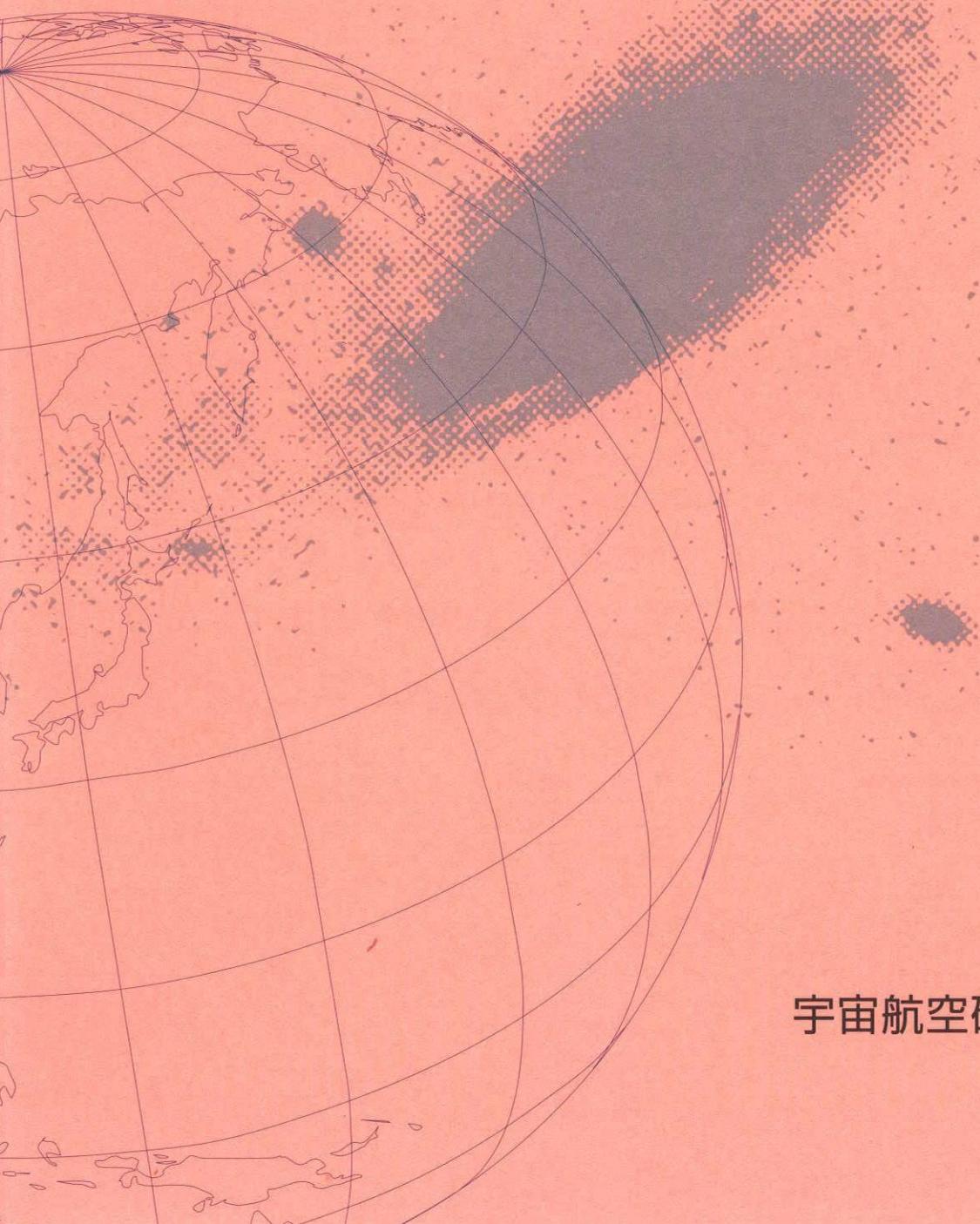


宇宙航空研究開発機構研究開発資料

液晶同調フィルタを用いた画像型分光偏光放射計の試作
—平成13,14年度萌芽的研究—



2004年3月

宇宙航空研究開発機構

宇宙航空研究開発機構研究開発資料
JAXA Research and Development Memorandum

液晶同調フィルタを用いた画像型分光偏光放射計の試作
—平成13,14年度萌芽的研究—

Development of an Imaging Spectropolarimeter
Using a Liquid Crystal Tunable Filter

新宮 博公^{*1}、本間 幸造^{*1}、山本 浩通^{*1}、黒崎 裕久^{*2}、鈴木 孝雄^{*3}

Hirokimi SHINGU , Kohzo HOMMA , Hiromichi YAMAMOTO , Hirohisa KUROSAKI , Takao SUZUKI

*1: 総合技術研究本部 飛行試験技術開発センター

Flight Test and Simulation Technology Center
Institute of Space Technology and Aeronautics

*2: 慶應義塾大学SFC研究所

Keio Research Institute at SFC

*3: リモート・センシング技術センター

Remote Sensing Technology Center

2004年3月
March 2004

宇宙航空研究開発機構
Japan Aerospace Exploration Agency

液晶同調フィルタを用いた画像型分光偏光放射計の試作*

－平成13,14年度萌芽的研究－

新宮博公^{*1}、本間幸造^{*1}、山本浩通^{*1}、黒崎裕久^{*2}、鈴木孝雄^{*3}

Development of an Imaging Spectropolarimeter Using a Liquid Crystal Tunable Filter*

Hirokimi SHINGU^{*1}, Kohzo HOMMA^{*1}, Hiromichi YAMAMOTO^{*1},
Hiroyuki KUROSAKI^{*2}, Takao SUZUKI^{*3}

Abstract

There exists a potential demand for determining surface conditions from the optical properties under the necessity of protecting the Earth's environment. In particular, hyper-spectral analysis of solar rays reflected from the Earth's surface is expected to play an important role in future Earth environment observation. A new type of imaging spectropolarimeter using an LCTF has been developed at NAL for such analysis. Efforts are now under way to put this sensor to practical use in Earth environment remote sensing.

This paper first presents the concept for construction of an LCTF spectropolarimeter which senses radiation in the 400–720 nm wavelength band. Next, an outline of an optical observation system that incorporates an LCTF spectropolarimeter is described. The results of laboratory experiments to evaluate the performance characteristics of the optical observation system, e.g. hyper-spectral resolution of about 10 nm, etc., are then presented, and the results of further experiments conducted outdoors to measure spectral characteristics of solar rays reflected from land and water surfaces are also shown. Moreover, an outline of the preliminary flight experiment, which was conducted to validate the functions of the observation system in a flight environment, is shown. Finally, evaluations of the observation system are summarized based on the results of indoor and outdoor experiments.

Keywords: optical sensor, LCTF(liquid crystal tunable filter), imaging spectropolarimeter, remote sensing, Earth observation

概要

地球環境保護の必要性から光学的に表面条件を決めるための要求が潜在的に存在している。特に、地球表面からの太陽反射光の分光偏光解析が将来の地球環境観測に重要視されている。当機構では、そのような解析のために液晶同調フィルタを用いた新しい型の分光偏光放射計を研究試作し、地球環境リモートセンシング用に実用化していく試みが進行中である。

本論文では、まず、400～720 nm の波長域（可視域）で計測可能なLCTF分光偏光放射計の構成概念を示す。次に、この放射計を用いた光学観測システムの概要を述べる。光学観測システムの性能特性の評価のために行われた室内試験の結果として、10 nm 程度の高波長分解能等を示すとともに、地表面、水面からの太陽反射光の分光特性を計測するために行われた屋外実験の結果を示す。さらに、観測システムの機能評価のために行われた予備飛行実験の概要を示す。最後に、室内外実験の結果に基づいて、観測システムの評価の概要を述べる。

* 平成15年3月28日受付(received 28 March, 2003)

*1 総合技術研究本部 飛行試験技術開発センター

(Flight Test and Simulation Technology Center, Institute of Space Technology and Aeronautics)

*2 慶應義塾大学SFC研究所(Keio Research Institute at SFC)

*3 リモート・センシング技術センター(Remote Sensing Technology Center)

記号及び略号

AGC (Automatic Gain Controller) : 自動ゲイン調整器 (CCDセンサの出力を入射光の強弱に応じて調整する装置)

CCD (Charge Coupled Device) : 固体撮像素子

CD-RW (Compact Disk Re-Writable) : 相変化記録方式を採用し、ユーザが任意のデータを書いたり消去したりできるCD

CPU (Central Processor Unit) : 中央演算ユニット

CSV (Comma Separated Values) : データをカンマで区切って並べたファイル形式

DDS (Direct Digital RF Synthesizer) : RF信号 (音波信号) を発生する

DOS/V (Disk Operating System / Five) : ディスクオペレーティングシステム

Excel : マイクロソフト社製表計算ソフトウェア

FWHM : Full Width at the Half Maximum

HDD (Hard Disk Drive) : ハードディスク

IEEE1394 (Institute of Electrical and Electronic Engineers 1394)

LCTF (Liquid Crystal Tunable Filter) : 液晶同調フィルタ

MO (Magneto Optical disk) : 光磁気ディスク

NTSC (National Television System Committee) : 白黒テレビ受信機でもカラーテレビの信号を受信できる両立性テレビ方式

OS (Operating System) : オペレーティング・システム

PCI (Peripheral Components Interconnect bus) : データ伝送路の規格

RS232C : モデムとパソコンを接続するための規格の総称

SCSI (Small Computer System Interface) : パソコン本体と周辺機器の接続方法の取り決め

SFC (Shonan Fujisawa Campus) : 慶應義塾大学湘南藤沢校舎

TFT : Thin Film Transistor (薄膜トランジスタ)

TIFF (Tagged-Image File Format) : 画像イメージ用ファイルフォーマット

1. はじめに

地球環境保護の必要性が増大するにつれて、航空機／宇宙機利用環境リモートセンシングの必要性も増大し、航空機、ヘリコプター、衛星等を用いて、空域、宇宙から地表面、海面、植生等を観測するためのセンサの開発並びに観測データから表面条件を推定するための技術開発が進められている¹⁾⁻⁷⁾。特に、地表面、海面からの太陽反射光の光学分光特性の計測が注目されるようになり⁷⁾⁻⁹⁾、この光学分光特性から植生、土壤、水面等の特性を決定する技術の確立が地球環境観測に重要視されるようになっている¹⁰⁾⁻¹²⁾。

当機構では、1997年から2000年においてエアロゾル、地表面、海面等からの太陽反射光の連続分光／偏光特性が計測可能な液晶同調フィルタ (LCTF : Liquid Crystal Tunable Filter) を用いた画像型分光偏光放射計（以下LCTF分光偏光放射計と記す）の研究が進められ、地球環境リモートセンシング用として使用に耐える光学センサ(prototype model)の研究試作を行ってきてている¹³⁾⁻¹⁵⁾。この光学センサの研究成果をベースに、太陽反射光の分光偏光特性の計測を目標に、航空機環境リモートセンシング用として実用化に必要な計測システムを確立して、撮像対象の画像取得機能を有する光学観測システムの構

築並びに航空機等移動体による評価試験に関する研究を進めている。本LCTF分光偏光放射計は、1999年度に最初のプロトタイプモデルが試作されて以来、種々の改良が施されてきている。最新のモデルを用いた光学センサ観測システムが2001年度に完成し、室内評価試験によって、10 nm 程度の高波長分解能、出力波長の連続選択(連続分光) 可能、偏波面の任意選択可能等の優れた特長を有することが確認されている¹⁶⁾。また、当機構近くの多摩川縁で行われた屋外実験（実環境下における太陽反射光の計測）では、対象物の種類に対応して得られた画像データの解析結果より分光特性が輝度値として連続的に得られること、波長分光特性及び偏波面変位角（直線偏光子を透過後の光の偏波面と基準面のなす角）に対応して画像が異なること等が確認されている¹⁷⁾。

本報告では、まず、LCTF分光偏光放射計の構成概念、カメラ部の構成を示すと共に、当LCTF分光偏光放射計を組み込んだ光学観測システムのハードウェア構成、ソフトウェア構成を明らかにする。次に、LCTF分光偏光放射計観測システムを用いた機能評価試験の結果として、波長分解能、LCTF回転機構による透過光偏波面の回転機能について述べる。さらに、屋外実験の結果として、地表面を観測対象にした太陽反射光の観測データから得

られたスペクトル輝度のエリア（観測スポット、太陽反射面）による波長分光特性、偏光特性（偏波面変位角に対応した特性）の違い、観測エリアの画像データの波長分光特性、偏光特性の違いを示すと共に、地上建造物（ビルディング、高圧線）を被対象物にした太陽反射光の観測データから得られた同様な結果を示す。また、搭載化のために予備的に行った飛行試験の概要並びに空から撮像された地表面画像データの一例を示す。最後に、各試験、実験の結果を評価して、試作済LCTF分光偏光放射計（プロトタイプモデル）は、地表面観測用として有用であることを明らかにする。

2. LCTF分光偏光放射計の概要

LCTF分光偏光放射計を用いて対象物（被写体）の特徴抽出に有用なデータが得られるような波長帯域を知るために、対象物からの反射光の分光特性あるいは透過特性を測定することが必要である。このような分光特性や透過特性は、センサから被写体を見たときの分光放射輝度より得られるので、センサの各スペクトル帯域の分光輝度を測定すれば、それらの特性が求められる。一方、偏光状態は、進行波の電界ベクトルの軌跡に従って直線偏光、円偏光及び橢円偏光の三つに分類される。例えば、白熱光源や電子放射光源等から発せられる無偏光の光線は直線、円および橢円の各偏光状態を等しい確率で含んでいる可能性を持つ光線であると考えることができる。当機構で試作した分光偏光放射計は、そのような分光と偏光の二つの性質を計測できる機能を有するものである。但し、本LCTF分光偏光放射計は、分光を回折格子のような光学素子の性質を利用したものではなく、液晶同調フィルタ（LCTF）を用いたものであり、従来型とまったく異なる原理、方式の分光偏光放射計である。

光学観測システムの主構成要素としてのLCTF分光偏光放射計は、対物レンズ、CCDカメラのほかに分光／偏光機能を有する光学フィルタとして液晶同調フィルタ（LCTF）を用いている。

2.1 光学系の構成概念

本LCTF分光偏光放射計の概念図を図1に示す。主構成要素は、対物レンズ、リレーレンズ、LCTF、CCDカメラである。LCTFは透過波長を電子的に制御できる一種のバンドパスフィルタであり、リオフィルタ¹⁸⁾の機能を有する。LCTFは直線偏光子を含むため、それに応じた方向の偏光成分のみが透過する。リレーレンズが用いられているのは、フィルタ挿入部を平行光線にして、対物レンズの焦点距離を見かけ上伸ばすことにより、対物レンズとCCDカメラの間にLCTFを装着容易にするため

である。

被写体からの反射光が対物レンズに入射され、リレーレンズによって平行光となってLCTFに取り込まれる。LCTFでは、外部からの駆動信号によって選択された波長、偏波面変位角を有する光のみが透過し、これがリレーレンズを通して結像面のCCDカメラ受光部で画像信号に変換される。このようにして、CCDカメラでは選択された特定の波長、特定の偏光面の光によって照射された対象物の画像が検出される。

このLCTF分光偏光放射計は、上記動作原理に基いて試作されたものであり、直線偏光子の機能を有するLCTFを用いた可視域の光学センサであること、LCTFに印加する直流電圧によって透過光の波長を任意に選択可能にすること、連続分光／偏光が可能であること、等が特長である。また、この光学センサは分光特性から可視域中心での観測に向いており、太陽光の被反射対象物（湖水、海、河川、森林等）の観測に適していることと、特に葉緑素（クロロフィル）等の分光特性を満足するものであり、地表面、航空機等からそれらの対象物を観測する放射計の実現をめざすものである。

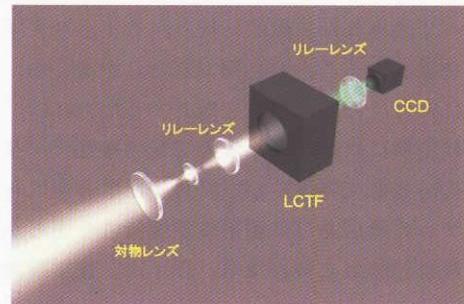


図1 LCTF分光偏光放射計概念図

2.2 LCTF 分光偏光放射計の内部構成

LCTF分光偏光放射計の内部は、前節の構成概念で述べたようにLCTFの偏波面（振動面）を変化させて、各偏波面における分光画像データが取得できるようするために、LCTFにはステッピングモータ駆動型フィルタ回転機構が筐体内に装着されていて、光学センサ制御装置からの制御信号に応じて±90°の範囲内でLCTF透過光の偏波面（振動面）を任意の角位置に設定できるようになっている。なお、対物レンズは、一般的なカメラレンズを使用し観測対象によって各種交換可能であり、CCDカメラ取付け部も同様にCマウント方式のため各種CCDカメラを交換して取付けることが可能である。本LCTF分光偏光放射計の内部構造を図2に示す。対物レンズの部分を除き、全体は直方体の金属カバーに納められているが（次章、図5参照）、これらを考慮し、大きさ

は、縦503mm（レンズ突出部を含む）、横174mm、高さ146mmであり、重量は7.1kgである。この分光偏光放射計は、屋外実験では三脚に取付けて用いることができるが、航空機搭載実験では取付けるための装着工事が必要となる。

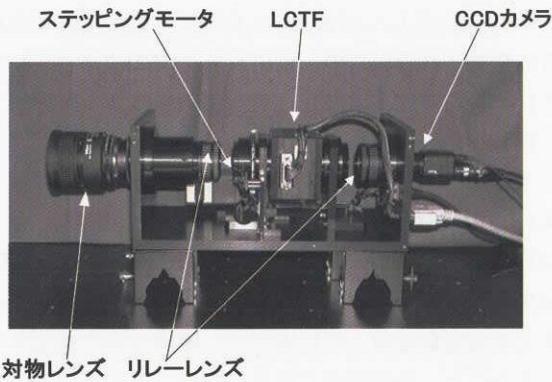


図2 LCTF分光偏光放射計の内部構成部

3. 光学観測システム

LCTF分光偏光放射計を航空機リモートセンシング用光学センサとして実用化を図るには、これに周辺装置を付加して、光学センサのデータ取得、処理、収録等、入出力すべての操作が自動的に行われるような光学観測システムを構築することが必要である。すなわち、開発・実用化に向けての基本概念を確立するためには、光学センサが航空機に搭載された状態で光学特性データ（太陽反射光の分光偏光特性）が取得可能なことをにらんだ観測システムの構成並びに耐搭載環境特性を明らかにするための評価試験が必要となる。以下に、光学観測シス

テム設計の概念とハードウェア構成、ソフトウェア構成を示す。

3.1 システム設計の概念

光学観測システムの基本構成は、図3に示すように、LCTF分光偏光放射計に制御ユニット（周辺装置）を付した構成となっている。制御ユニットには、光学センサの駆動用にLCTF波長選択機能、フィルタ回転制御機能が、画像データの取り込み用に画像取得ボードが組み込まれている。図は、太陽光を反射する対象物の分光偏光画像を自動的に捉えるときの信号の流れのブロック線図を示しており、対象物の表面条件（surface conditions）はCCDカメラで捉えられ、収録装置に蓄えられること、LCTF制御信号はプログラムに応じて制御されること、等を示しており、光学観測システムの設計試作のベースとなっている。LCTFの分光操作（透過光の波長選択）、LCTFの回転（透過光の偏波面の選択）、画像取得に必要なソフトウェアは制御ユニットに組み入れられており、LCTF分光偏光放射計が所望のデータを取得できるようになっている。画像取得ボードではCCDカメラ出力信号のA/D変換がなされ、ディジタル画像データが収録装置に貯えられる。フィルタ回転制御装置は観測偏光面を任意に変更できるような制御信号を発生する。データ処理装置は、画像データの補正・解析を行う機能を有するものである。本研究ではこの部分をオフラインで行っているが、装置の搭載化が進めばオンラインに移行する予定である。

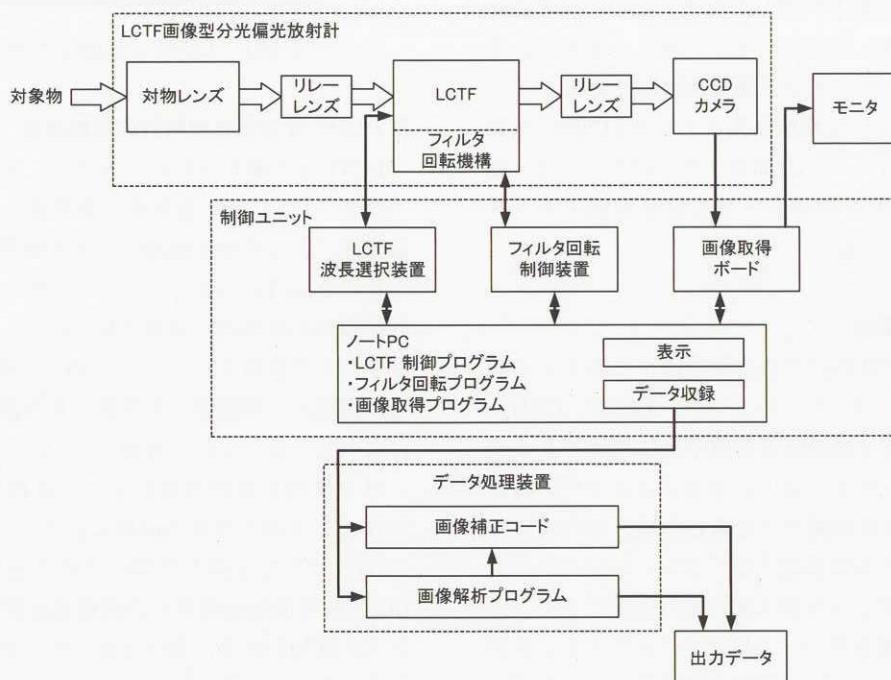


図3 光学センサ観測システムのブロック線図

3.2 ハードウェア構成

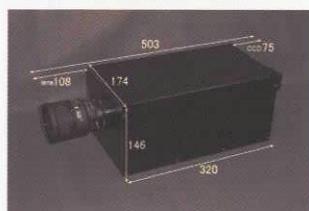
上記のように、制御ユニットに所望の機能をもたせることがLCTF分光偏光放射計搭載化の基本となるが、そのような機能化のためには、まず、制御信号により前記LCTF分光偏光放射計本体のシリアルRS-232Cドライバーを駆動することが必要となる。次にLCTF透過光の波長選択（分光）を行い、それと同時にLCTFに回転角を指定することにより透過光の波長に対して偏波面を連続的に変化させが必要になる。動作としては、LCTFにある回転角と波長のスタート波長、エンド波長、ステップ波長、インターバル時間、增幅率等でスイープし、連続して指定信号を与え、それらに対応したデータがファイル名を付けてハードディスク等に記録される。また、本体のCCDカメラ受光面で計測した画像データは、画像取得ボードを経由して画像データ取得装置のメモリに一旦記憶され、その後初期設定された条件により連続／単体のファイルに随時ファイリングされる。そのファイル

ングされたデータを既存のソフトウェア等で処理する必要がある。本装置は、このような制御を行い主にパソコンで構成されている。図4にLCTF分光偏光放射計制御装置の概観写真を、図5に光学観測システムの主要構成要素の仕様をそれぞれ示す。また、LCTF分光偏光放射計の本体、LCTF制御装置、光学系、機械系の各規格の詳細を付録2に示す。



図4 LCTF分光偏光放射計制御装置概観写真

LCTF 分光偏光放射計



諸元

W174×D320 (D503 including object lens and CCD) ×H146
Weight 7.1kg
Power 3W (12V, 250mA)

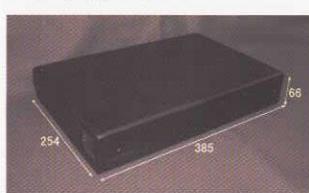
ノートPC



諸元

W307×D250×H31 (H273 in opened display)
Weight: 2.62kg
CPU: Pentium III 1.06GHz·M
HDD: 20GB
Memory: 128MB
14.1inches TFT XGA
DVD-ROM, USB, Serial, Parallel, Ethernet, Modem, IrDA 38W

PCI 拡張ボックス



諸元

W254×D385×H66
Weight 2.60kg (excluding PCI board)
PCI slot 2
SCSI
Power 90W, 1A(MAX)

制御ボックス



諸元

W430 (W453 including handle) ×D350×H99 (H105 including rubber legs)
Weight: about 8.5kg (including adapter-related parts)
built-in LCTF controller, motor controller and
image amplifie
Power: 25W

図5 搭載型LCTF分光偏光放射計システムの仕様

3.3 ソフトウェア構成

LCTF分光偏光放射計を用いた光学観測システム（図3）を画像データ取得用計測システムとして機能させることには、駆動用ソフトウェアが必要である。LCTFは、直線偏光子として機能し、かつ、外部からの印加電圧（電界）を可変供給することによって、透過光の波長を連続的に選択できる構造になっているので、制御ユニットに収納されているノートPCに（波長選択用）ソフトウェアを組み込んで、所望の時刻に、所望の電圧（被選択波長に対応した電圧）が印加できるようにする必要がある。また、センサ筐体に対して透過光偏波面を変化させるために必要なフィルタ回転コントローラ制御用ソフトウェア、CCDカメラによって検出される画像データを収録、処理するためのソフトウェアが必要となる。

そして、観測システムの各要素は、互いに時刻同期がとれていなければならぬので、クロック信号を各要素に送信するソフトウェアも必要である。これら各ソフトウェアのブロック構成を図6に示す。

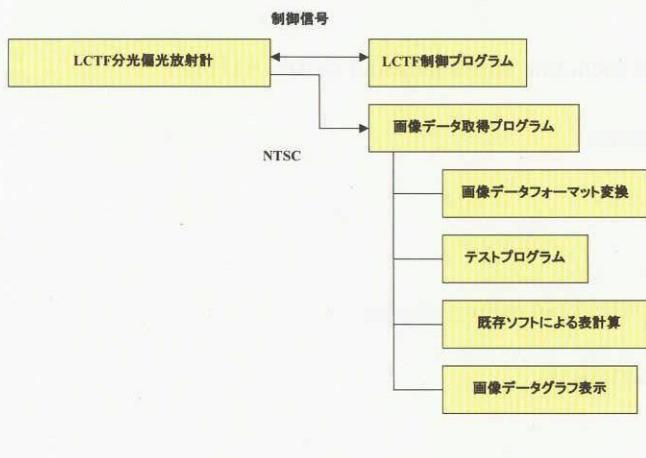


図4 ソフトウェア構成図

(1) LCTF制御プログラム

本プログラムは、LCTF透過光の波長を選択し（LCTF制御装置に電圧を与える）かつ偏波面変位角を変化させための制御用パラメータの設定をノートPCモニタ上で行う機能を有しており、スタート波長、エンド波長、ステップ波長、インターバル時間、増幅率、偏波面変位角などを設定することができる。また、記録開始番号やフォルダの選択、記録状態を記録するログファイルを作成する。

(2) 画像データ取得プログラム

本プログラムは、上記のプログラムで設定された条件

に基づいてLCTF制御装置を機能させることと、主にNTSC(National Television System Committee)信号（画像データ）の読み込みを行い、画像データを取得すること、そしてハードディスクに保存する機能を有することであり、以下のプログラムから構成され、それぞれの機能の概要を列記する。

1) 設定、読み込みデータの保存ファイルの形式

画像取得してハードディスクに保存されたデータはファイル化される。この分光画像ファイル保存処理は、1実験毎に画像保存フォルダを指定する。次にフォルダ内には分光画像ファイルおよび波長情報などを書き込んだ情報ファイルが作成される。

フォルダの内容は図7に示されるように画像ファイルと情報ファイルから構成されている。

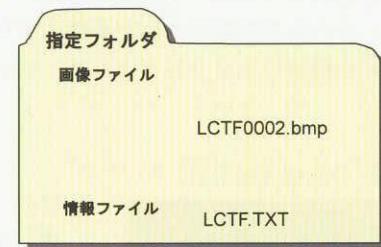


図5. 画像フォルダ構成

① 画像ファイル

ファイル形式はBMP（ビットマップ形式）で640×480画素のモノクロ8bitで300KBのデータである。なお、測定開始時にファイル名を指定する。

LCTF 0001 .bmp

上記に示すように先頭4文字は共通で付けられ、次の数字4文字がカウントされ下のように連番となり記録される。

LCTF0001.bmp

LCTF0002.bmp

•

•

② 情報ファイル

LCTF.txt

情報ファイルは、ファイル名として上記入力の先頭4文字に拡張子(txt)を付けたものである。

ファイルの内容はアスキーテキスト方式で分光波長を変え画像を取得する毎に1行追加する。ファイル構成は以下のようにデータ取得年月日、時分秒、ファイル設定波長、フィルタ回転角、画像ファイル名の順番で記録される。

“取得年月日 時分秒 フィルタ設定波長 フィルタ回転角 画像ファイル名”
 “2001-10-12 15:27:25 400.00nm 0deg LCTF0001.bmp”
 “2001-10-12 15:27:27 410.00nm 0deg LCTF0002.bmp”

2) 画像データフォーマット変換

CCDカメラからの画像データは、8ビットでA/D変換された状態のピットマップ形式であるので表計算用にCSV形式のフォーマットに変換する。

3) テストプログラム

取得した画像データが正しいか機能確認するためのプログラムであり、簡単な3次元表示でノートPCモニタに表示する。

4) 既存ソフトによる表計算

各種パラメータを設定するのでこれらに基づくデータを表形式でデータベース化しておく。

5) 画像データグラフ表示

データベース化された保存データの中から任意のデータをグラフ表示する。

ケースによっては3次元表示可能とする。

4. 機能評価試験

対象物からの太陽反射光の分光偏光特性の観測は、屋外実験、航空機等移動体搭載実験によってなされるが、このような観測を計画通り進めるには、前もって装置の機能評価試験を行い、計測システムとしての機能を確認することが必要である。ここでは、波長分解能、フィルタ回転機構の機能を確認するために行われた機能評価試験の結果を示す。

4.1 波長分解能試験

本LCTF分光偏光放射計の特長は、ADEOS搭載光学センサMESSR等他の画像型光学センサに比して波長分解能¹⁹⁾がよいことである。MESSRは、バンドパスフィルタが回転方式で、バンド幅が70~80nmである。波長分解能の測定は、各波長毎に測定を行うことが理想であるが、本研究では、He-Neレーザー光（波長:632.8 nm）を入射したときの出力スペクトル画像の輝度から推定することにする。そのようなスペクトル輝度値の測定結果を図8

に示す。図において横軸に波長、縦軸に正規化した輝度値を示す。波長分解能は、輝度の最高値の半値における波長幅（FWHM）と定義されている。図より、透過光波長:632.8 nmにおける波長分解能は10nm程度であるが、センサの有効波長域（400~720 nm）では8~12 nmの波長分解能を有すると考えられる。ここでレーザー光を用いた理由は、その波長がLCTF分光偏光放射計の波長帯のほぼ中心波長であり、かつ、レーザー光そのものの波長幅が狭いことによる。

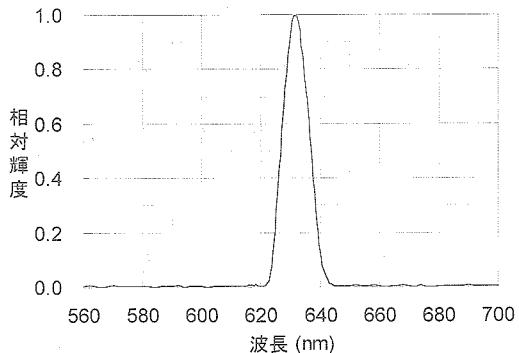
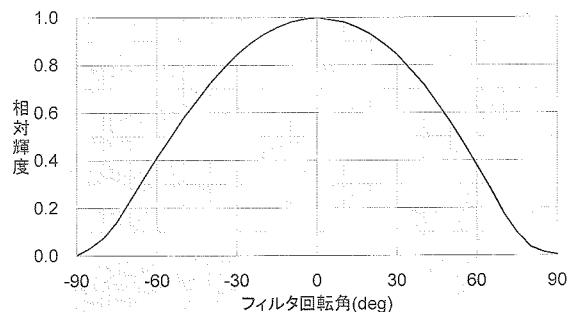


図8 波長分解能試験の結果

4.2 フィルタ回転機構の機能試験

LCTF分光偏光放射計は、高分解能と共に透過光偏波面が任意方向に変化させられることが特長である。すなわち、偏波面変位角の変化に対応した偏光特性が計測可能となるように回転機構を装着し、制御ユニットからの駆動信号によってフィルタ回転角（=変位角=透過光の偏光面とLCTF偏光面間の角）が変えられるようになっている。メタルハライド光源からの光を入射し、透過光の輝度（センサ出力輝度）が変位角に応じて正弦波状に変化し、変位角ゼロのときに最大、±90°のときに最小になることで、正常動作確認を行う。変位角-90°から+90°における出力輝度変化（正規化）を図9に示す。これら各変位角における出力画像の輝度値からフィルタ回転機構は正常に動作していると云える。



（偏光動作の確認試験）

図9 液晶光学フィルタの回転機能の評価試験結果

5. 屋外実験

LCTF分光偏光放射計を用いた光学観測システムによる上空や宇宙からの地球環境観測に使用される状況は、撮像対象からの太陽反射光を観測することである。そこで、搭載型として実利用化をはかるには、光学観測システムによる太陽反射光の特性評価が必要となる。すなわち、実利用状態（地球観測状態）に限りなく近い状態において太陽反射光の光学特性から（光学センサの）画像データ取得機能を評価することが必要となる。ここではそのような必要性の観点から、光学観測システムによって地表面の画像データを取得するために行われた屋外実験の結果を示す。なお、光学観測システムの実用化には、航空機等移動体に搭載して行う動的機能の評価が必要となるが、本研究における屋外実験は、飛行評価実験の準備フェーズとして静的な状態（地上静止）における機能の確認を中心として行ったものである。

5.1 実験方法

実験方法としては、LCTF分光偏光放射計観測システムを屋外（地上）に設置した状態で、撮像対象の画像を測定して、対象物の違いによる画像の違いを直感的に識別できるようにすると共に、対象物の違いによるスペクトル輝度の違いを求める。上空からの地球観測を想定しつつ、河川、山林、田畠、人工構築物等を撮像対象とする。被撮像エリアとしては多摩川周辺を対象とする。稲城市の北緑地公園付近の多摩川土手（緯度N35° 38' 48", 経度E139° 30' 17"）を観測場所とし、ここにLCTF分光偏光放射計観測システムを設置し、多摩川の水、周辺の草地、林、住宅街、高圧線（含鉄塔）等を一括して撮像し、撮像結果から対象物の分光／偏光画像データを求める。観測場所（多摩川土手）に設置された、光学観測システム（LCTF分光偏光放射計、制御装置、TFTモニタ、ビデオモニタ、発電機）の状態を図10に示す。観測時の諸条件は以下の通りである。



図10 地上観測実験の状況

場所：多摩川河川敷（稻城北緑地公園から東京電力北多
摩変電所方面を観測）
観測日時：2001年10月12日
15時32分48秒～15時33分46秒 約1分
天候：晴れ
使用対物レンズ：AF Nikkor 28mm F1.4D
絞り設定 1.4
使用CCD：Watec WAT-902H/Watec WAT-100N
分光範囲：410nm～720nm (10nm毎)

各対象物のスペクトル画像データの抽出、各対象物の撮像スポットごとの分光／偏光輝度の算出は、対象エリアを地表面の自然状態（針葉樹、芝生、多摩川の水、砂礫）及び人工構築物（ビルディング、高圧線の各部分）とに分けて行われたが、対象物の種類（自然、人工）に関係なくLCTF分光偏光放射計の分光／偏光画像取得機能が有効であること、対象物ごとの輝度スペクトルの違いが示されること等、地球観測への適用可能性が示された。

5.2 地表面自然状態の観測

測定したデータを基に観測エリアとして河川、針葉樹、堤防の草、芝、砂利、空などの自然対象物を図11の(1)に、このエリアの特定の観測スポット（図の①川の水、②堤防の草、③空、④針葉樹、⑤芝生、⑥砂利）の適当な部分の10x10ピクセルの輝度値を抽出してその合計の平均値を得て、横軸の波長に対する輝度値を縦軸にグラフにしたもののが図11の(2)に示す。また、偏波面変位角0°, 45°, 90°, 135°, 180° それぞれにおける波長650nm, 660nm, 670 nm, 680 nmのスペクトル画像を図12に示す。但し、今回は太陽高度や太陽光の入射角は考慮されていないが、地上における屋外実験のために入射方向は水平に近い状態に置かれていたので、太陽反射光は強度的にはかなり弱かったと考えられる。そのためか、低波長域では画像データが不鮮明あるいは取得不能の状態で観測が行われたと予想される。今後は、LCTF分光偏光放射計の全有効波長域（400 nm- 720 nm）で画像データが十分鮮明に取得できるようなセンサの工夫、実験方法の改良等が必要になる。

河川だけでなく針葉樹、堤防の草、芝、砂利、空を同時に観測した結果、680nm以上の波長域で針葉樹、堤防の草、芝と河川、砂利、空とは明らかに異なるスペクトル特性を示していることが図11から分かる。図12の各画像の同一地点を、波長別に比較しても、偏波面変位角別に比較しても、明るさの違いは明確であり、観測エリアにおける画像が偏波面変位角、波長によって異なっている。これは、本光学センサの画像取得機能を示すものである。

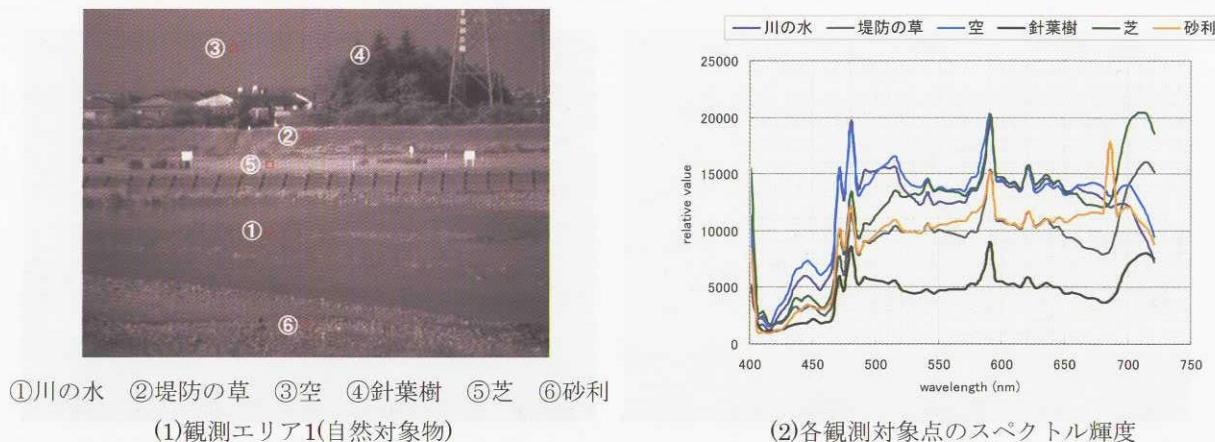


図11 自然対象物の観測結果

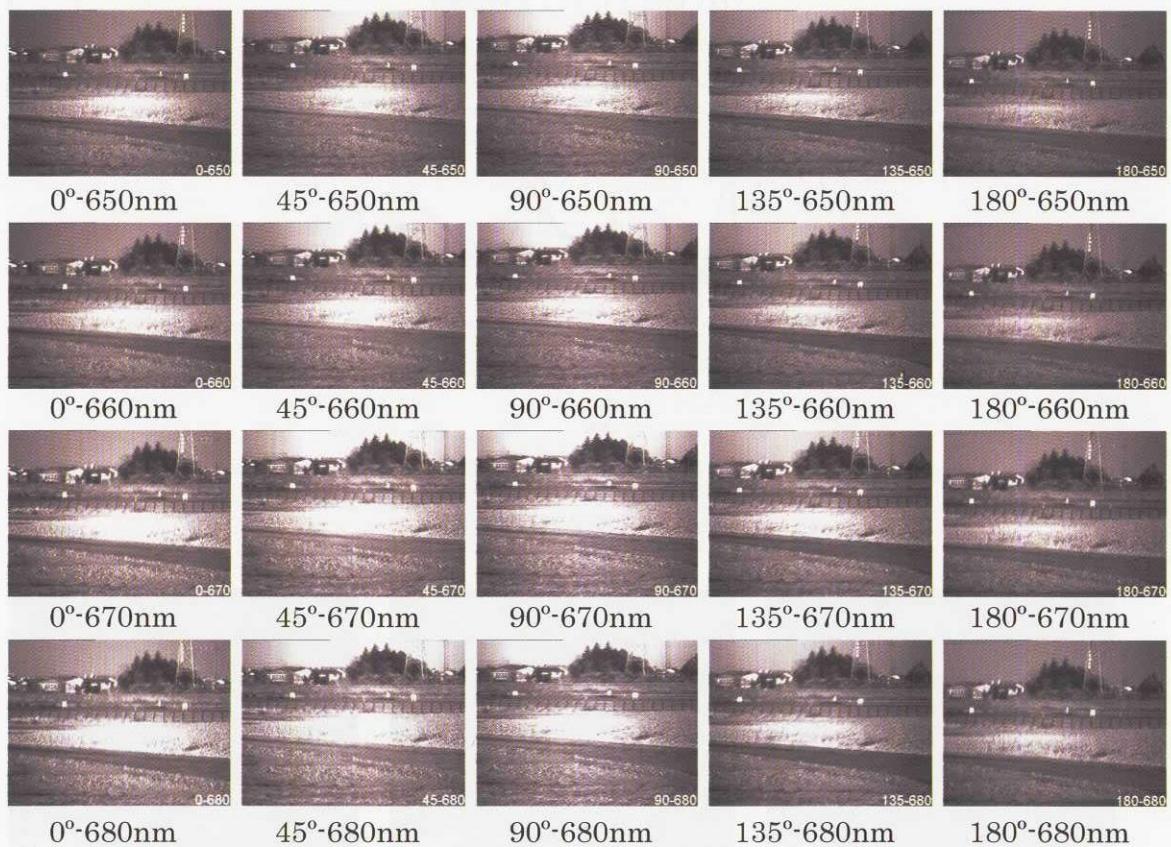


図12 地表面自然状態観測におけるスペクトル画像

5.3 人工構築物の観測

地上人工構築物（ビルディング、高圧線、等）を観測エリアとして、前節と同様に取得画像データを解析した結果を図13に示す。これは分光画像の観測点 $10 \times 10 = 100$ ピクセルの平均値であるが、分光輝度校正などはなされていない。偏波面変位角 0° におけるスペクトル画像を図14に示す。これらの結果より、自然対象物（前節）の場合と同様、各画像における同一箇所を比較しても、波長

によって鮮明度の相違が現れており、異なる特性を有する対象物はそれぞれに異なる分光特性を有しているといえる。また、図13のグラフから通信塔の赤と白の塗料の特性は短波長側では差が大きいが、長波長側では小さい。つまり通信塔の赤白の塗装部分は波長により明確になる部分とはっきりしない部分が得られた。ここでは赤の塗装部分の波長帯がはっきりしたことになる。

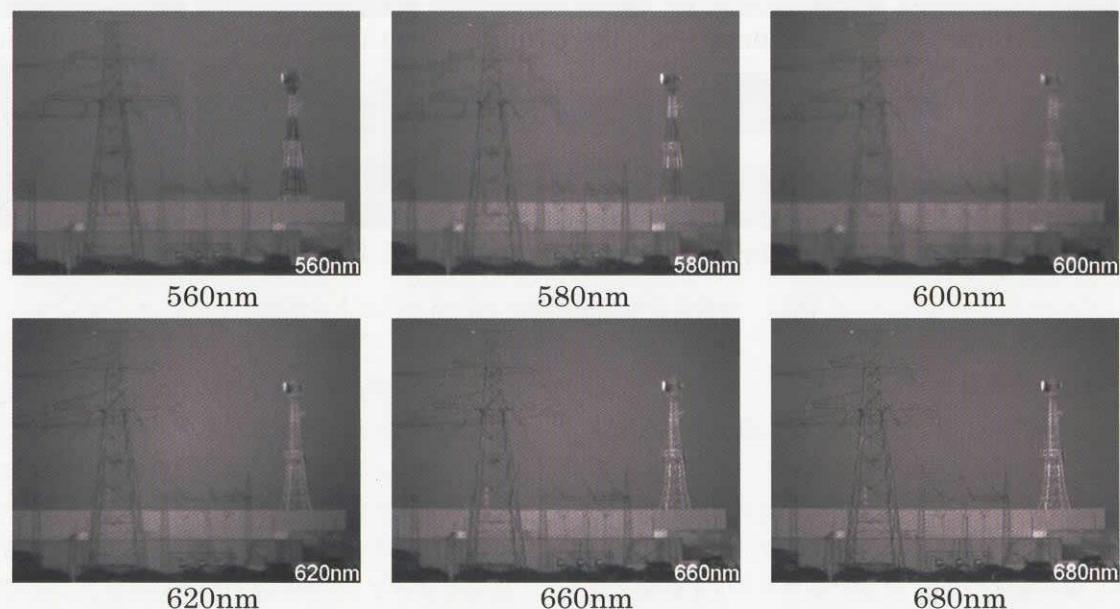
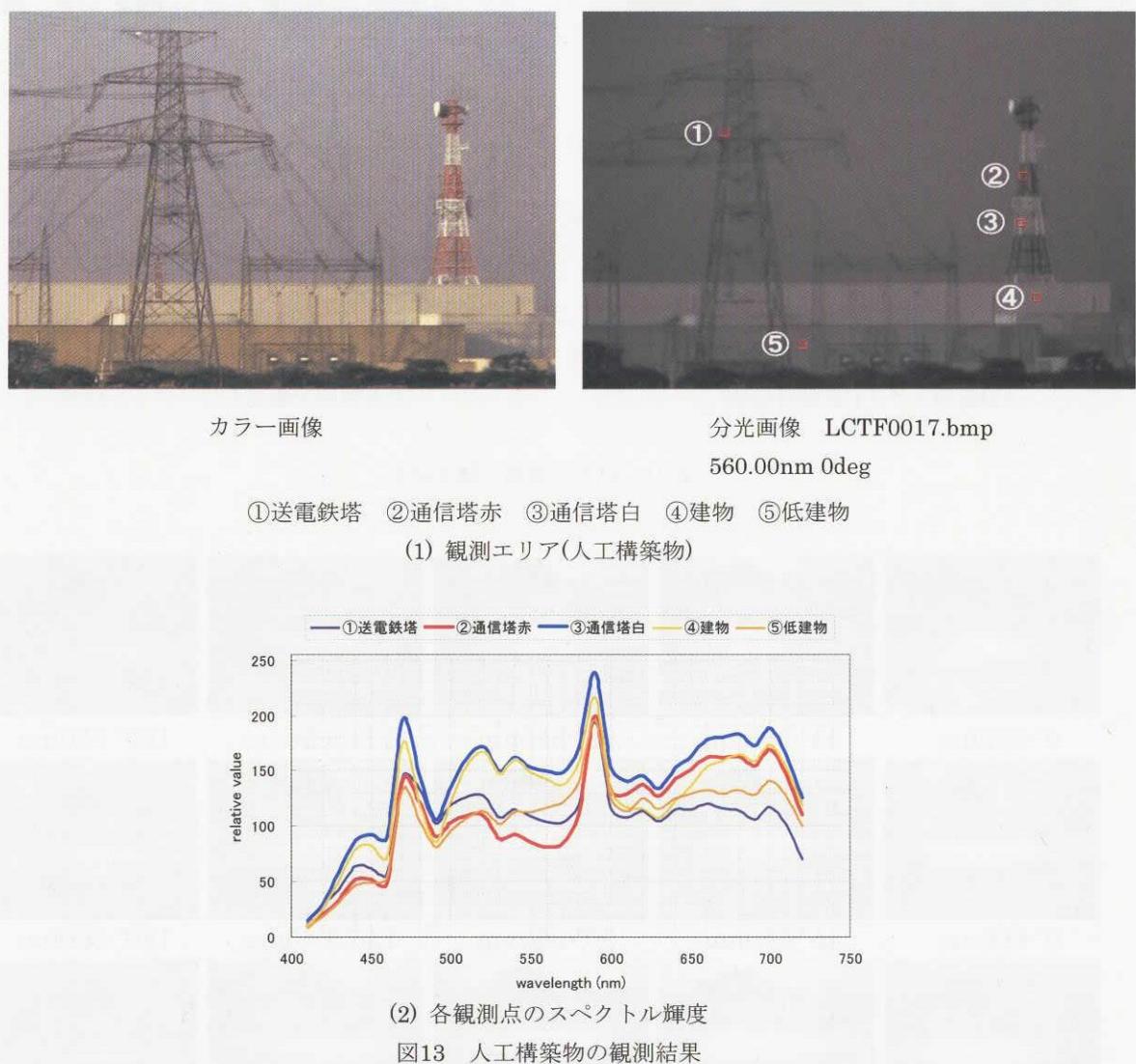


図14 人工構築物観測におけるスペクトル画像

5.4 要検討事項

低波長域における画像データの不鮮明状態（目測で判断）と並んで、図11(2)、図12(2)にみられるように、波長480nm近傍、590nm近傍において、スペクトル輝度が異常に大きくなる現象が現れた。本LCTF分光偏光放射計のCCDにはAGC (automatic gain controller) が装着されていて、ある輝度レベル以上LCTF透過光の輝度調整が自動的に行われるようになっているので、その影響と思われる。以後の同様の実験でAGCを取り外した場合、あるいは、透過光の偏波面を変えた場合、そのような現象が現れていない。これをベースに、今後は、野外実験でこのような現象が起きないように、AGC等の取り扱いに留意することが必要である。これらのこととは、当機構研究試作光学センサを改良しつつ野外への適用性を向上させていくための要処置事項（アクションアイテム）である。

6. 予備飛行試験

LCTF分光偏光放射計は、実利用時において、インターフェース、データ記録装置等の補助装置と共に航空機に装着され、上空からの地球観測がなされるので、実用化に先立って、地上（屋内、屋外）評価試験と共に、動的環境下における飛行評価試験が必要となる。このような飛行試験評価の目的は

- 1) 飛行環境における光学観測システムの動作機能の確認
- 2) 飛行状態における地球環境観測能力の実証
- 3) 機上電源を含む関連補助装置の動作確認

4) 機上における自動データ取得及び自動データ処理の検証

である。このような目的に即した飛行試験評価を進めるために、H14年度までは装着関連器材の整備（取付工事の設計製作、機体内的インターフェースの整備、等）を進めてきている。図15に当機構所有の実験用航空機（ビーチクラフト65型機）を用いた、LCTF分光偏光放射計飛行評価試験の概要を示す。耐飛行環境性（搭載飛行による観測機能の保持性）を確認するために、H14年8月に予備的な飛行試験を行い、取得データの解析を行ったが、飛行前後におけるセンサの動作機能の劣化は見られなかった。これは、当LCTF分光偏光放射計は、開発を進めれば、航空機搭載地球観測に適用可能なものになりうることを示すものである。図16に河口湖の勝山村上空（写真右が南）を西から東に向けて飛行した時の撮像結果の一例を示す。図から、湖面の細かい波の特性が明確に捉えられていることが分かる。この撮像結果から、航空機搭載LCTF分光偏光放射計は、航空機の機動性を基に時々刻々変化する環境汚染を引き起こす物質の特定に威力を発揮するとともに、観測データの蓄積により環境変化の特定に対応するようになりうるといえる。

今後の課題としては、LCTF分光偏光放射計の高速化処理、装置の小型化を図ることであり、航法系システムと統合して精度の高いデータ取得を行う計画である。リモートセンシングにとって、これまで観測が困難とされてきた対象物のスペクトル画像を取得できる光学センサとして、海洋、農業、魚業など多方面への利用可能が注目されている。

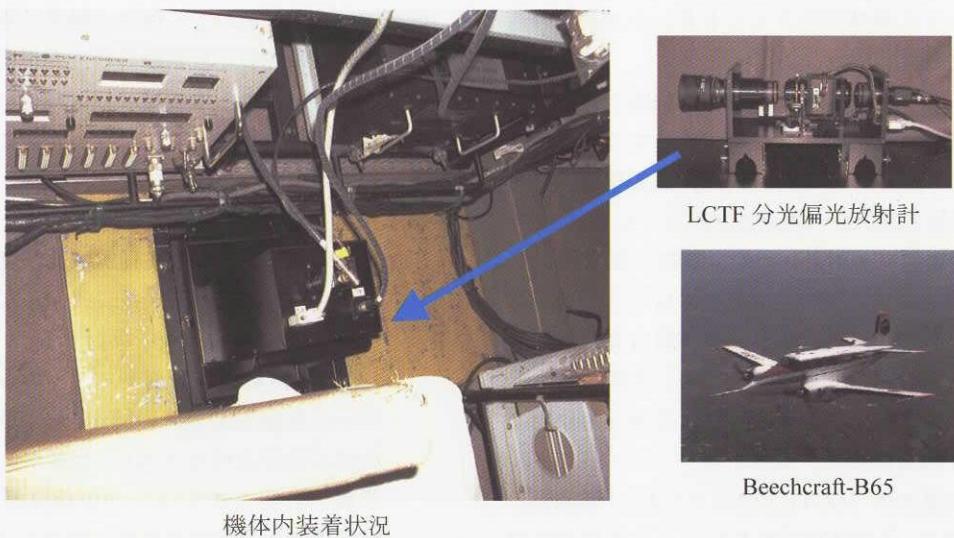


図15 光学センサ飛行評価試験の概要



搭載LCTF分光偏光放射計による撮像結果
(勝山村上空 河口湖面 高度：9842ft、観測波長：530nm、 2002.8.7. 11:11:27ころ)

図16 飛行評価試験により得られた地表面画像データの一例

7. 結論及び今後の展開

LCTF分光偏光放射計を組み込んだ光学観測システムの構築に関する研究が当機関で進行中であり、屋内機能評価試験並びに屋外実験によって当LCTF分光偏光放射計の地表面観測への有用性が明らかにされた。本研究の結果を要約すると次のようになる。

- (1) 対象物からの太陽反射光の連続分光／偏光特性が測定可能な、液晶同調フィルタ（LCTF）使用分光偏光放射計（プロトタイプモデル）を試作し、これを計測素子とした光学観測システムの構築が行われ、重量、容量、消費電力、入出力特性、等の観点から、当光学センサの地球環境リモートセンシングへの適用性が示された。
- (2) 感度スペクトルのバンド幅10 nm程度の連続分光特性、透過光の偏波面の変化を可能にするフィルタ回転機構の正常動作の確認により、機能性能的に当LCTF分光偏光放射計の実用性が明らかにされた。
- (3) LCTF分光偏光放射計、PC、携帯用発電機、等を用いた地上実験装置の完成並びに川べりを観測対象とした屋外実験の結果より、当装置は光学観測システムとしての機能を有していることが確認された。
- (4) 屋外実験により、太陽光を反射する地上対象物のスペクトル画像の特性、観測スポットのスペクトル輝度が、透過波長（LCTFで選択される）、透過光の偏波面変位角（LCTFの回転角）によって異なる現象が示された。
- (5) 駆動ソフトウェア、データ取り込みソフトウェアはともに正常動作したが、実用化にむけて、応答特

性のさらなる向上が図れるような改良が必要であることが見出された。

- (6) 予備飛行試験の結果、当LCTF分光偏光放射計は、飛行(動的)環境下でも使用に耐える光学センサであることが示された。

本研究で示された、光学観測システムの構築、地上（屋内、屋外）実験の結果をベースに、今後は地球環境観測への実用化を目指し航空機等移動体搭載試験を順次進める計画である。なお、本研究は、平成13、14年度航技研萌芽的研究（研究課題：分光偏光放射計の環境計測への適用化に関する研究）としてなされたものであるが、研究遂行途上において、所外の競争的研究資金である海洋開発及び地球科学技術調査研究促進費（研究課題：分光偏光放射計による水域環境観測技術に関する研究）による研究に継続されることになった。これによって、今後は次の観点をベースに本研究を展開していくつもりである。

- (1) 屋外実験として、各種水域及び農作物等地上対象物の特徴観測を進めるとともに、この成果をベースに航空機搭載の方策を検討する。
- (2) 航空機搭載自動計測システムの確立をにらみつつ、データ収録制御装置の製作、および観測データ処理方式の検討を行うと共に、光学センサの搭載機能の評価に必要な飛行（データ解析技術を含む）を行い、航空機利用環境観測技術の確立を図る。

最後に、本萌芽的研究のキックオフから飛行試験評価に至るまでに当機関関連部署の方々からいろいろと協力

をいただいたこと、および、輿石肇氏（元航技研技術委員）のLCTF関連の調査事項が光学センサ本体の設計製作に有用であったことを付記する。

参考文献

- 1) J. J. Puschell and P. Tompkins, "Imaging spectrometers for future earth observing systems," Proceedings of SPIE, Vol.3117, pp. 36-48, San Diego, July 1997
- 2) H. P. Pangaribuan and S. A. Sader, "An Evaluation of Satellite Change Detection Methods for Monitoring Forest Harvest and Silvicultural Activity in Maine Industrial Forests," Proceedings of SPIE, Vol.3119, pp. 2-12, San Diego, July 1997
- 3) S. Kazama, T. Rose, Ra. Zimmermann and Ru. Zimmermann, "A Precision Autocalibrating 7 Channel Radiometer for Environmental Research Applications," 日本リモートセンシング学会誌, 第19巻・第3号 pp. 37-44, 1999年9月.
- 4) J. Ru, S. Kaneta, M. Minomura, H. Kuze and N. Takeuchi, "Study on the Biomass Burning Aerosol in Indonesian Forest Fire by Using AVHRR Two Channel Data", 日本リモートセンシング学会誌, 第20巻・第1号, pp. 19-30, 2000年.3月
- 5) O. Shakil, A. Romshoo, T. Nakaegawa, T. Oki and K. Musiake, "Soil moisture estimation using Spaceborne SAR data and scattering models," 第28回日本リモートセンシング学会学術講演会論文集, pp. 59-60, 2000.年5月
- 6) E. E. Sano, G. G. Pinheiro and P. R. Meneses, "Assessing JERS-1 Synthetic Aperture Radar Data for Vegetation Mapping in the Brazilian Savanna", 日本リモートセンシング学会誌, 第21巻・第2号, pp. 158-167, 2001年.4月
- 7) K. Muramatsu, Y. Kikuoka, M. Daigo and N. Fujiwara, "The Diurnal Series Relationship between Surface/Air Temperature and Global Solar Irradiance", 日本リモートセンシング学会誌, 第21巻・第5号, pp. 410-422, 2001年.12月
- 8) D. Sudiana, K. Asakuma, S. Otsutsumi, T. Kubota, H. Kuze and N. Takeuchi, "The optical properties of the Indonesian forest fire in 1999," 第28回日本リモートセンシング学会学術講演会論文集, pp. 77-78, 2000.年5月
- 9) G. Dalu, P. Boi, J. Otterman, A. Pompei, R. Rao and G. Tonna, "Measurement of atmospheric aerosols and assessment of atmospheric effects on satellite remote sensing," Proceedings of SPIE, Vol.2318, pp. 69-79,, Rome, Sept. 1994.
- 10) M. A. Wetzel, "Use of hyperspectral airborne observations to simulate cloud microphysical retrievals from AVHRR-K," Proceedings of SPIE, Vol.2318, pp. 155-165, Rome, Sept. 1994.
- 11) J. P. Messina and T. V. Busch, "Change Detection in the Florida Bay using Remote Sensing," Proceedings of SPIE, Vol.3119, pp. 46-54, , San Diego, July 1997.
- 12) 小野朗子, 藤原昇, “マツなどの樹木枯損動態の把握を目的としたパターン展開法の応用”, 日本リモートセンシング学会誌, 第22巻・第1号, pp. 22-31, 2002年3月
- 13) H. Shingu, K. Homma, H. Kurosaki, T. Suzuki and H. Yamamoto, "Development of an Onboard Spectropolarimeter for Earth Observation at NAL", Proceedings of SPIE, Vol. 4669, pp. 89-97, San Jose, Jan. 2002.
- 14) 黒崎裕久, 新宮博公, 本間幸造, 鈴木孝雄, 山本浩通, "LCTF画像型分光偏光放射計の開発" 第31回日本リモートセンシング学会学術講演会論文集, pp. 273-274, 2001年12月.
- 15) H. Shingu, H. Kurosaki, K. Homma, T. Suzuki and H. Yamamoto, "Development of an Imaging Spectropolarimeter Using a Liquid Crystal Tunable Filter", Proceedings of the 23rd International Symposium on Space Technology and Science, pp.2183-2188, 2002-n-24, Dec. 2002
- 16) H. Shingu, H. Kurosaki, K. Homma, T. Suzuki and H. Yamamoto, "Earth observation system incorporating an LCTF spectropolarimeter", Proceedings of 9th International Symposium on Remote Sensing, Vol. 4881A-66, Crete, Sept. 2002.
- 17) K. Homma, H. Shingu, H. Kurosaki, T. Suzuki and H. Yamamoto, "Experimental checking of the spectropolarimeter for airborne remote sensing", Proceedings of 9th International Symposium on Remote Sensing, Vol. 4881A-75, Crete, Sept. 002
- 18) 鶴田匡夫, “応用光学II”, pp194-197、培風館、1995年10月
- 19) Cambridge Research and Instrumentation, Inc., "VariSpec Tunable Filter User's Manual", 2001

付録1 航空機搭載工事

当LCTF分光偏光放射計のような新たなセンサを航空機に搭載するためには、航空局の耐空性審査が要求される。そのような検査においては、まず搭載器材の取付け位置や、荷重など強度計算が行われ、上方3.0G、前方9.0G、側方1.5G、下方6.6Gという結果になり、次に、強度計算に基づいて各機材取付け用ブラケットの製作・搭載工事が行われ、最後に実際に飛行試験を行ない各機器の動作状態としての安全性が確認される。

(1) 航空機搭載電子計算機の高度試験方法

光学観測システムの構成要素のうち、電子計算機（本文図5参照）の飛行状態における安全性、機能性能の保持は重要視されている。つまり、計算機系統の性能低下は計測システム全体としての入出力関係に致命的な故障となるからである。本研究では、当機構のテニーチャンバー（高度・温度・湿度試験装置）を用いて、電子計算機の高空状態における機能確認試験を以下の手順で行い、試験後の電子計算機の作動確認を行い、異常のないこと

が確認されたので、搭載用として航空機への装着を進めた（搭載工事）。

装置の真空槽に供試体（本体およびモニター）を入れる。この際、電源を真空槽から取り供試体を作動状態にしておく。

大気圧から5,000ft・10,000ft・15,000ftと付表1に示す換算表に従って、徐々に気圧を下げていき15,000ft以上で10分間以上保持する。

高度は、真空槽付属の圧力計で直読する。

10分間以上経過後、15,000ftから徐々に大気圧に戻す。

真空槽から供試体を取出して、作動確認をおこない異常が無いことを確認する。

当装置の性能としての高度、気圧の関係を付表1に示す。

(2) 搭載 LCTF分光偏光放射計及び関連装置の電力規格

航空機搭載時のLCTF分光偏光放射には電源容量の制約があり、センサ本体（カメラ部）及び周辺装置の規格値、実測値は付表2のようになる。

付表1 テニーチャンバー内の高度と気圧との関係

高度		気圧	標準大気からの差圧（直読値）
m	f t	MPa	MPa
0	0	0.1013	0
1600	5250	0.0835	0.018
3100	10171	0.0692	0.032
4600	15092	0.0570	0.044

付表2 塗載LCTF分光偏光放射計及び関連装置の消費電力

名 称	規格値／電流実測値
1) LCTF分光偏光放射計本体 CCDカメラ Watec WAT-902H/ Watec WAT-100N	12V、250mA、3W 電圧 : DC+10.8~13.2V(12V±10%) 消費電流 : max 100mA 実測電流 : 0.204A
2) ノートパソコン COMPAQ Evo N600c (P1066/14X/128/20/V/C/NW)	消費電力 : 最大約38W 標準バッテリー : 14.8V、3.9Ah 実測電流 : 0.728A
3) PCI拡張ボックス(MAGMA CB2S)	電源 : 90W、1W(max) 実測電流 : 0.357A
4) 制御ボックス ステッピングモータ LCTFコントローラ NTSC分配器	電源 : 25W 電源 : 18VAC 電源 : 100V、6.2W 実測電流 : 0.241A (計)
	総合実測電流計 : 1.53A、100V

付録2 LCTF分光偏光放射計規格一覧

LCTF分光偏光放射計を組み込んだ光学観測システムの制御ユニット（図3参照）に用いられる器材（構成要素）

の規格。型番、製造メーカーを付表3、4示す。LCTF分光偏光放射計のカメラ部の規格を付表5に、光学系、機械系の規格を付表6に示す。

付表3 塔載 LCTF分光偏光放射制御装置の規格(1)

名称	型番	メーカー
PCI拡張ボックス	CB2S	マグマ
LCTF回転制御装置		
モーターコントロールボード	C870V1	メレック
モータードライバ	CSD5807N-P	オリエンタルモーター
モーター電源	SVS24SA	イーター電機工業
画像取得ボード	PCI-1411	ナショナルインスツルメンツ

付表4 塔載LCTF分光偏光放射制御装置の規格(2)

名称	型番	メーカー
制御用ノートパソコン	Evo Notebook N600c P1066/14X/128/20/V/C/NW	コンパック
CPU	Pentium III 1.06GHz-M	インテル
メモリ	256MB PC133 SDRAM	
HDD	20GB	
OS	Windows2000 Professional SP2	マイクロソフト

付表5 LCTF分光偏光放射計の規格

項目	規格
1) 分光方式	LCTF (CRI VS-VIS2-5-HC-35)
2) 対物レンズ	AF Nikkor 28mm F1.4D (Cマウント)
3) 受光部	CCD Watec WAT-902H/ Watec WAT-100N 出力信号: EIA(NTSC)
4) 分光波長範囲	400nm~720nm
5) 波長分解能	5nm@400nm, 10nm@720nm
6) 偏光方式	直線偏光成分計測
7) 制御方式	シリアルRS-232C
8) 放射計寸法	280L×80W×120H(mm)
9) 重量	2.0kg

付表6 LCTF分光偏光放射計光学系、機械系の規格

品名／名称／項目	規格／型番	メーカー／寸法
1) 防振クッション	軽量用防振ゴム KQ-38	倉敷化工㈱
2) ステッピングモーター	5相 CFK543A	オリエンタルモーター㈱
3) リレーレンズ	エルニッコール63mm	ニコン
4) フィールドレンズ	両凸レンズ SPBK-20-30	中央精機㈱
5) 台座	特殊仕様	
6) リミットセンサ	EE-SPX302-W2A EE-SPX304-W2A	オムロン㈱
7) スパーギヤ	M=1 SSAY1-40 M=1 SSAY1-80	小原歯車工業㈱

宇宙航空研究開発機構研究開発資料 JAXA-RM-03-003

発 行 日 2004年3月25日
編集・発行 独立行政法人 宇宙航空研究開発機構
〒182-8522
東京都調布市深大寺東町七丁目44番地1
TEL 0422-40-3000(代表)
印 刷 所 株式会社 ビー・シー・シー・
東京都港区浜松町2-4-1

©2004 JAXA

※本書(誌)の一部または全部を著作権法の定める範囲を超え、無断で複写、
複製、転載、テープ化およびファイル化することを禁じます。

※本書(誌)からの複写、転載等を希望される場合は、下記にご連絡ください。

※本書(誌)中、本文については再生紙を使用しております。

<本資料に関するお問い合わせ先>

独立行政法人 宇宙航空研究開発機構 情報化推進部 宇宙航空文献資料センター



宇宙航空研究開発機構
Japan Aerospace Exploration Agency

