長 834nm において、特にガラス偏光子は非常に高い透過率を有する。また、各偏光子とも消光比は 4 桁を超えており、偏光観測に必要な消光比を有している。

(2) 近赤外波長域用のガラス偏光子、有機膜偏光子の入射角特性

波長 834nm におけるガラス偏光子(Polarcor/900nm)及び有機膜偏光子(Polax30IR)の偏光特性の入射角度依存性を取得した。入射光の偏光方向が偏光子の透過軸に対し平行な場合の透過率と垂直な場合の透過率の入射角に対する測定結果を、それぞれ Fig 3.2.2-2(a) 3.2.2-2(b)に示す。

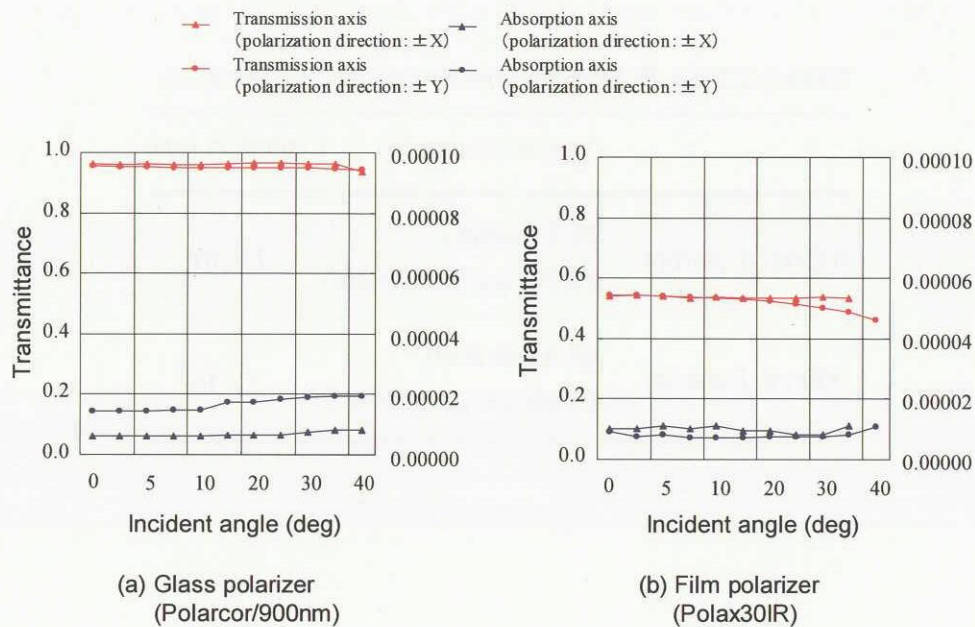


Fig.3.2.2-2 Polarization transmittance dependent on incident angle

入射角度が 20 度前後を超えると、偏光子の透過軸に平行な偏光光の透過率が低下し、また偏光子の方位角に垂直な偏光光の透過率が増加しており、消光比がやや劣化する。

今回の入射角依存性測定では、測定系内部の素子間多重反射による測定誤差や、測定器のダイナミックレンジの制限による透過軸に垂直な場合の測定精度が悪いといった問題点がある。今後検討を行い、測定精度の改善を図る。

(3) ガラス偏光子の波長特性

SGLI のような広画角マルチバンドセンサでは、センサシステムの構成方法によって、観測波長である 678nm と 865nm の両バンドで同一の偏光子を使用する構成も考えられる。そこで、678nm で最も高い消光比を有する偏光中心波長 633nm のガラス偏光子、及び 865nm で最も高い消光比を有する偏光中心波長 900nm のガラス偏光子について、可視(670nm)および近赤外 (830nm)の両波長域における特性評価を実施した。評価結果を Table 3.2.2-3a, Table 3.2.2-3b に示す。

Table 3.2.2-3a Polarization performance @ 670nm(LD)

| | Transmittance(%) | Extinction ratio |
|----------------|---|------------------|
| 633nm_Polarcor | 89.3 (parallel) 0.0012 (perpendicular) | 7×10^4 |
| 900nm_Polarcor | 68.8 (parallel) 0.038 (perpendicular) | 2×10^3 |

Table 3.2.2-3b Polarization performance @ 834nm(LD)

| | Transmittance(%) | Extinction ratio |
|----------------|--|------------------|
| 633nm_Polarcor | 95.3 (parallel) 1.05 (perpendicular) | 90 |
| 900nm_Polarcor | 96.8 (parallel) 0.00086 (perpendicular) | 1×10^5 |

両偏光子とも、両波長域において高い透過率を有する。一方で消光比については、波長依存性がかなり高く、両バンドでの同一偏光子の共用は難しい。今回の測定では、678,865nm それぞれで最も性能が得られる Polarcor_633,900 を用いたが、800nm 付近を対象としたガラス偏光子が製造可能であり、評価試験を行っていく必要がある。

3.2.3 ミュラーマトリックスの測定

平成15年度は、センサを構成する光学素子のミュラーマトリックス測定に着手した。代表的なガラス材料 BK 7 (AR マルチコーティング有／なし)、BPF (SPF/WAMS_VNIR678nm 用)、及びガラス偏光子について、直入射におけるミュラーマトリックスの測定を実施した。結果を Table .3.2.3-1 に示す。

本評価に用いた Polarcor/633nm は、3.2.2 項の評価結果より、670nm における透過率及び消光比はそれぞれ、89.3 (透過率、parallel)、 7×10^4 (消光比) であるので、理

論的なミューマトリックスは(3.1.3)式より下記の通りとなり、測定結果と非常によく一致している。

$$\left(\frac{T_t+T_r}{2}\right)^{\frac{1}{2}}\cdot\begin{pmatrix} 1 & P_0\cos2\varphi & P_0\sin2\varphi \\ P_0\cos2\varphi & 1-P_0\sin^22\varphi & P_0\cos2\varphi\sin2\varphi \\ P_0\sin2\varphi & P_0\cos2\varphi\sin2\varphi & 1-P_0\cos^22\varphi \end{pmatrix}\approx\begin{pmatrix} 44.6 & 44.6 & 0 \\ 44.6 & 44.6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

また、他の光学素子については、直入射において入射光の方位角を変化させる成分はみられない。直線偏光子を除く他の光学素子が、入射光の p 偏光、s 偏光の透過率の比率のみを変化させるという仮定に基づく場合には、偏光光が光学素子に角度を持って入射した場合に、要素(1,2)及び要素(2,1)が変わると予測される。今後入射角依存性についての測定を実施する。

Table 3.2.3-1 Measurement of Muller Matrix
(@ 670nm(LD), θ=0deg)

| material | Muller Matrix |
|-------------------------------------|--|
| Glass Polarizer (Polarcor/633nm) | $\begin{pmatrix} 0.448 & 0.450 & -0.013 \\ 0.441 & 0.444 & -0.007 \\ -0.002 & -0.004 & -0.003 \end{pmatrix}$ |
| BK7 (AR multi coated) | $\begin{pmatrix} 1.010 & 0.005 & 0.005 \\ -0.005 & 0.992 & -0.008 \\ 0.013 & 0.004 & 1.004 \end{pmatrix}$ |
| BK7 | $\begin{pmatrix} 0.958 & -0.016 & -0.011 \\ -0.012 & 0.962 & 0.004 \\ -0.005 & -0.011 & 0.957 \end{pmatrix}$ |
| BPF(678nm) (for SPF/ WAMS) | $\begin{pmatrix} 0.896 & -0.008 & -0.002 \\ -0.004 & 0.896 & 0.003 \\ 0.008 & -0.017 & 0.889 \end{pmatrix}$ |

4. まとめ

各種光学素子の偏光特性を把握するため、可視波長域に加え、近赤外波長域における測定系の構築を行い、ガラス偏光子、及び有機膜偏光子の特性評価を実施した。また、光学素子のミュラーマトリックス測定に着手し、代表的な光学材料に関して直入射における測定を実施した。

今後は、測定誤差の原因となってる回転機構の手動操作を自動化し、測定精度の向上を目指す。また、偏光子に加えて、偏光感度の抑制に用いられる偏光解消子についても特性評価を実施する。さらに、これまでの評価結果より衛星搭載の偏光観測センサに最も適していると考えられるガラス偏光子について、耐放射線特性などの取得を行う。光学素子のミュラーマトリックスについては入射角特性の評価を実施し、解析結果との比較検討を実施する。

さらに、センサシステムとしての偏光特性の評価方法、および偏光観測チャンネルの校正方法についても検討していく。