

# 宇宙航空研究開発機構研究開発報告

## JAXA Research and Development Report

---

搭載型LCTF分光偏光放射計の開発及び水質観測への適用化



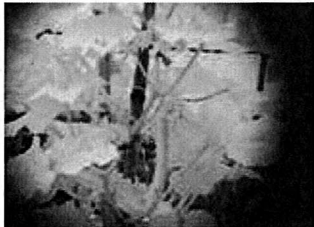
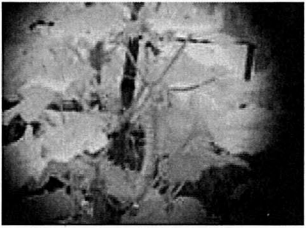
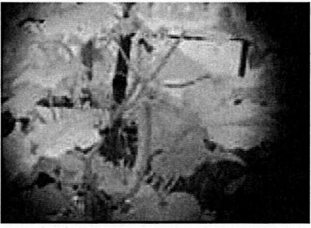

本間幸造、新宮博公、山本浩通

2006年3月

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



正誤表 (JAXA-RR-05-040)

修正箇所	42ページ「付図14 観測対象（胡瓜）のスペクトル画像」3段目		
誤	 0 deg・800 nm	 45 deg・800 nm	 90 deg・800 nm
正	 0 deg・ <u>760 nm</u>	 45 deg・ <u>760 nm</u>	 90 deg・ <u>760 nm</u>

宇宙航空研究開発機構研究開発報告  
JAXA Research and Development Report

搭載型LCTF分光偏光放射計の開発  
及び水質観測への適用化

Development of Onboard LCTF Spectropolarimeter  
and Its Applicability to Observation of Water Quality

本間幸造<sup>\*1</sup>、新宮博公<sup>\*1</sup>、山本浩通<sup>\*1</sup>  
Kohzo HOMMA<sup>\*1</sup>, Hirokimi SHINGU<sup>\*1</sup>, Hiromichi YAMAMOTO<sup>\*1</sup>

\*1：総合技術研究本部 飛行システム技術開発センター  
Flight Systems Technology Center  
Institute of Aerospace Technology

2006年3月  
March 2006

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





## 目 次

搭載型 LCTF 分光偏光放射計の開発及び水質観測への適用化	1
用語及び略号	2
1 はじめに	3
2 分光偏光放射計の開発	4
2.1 基本原理	4
2.2 特長	5
2.3 試作センサ	5
3 光学観測システムの構築	6
3.1 システム設計の概念	6
3.2 ハードウェア構成	6
3.3 ソフトウェア構成	10
3.3.1 LCTF 制御プログラム	10
3.3.2 画像データ取得制御プログラム	10
3.3.3 画像データ処理プログラム	11
4 偏波面変位角設定機能	12
5 濁水モデル実験	14
5.1 水質観測の必要性	14
5.2 実験方法	14
5.2.1 実験器材	14
5.2.2 実験手順	14
5.2.3 実験条件	14
5.3 実験結果	16
5.3.1 濁度とスペクトル輝度との関係	16
5.3.2 偏波面変位角を変化させたときの実験結果	17
5.4 実験結果の考察	18

<b>6</b>	<b>野外観測による観測機能の評価</b>	18
6.1	水質濁度観測の試み	18
6.2	代掻き田圃の観測	18
6.3	偏波面変位角のセンサ出力への影響	19
6.4	代掻き田圃周辺の河川、湖沼における観測	20
6.5	野外観測評価のまとめ	23
<b>7</b>	<b>飛行試験評価</b>	24
7.1	飛行パラメータの設定	24
7.2	飛行試験の有用性	24
7.3	搭載型光学観測システムの概要	24
7.4	冬季代掻き地区飛行観測	26
7.5	空撮データの3次元輝度表示	26
7.6	空撮スペクトル輝度分布	27
7.7	農地飛行観測の試み	28
7.8	飛行観測評価のまとめ	28
<b>8</b>	<b>結 論</b>	30
8.1	成果の概要	30
8.2	ニーズ対応	30
8.3	JAXA における将来の位置づけ	31
8.4	ユーザーニーズからみた開発・実用化への必要性	31
	参考文献	32
<b>付録</b>	<b>近赤外域 LCTF 分光偏光放射計による野外観測</b>	34
A.1	野外予備実験	34
A.2	農作物分類機能の評価	34
A.2.1	葉野菜畑の観測	34
A.2.2	実野菜畑の観測	34
A.2.3	農作物観測からみた光学センサのアクションアイテム	34
A.3	牧場観測	35
A.4	水質濁度観測の試み	35
A.5	近赤外域分光偏光放射計野外観測のまとめ	35

## 搭載型 LCTF 分光偏光放射計の開発 及び水質観測への適用化

### Development of Onboard LCTF Spectropolarimeter and Its Applicability to Observation of Water Quality

本間幸造<sup>\*1</sup>、新宮博公<sup>\*1</sup>、山本浩通<sup>\*1</sup>

Kohzo HOMMA<sup>\*1</sup>, Hirokimi SHINGU<sup>\*1</sup>, Hiromichi YAMAMOTO<sup>\*1</sup>

#### ABSTRACT

Polarimetric analysis of sunlight reflected from the Earth's surface is expected to play an important role in future Earth environmental observation, and an imaging spectropolarimeter using a liquid crystal tunable filter (LCTF) for the visible wavelength band has been developed by the Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA) over the past several years for such analysis. In order to bring the optical sensor into practical use, efforts are currently under way to incorporate it in a sensor package for an airborne observation system. This report first presents the concept and architecture of an LCTF imaging spectropolarimeter that senses radiation in the 400–720 nm visible wavelength band. Next, an outline is presented of the onboard observation system using the spectropolarimeter and the LCTF rotation mechanism that is the strongest point of the sensor. Third, the relation between the polarimetric sensor output and reference data on water muddiness is presented from the results of a preliminary trial conducted using muddy-water models, to apply the sensor to water pollution measurement. Fourth, the target areas for the field experiments are shown and the apparatus and procedures for each field experiment using the observation system are described. The areas include rivers, lakes, etc. polluted by the waste water from rice fields. Spectral characteristics of sunlight reflected from the observed spots are then shown by relative spectral radiance as the analyzed results of experimental data. In addition, the results of flight experiments are shown to confirm the ability to measure muddiness of rivers, lakes, etc. from the air. The utility of the optical observation system for airborne remote sensing is clear, based on the results of characteristic analyses of spectral images of the target areas and the spectral radiance of sunlight reflected from the target surfaces. Finally, it is concluded that the way has been paved both for completing the onboard optical observation system using the visible LCTF spectropolarimeter and for determining surface conditions from the properties of the spectral images and the spectral data acquired by the observation system.

**Keywords:** optical sensor, LCTF, imaging spectropolarimeter, remote sensing, Earth observation

---

\* 平成 17 年 10 月 17 日受付 (received 17 October, 2005)

\*1 : 総合技術研究本部 飛行システム技術開発センター

(Flight Systems Technology Center, Institute of Aerospace Technology)

## 用語及び略号

分光特性：単位波長幅あたりの出力（画像、輝度等）の特性

偏光特性：直線偏光において光の透過する偏波面（振動面）の変位角と出力との関係

偏波面変位角：直線偏光子を透過する光の偏波面と基準面となす角変位

AARC(Aichi-ken Agricultural Research Center)：愛知県農業総合試験場

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機能）

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コンパクトディスク

CPU (Central Processor Unit)：中央演算ユニット

CRI (Cambridge Research & Instrumentation, Inc.)：ケンブリッジ リサーチ アンド インストルメンテーション

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）を発生する装置

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

FDAS(Flight Data Acquisition System)：JAXA ビーチクラフト 65 型機搭載飛行実験データ収集システム

FWHM：Full Width at the Half Maximum

JAFIC(Japan Fisheries Information Service Center)：漁業情報サービスセンター

HDD (Hard Disk Drive)：ハードディスク・ドライブ

IEEE1394 (Institute of Electrical and Electronic Engineers 1394)：米国電気電子技術者協会規格

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

MO (Magneto Optical disk)：光磁気ディスク

NAL(National Aerospace Laboratory)：航空宇宙技術研究所

NIAES(National Institute of Agro-Environmental Sciences)：農業環境技術研究所

NILGS(National Institute of Livestock and Grassland Science)：畜産草地研究所

NTSC (National Television System Committee)：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

ppm(parts per million)：水 1 L に含まれる物質の重さ(mg)の比率（無次元量、1ppm=10<sup>-6</sup>）

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

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

地球表面条件のモニタリング、農地、森林の植生状況の把握のために航空機／宇宙機利用環境リモートセンシングの必要性が増大し、また、各種モニタリング対象に対してそれぞれに適した観測手法を確立していくことが課題となっている<sup>1)6)</sup>。環境の保護のためには、地球の表面上またはその周辺大気のどの部分がどの程度汚染されているのか、また、汚染が環境破壊にどの程度影響を与えているかを明らかにし、有効有用な対策を講じることが要求されており、航空機、人工衛星等を用いて上空、宇宙から地表面、水面、植生、大気等を観測するセンシング技術の開発並びに観測データから表面条件を推定するデータ解析技術の開発が注目されている<sup>7)13)</sup>。特に、地表面、水面からの太陽反射光の分光／偏光特性から植生、土質、水質等を抽出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きている<sup>14)17)</sup>。これらの観測の基本は、上空、宇宙からの撮像データ（画像）をベースに、各種画像の特徴（たとえば、対象スポットからの相対輝度の分光偏光特性等）から対象物の特徴抽出を行うデータ解析技術<sup>4),11),12),18)-20)</sup>となっているが、上空からより正確な撮像データを捉えるための光学センサ及びこれを用いた光学観測システムの研究開発も重要な課題となっている<sup>21)23)</sup>。特に、現用のリモートセンシング用光学センサは、地表面、大気等被観測対象物からの太陽反射光の連続分光特性（含分光画像）の観測を主目的に設計製作されているが、一方で偏光を考慮した光学観測も期待視されている<sup>21)</sup>。

当機構では、前身の航空宇宙技術研究所（NAL）時代から、地球環境リモートセンシングへの適用を目標に、地表面、水面からの太陽反射光の分光特性のみならず偏光特性の観測も考慮しつつ、連続分光／多偏光特性の計測が可能な液晶同調フィルタ（LCTF :Liquid Crystal Tunable Filter）を用いた LCTF 画像型分光偏光放射計（以下、LCTF センサと記す）の研究開発が進められ、野外観測に適用可能な光学センサモデル（prototype model）が試作されている<sup>24),25)</sup>。この光学センサの研究成果をベースに、航空機搭載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の確立を目標に、撮像対象の画像取得機能を有する機上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 センサは、1999 年度に可視域（400 ～ 720 nm）で使用可能な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<sup>25)</sup>。最初の改良型モデルを用いた光学観測システムが 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、出力波長の任意連続選択（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<sup>25),26),31)</sup>。また、野外実験（地表面からの太陽反射光の計測）では、偏波面変位角に対応して反射光のスペクトル輝度及び被反射対象物のスペクトル画像が連続的に得られることが確認されている<sup>27)-31)</sup>。

2003 年度には、航空機搭載を考慮した、改良型可視域 LCTF センサ及びこれを用いた光学観測システムが研究試作され、野外評価実験に供され、実環境下（野外実験）における有効性の確認がなされている<sup>32)</sup>。また、航空機搭載試験によって上空からの画像取得の可能性が示されるとともに、実用型搭載システムを構築していく際のアクションアイテムが明らかにされている<sup>33)</sup>。これらの研究は、LCTF センサが何に使えるか（使用目的）を示すことに主体をおき、部品構成、センサ試作、補助装置の試作、野外実験システムの構築、地上試験による野外観測への適用性、飛行試験による航空機リモートセンシングへの有用性を明らかにすることを目標としている。

本報告では、そのような改良型 LCTF センサの構成概念を示すと共に、本 LCTF センサ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、本 LCTF センサの特長を明らかにするための機能評価試験の結果として、LCTF 回転と透過光偏波面変位角の回転との関係を明らかにする。さらに、実環境（real world）への適用として、光学センサの農業環境分野への適用化が注目されてきたことを考慮し、田圃の代掻き排水が河川、湖沼へ流れ込んでいる地区を観測対象として実施された本光学観測システムを用いた水域環境観測結果について述べる。同地区の田圃土壌を用いた濁水モデルの濁度とセンサ出力との関係（濁水面からの太陽反射光輝度のスペクトル特性等）、田圃の代掻き地区の 3 つの河川（本文では、それぞれの河口を A1、B1、C1 と定義）、田圃、湖沼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特性及び観測エリアの画像の分光特性、これら光学特性の偏波面変位角による違い（以後、偏光特性）等を示すとともに、本 LCTF センサを用いた航空機リモートセンシングから得られた光学特性も示し、代掻き排水の水質汚濁への影響度を明らかにする。最後に、各観測結果に基づいて、機能性能の観点から、試作 LCTF センサは、航空機リモートセンシング用として実用に耐えるものであること、そして、将来の利用に関心を抱いているユーザーの視点からみても有望視されていることを明らかにする。

## 2 分光偏光放射計の開発

当機構で試作した分光偏光放射計は、光学素子としては液晶同調フィルタ (LCTF) を用いたものであり、被観測対象物から反射される光の分光特性、偏光特性を2次元で同時に計測できる機能を有するものである。すなわち、後述するように、被観測対象物の特徴を分光／偏光両特性によって評価できる光学センサである。本章では、同 LCTF センサの基本原理、機構上の特長、試作結果について述べる。

### 2.1 基本原理

本 LCTF センサのシステム概観図を図1に、構成概念を図2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 (Lyot Filter)<sup>34)</sup>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 の装着を容易

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および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、特定の偏波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 センサは、上記原理に基づ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 (可視域、400 ~ 720nm) を用いた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性能を有していること、連続分光／偏光が可能であること、等が特長である。また、この光学センサはその分光特性から可視域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、土壌、植物等) 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、地上、上空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 システム概観図

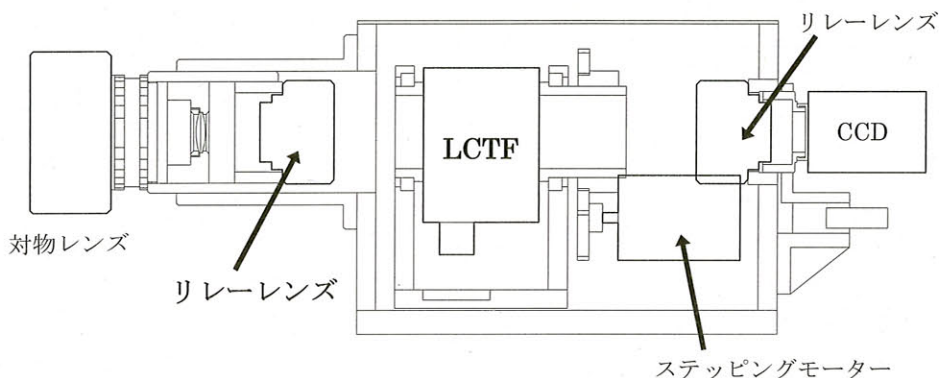


図2 LCTF 画像型分光偏光放射計の構成

## 2.2 特長

本研究で試作された分光偏光放射計は二つの機構上の特長を有している<sup>35)</sup>。一つは、LCTF を光軸まわりに筐体に対して回転可能な構造とし、透過する光の振動面（偏波面）を回転させることができ、対象物からの太陽反射光に含まれる任意方向の偏光成分を成分ごとに透過可能にし、多種方向の偏光特性を連続的に観測できる機能を有する光学センサを構成可能にすることである。もう一つの特長は、CCD の光軸方向位置を調整可能な機構としたことである<sup>35)</sup>。これは、入射光の波長の色収差などによる焦点位置の移動に対応可能とするものであり、また天候具合や時刻といった計測条件によって光学系（レンズ等）を交換した場合、収差によって結像位置が変動した場合でも、結像位置の変動に対応可能な光学センサとして機能させている。

## 2.3 試作センサ

LCTF センサのクリティカルパーツである LCTF は CRI 社製市販品<sup>36)</sup>を用いている。LCTF にはステッピング

モータ駆動型フィルタ回転機構を筐体内に装着し、光学センサ制御装置からの制御信号に応じて $\pm 90^\circ$  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。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<sup>37)</sup>。本 LCTF センサの内部構造を図 3 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。これらを考慮し、大きさは、縦 505 mm（レンズ突出部を含む）、横 177 mm、高さ 156 mm であり、重量は 7.72 kg である。この LCTF センサは、野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搭載工事が必要となる。なお、LCTF 自体の波長分解能<sup>36)</sup>はほぼ 10nm であるが、レンズ系も含めた LCTF センサとしての波長分解能は、レンズ（固体）透過の影響を受けるので、この値よりも大きくなる。また、透過光波長が小さければ（あるいは、大きければ）波長分解能の値は小さく（あるいは、大きく）なる<sup>24)</sup>。

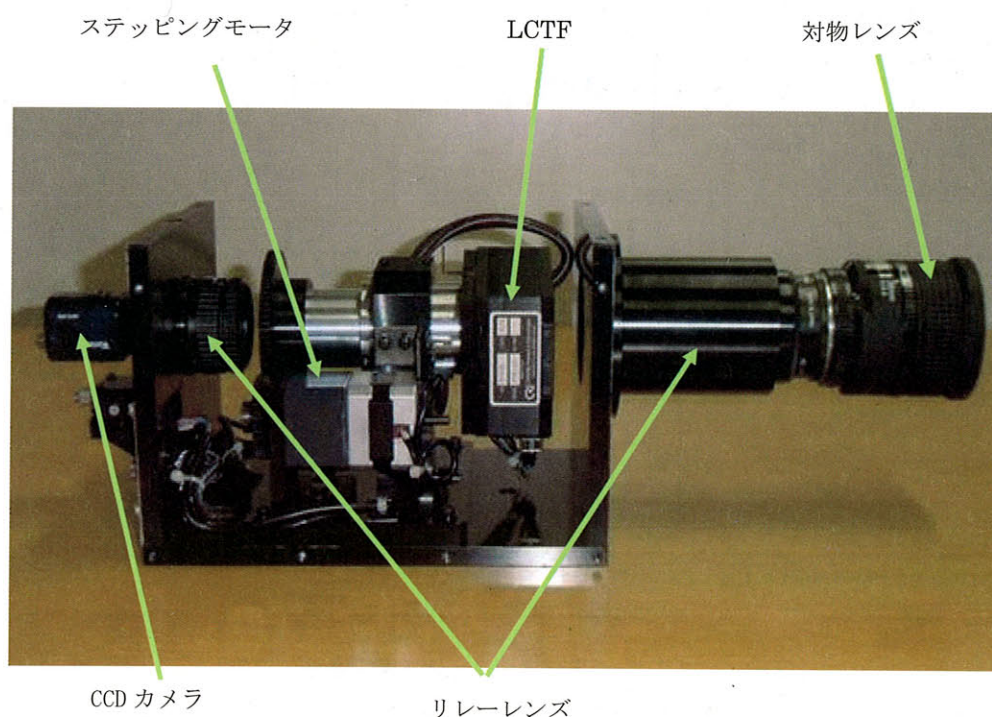


図 3 LCTF 画像型分光偏光放射計の内部構造



### 3 光学観測システムの構築

LCTF センサ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、データ処理、データ収録等、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・実用化を進めるには、LCTF 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築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および構成<sup>31)</sup>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4に示すように、LCTF センサに制御ユニット（周辺装置）を付した構成となっている。制御ユニットには、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、画像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2次元表面条件（surface conditions）は2次元 CCD カメラで捉えられ、データ収録部に蓄えられること、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のノート PC に組み入れられており、LCTF センサ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、デジタル画像がノート PC に収録される。フィルタ回転制御装置は偏波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。

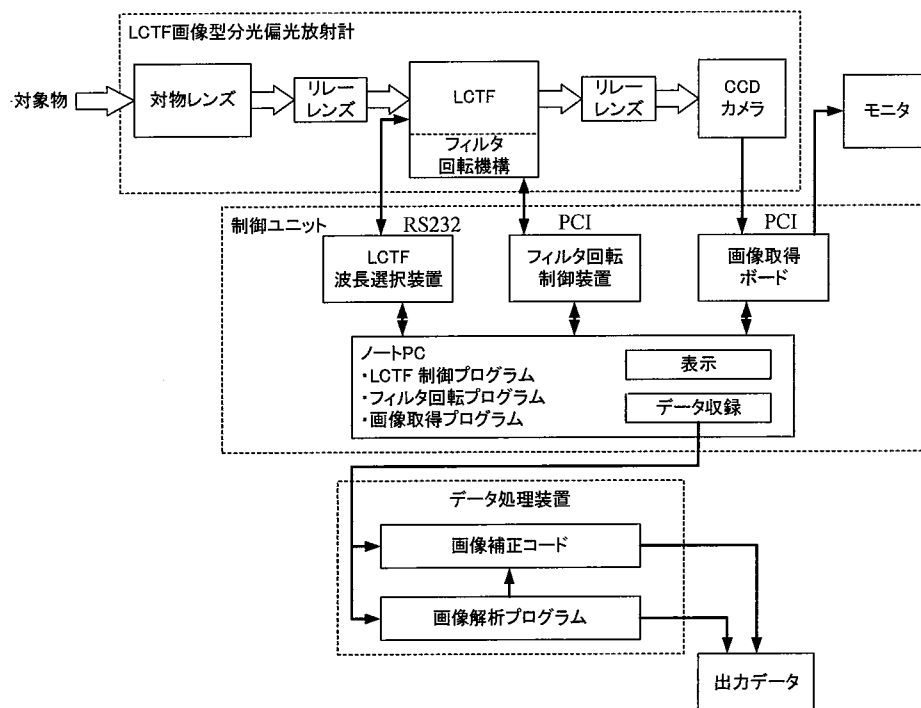


図4 光学観測システム構成概念

#### 3.2 ハードウェア構成

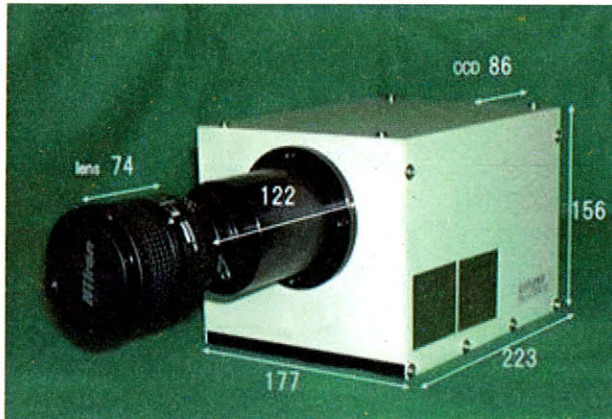
上記のように、制御ユニットに所望の機能をもたせることが LCTF センサ搭載化の基本となるが、そのような機能化のためには、まず、制御信号により前記 LCTF センサ本体のシリアル RS-232C ドライバーで LCTF 透過光の波長選択（分光）を行い、次にそれと同時に透過波長が設定され

フィルタの回転機構を駆動することが必要となる。PCI ボードからの信号で LCTF に回転角を指定することにより、波長に対して偏波面（透過光の偏波面）を連続的に変化させることが必要になる。動作としては、LCTF の回転角（偏波面変位角）及び LCTF 透過光（被選択光）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、等を

駆動用信号として指定し、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 カメラ受光面で得られる 2 次元画像は、画像取得ボード (PCI) を経由して画像取得装置であるノート PC 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

のファイリ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、このような制御が主にパソコンで行えるように構成されている。図 5 に LCTF センサ制御ユニットの各構成要素の概観写真および表 1、表 2 に規格を示す。

LCTF 画像型分光偏光放射計カメラ部



ノートパソコン



PCI 拡張ボックス



制御ボックス



図 5 LCTF 画像型分光偏光放射計制御ユニットの各構成要素の概観写真



表1 ノートパソコン LCTF 画像型分光偏光放射計制御装置規格表

品名／名称／項目	規格／型番	メーカー／寸法
<u>ノートパソコン</u> 1) CPU 2) HDD 3) メモリ 4) モニタ 5) DVD-ROM 6) USB 7) Serial 8) Parallel 9) Ethernet IrDA 10) スロット 11) 重量／寸法 12) 電源 13) OS Windows 2000	Evo N600C PentiumⅢ1.06GHz 20GB 128MB 14.1 インチ TFT XGA  RS-232C  PCMCIA カード 2.62Kg／W307xD250xH31 38W	COMPAQ Intel
<u>PCI 拡張ボックス</u> PCI スロット 1) モーターコントロールボード 2) ビデオピクチャーボード 3) SCSI 4) 重量／寸法 5) 電源	MAGMA CB2S 2 基 C870V1 (ヒロセ電機 100P IMAR PCI-1411  2.60Kg／W254xD385xH66 90W、1A (MAX)	SHOSIN  メレック National Instruments
<u>制御ボックス</u> モータードライバ 1) モーター電源 2) ATX 電源 3) 重量／寸法 4) 電源  LCTF コントローラ 1) インターフェイス 2) 寸法  3) 温度 4) 重量 5) 電源  NTSC 分配器 1) 入出力 2) 電源 3) 消費電力 4) 寸法	PMC33B2 SVS24SA PCSA-300P-X2S 8.5Kg／W430xD350xH99 25W  RS-232 VS-VIS2-5-HC-35 RS232 57x57 (光学モジュール) 165Lx112Wx38H (制御 20～45℃ (動作時) 480g 18VAC  1 入力 4 出力 75Ω AC100V 6.2W 47Hx170Wx190Dmm	オリエンタルモータ イーター NIPRON  フォトテクニカ社  MASPRO

表 2 LCTF 画像型分光偏光放射計カメラ部 (LCTF) 規格表

項 目	規 格
1) 型式	LCTF (CRI VS-VIS2-5-HC-35)
2) 分光波長範囲	400nm~720nm
3) 波長分解能	5nm@400nm, 10nm@720nm
4) 偏光方式	直線偏光成分計測
5) 最大入射照度	500mW/cm <sup>2</sup>
6) 応答時間	50ms (ランダムアクセス)
7) 有効径	35mm
8) 温度	0~45° C
9) 制御方式	シリアル RS-232C
10) 対物レンズ	AF Nikkor 28mm F1.4D (Cマウント)
11) リレーレンズ	エルニッコール 63mm、(株)ニコン
12) フィールドレンズ	両凸レンズ: SPBK-20-30、中央精機(株)
13) 受光部	CCD WATEC WAT-902H 改 (白黒カメラ) 最低被写体照度: 0.002 lx F1.4 出力信号: EIA (NTSC) 電源: DC+10.8~13.2V (12V±10%), max. 160mA 外形寸法、重量: 35.5Wx58Dx36H (mm), 90g
14) 防振クッション	軽量用防振ゴム: KQ-38、倉敷化工(株)
15) ステッピングモーター	5相: CFK543A、オリエンタルモーター(株)
16) 台座	特殊仕様
17) リミットセンサ	EE-SPX302-W2A、オムロン(株) EE-SPX304-W2A
18) スーパーギヤ	M=1 SSAY1-40、小原歯車工業(株) M=1 SSAY1-80
19) 放射計外形寸法	177×156H×505 (345+74lens+86CCD) D mm
20) 全重量、電源	7.72kg, 12V, 160mA, 1.92W
21) 画角	37.2deg



### 3.3 ソフトウェア構成

LCTF センサを用いた光学観測システム（図4）を画像データ取得用計測システムとして機能させるには、駆動用ソフトウェア<sup>38)</sup>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を可変供給させることによって、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フィルタ偏波面を変化させるために必要なフィルタ回転制御装置用ソフトウェア、CCDカメラによって検出される画像を記録、処理するためのソフトウェアが必要となる。

光学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ないので、PCの内部クロックを用いている。これら各ソフトウェアのブロック構成を図6に示す。

#### 3.3.1 LCTF制御プログラム

本プログラムは、制御ユニットの各装置を制御するもので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る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、被選択透過光のスタート波長、エンド波長、ステップ波長、インターバル時間、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、データ取得時刻等を記録するログファイルを作成する。

#### 3.3.2 画像データ取得制御プログラム

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や各制御装置を機能させることと、主に画像取得ボードのNTSC(National Television System Committee)信号（画像データ）の取込みを行い、画像を取得すること、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、取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。

##### 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（ピクセル）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先頭の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”

“2004-11-16 14:31:25 400.00nm 0deg LCTF0001.bmp”

“2004-11-16 14:31:27 410.00nm 0deg LCTF0002.bmp”

・

・

##### (2) 偏光画像取込みデータの保存ファイルの形式

基本的には分光画像保存ファイル形式と同じであるが波長の代わりに角度情報が保存される。

##### (3) 画像フォーマット変換

CCDカメラからの画像は、8ビットでA/D変換された状態のビ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。

##### (4) テストプログラム

取得した画像が正しいか機能確認するためのプログラムであり、CCDカメラで取得した2次元画像と各画素の輝度レベルの3次元表示でノートPCモニタに表示する。

##### (5) 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。

## (6) 画像グラフ表示

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次元表示可能である。

## 3.3.3 画像データ処理プログラム

画像データ取得制御プログラムにより得られたデータは、以下のプログラムによって処理される。

## (1) 実験データ収集コード

各波長毎か偏波面変位角毎に画像表示をしたり、分光波長に対する輝度レベルと偏波面変位角に対する輝度レベルのグラフ特性表示や3次元表示を行うことができる。

## (2) 画像モザイク処理コード

数枚の画像を連続に接合する処理を行う。

## (3) 擬似カラー処理コード

任意の画像に数段階の擬似カラーレベルを割り当てて表示することができる。

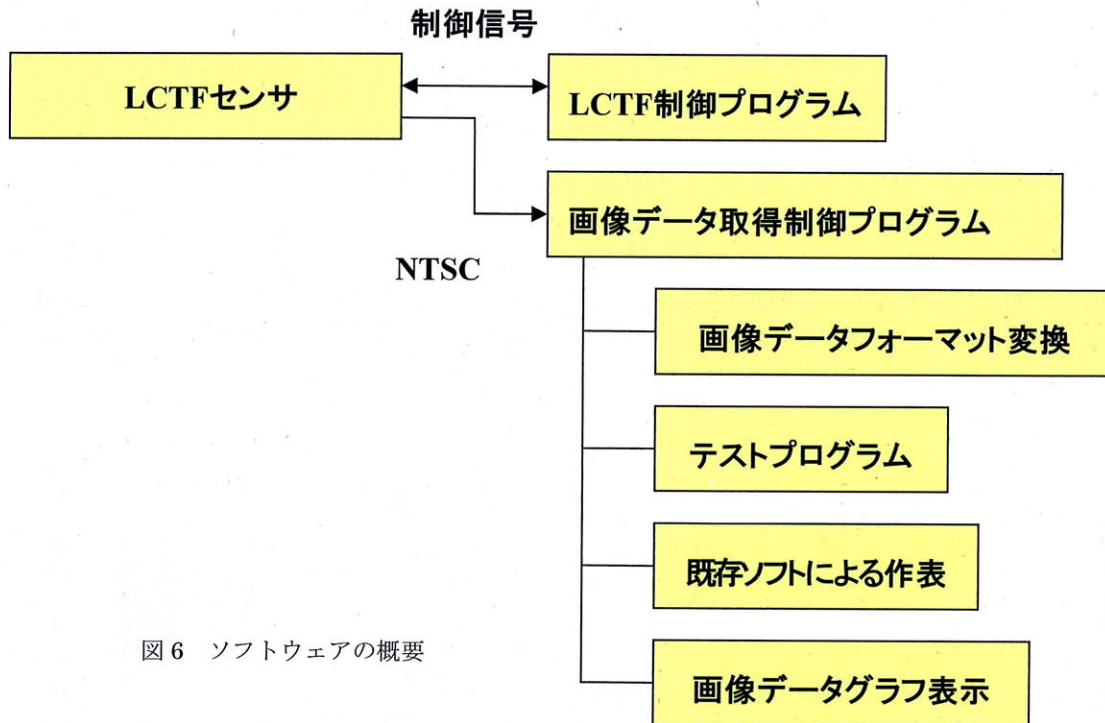


図6 ソフトウェアの概要



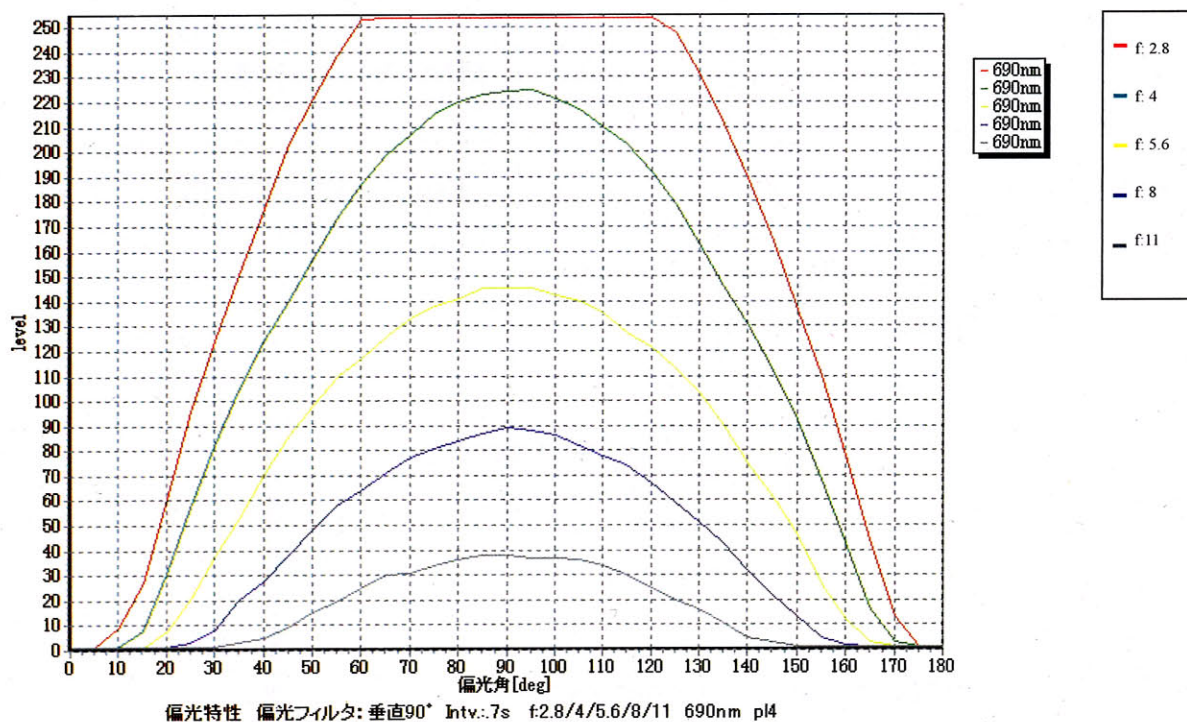
図7 画像フォルダの構成

#### 4 偏波面変位角設定機能

本 LCTF センサは、LCTF に回転機構を装着して、入射光から任意偏光を選択して透過させる機能を有すること、すなわち、偏波面を任意の方向に設定できることが特長である。この機能を評価するには、直線偏光を入射し、LCTF 回転とともに CCD カメラ出力の輝度が正弦波状に変化することを確認することが必要となる。本章では、フィルタ回転機構の機能評価試験の結果を示す。

フィルタ回転機構においては、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=透過光の偏波面と筐体基準面間の角)を変えられるようになっている。このような回転機構の機能評価の実験では、対物レンズの前面にガラス製の直線偏光フィルタを設置し、人工太陽光で白色板を照射し、この光が偏光フィルタを通して、対物レンズ(カメラレンズ)に入射し、CCD カメラで相対輝度が測定される。LCTF を回転しつつ、その変位角を変化させる。透過光の輝度(センサ出力)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、 $\pm 90^\circ$  のときに最小になることで、正常動作の確認がなされる。変位角一

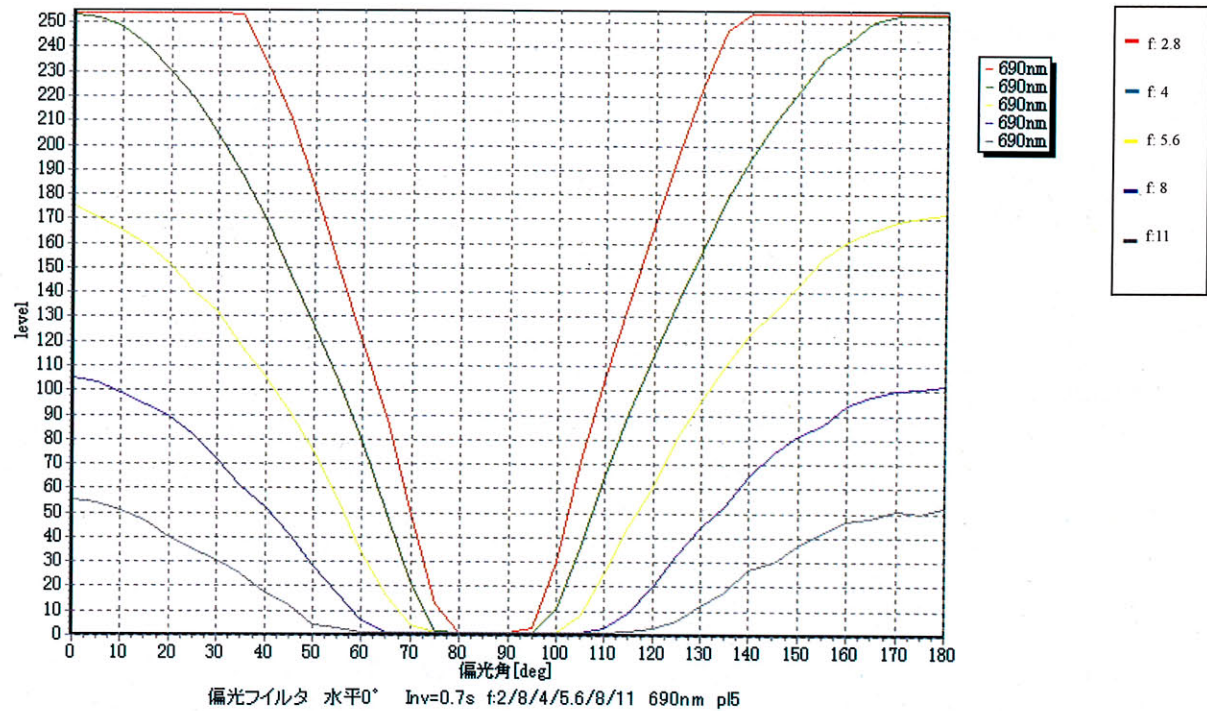
$90^\circ$  から  $+90^\circ$  における出力輝度変化(正規化)を図 8(a)、(b)に示す。図 8(a)、(b)はそれぞれ設置された直線偏光フィルタの偏波面が水平、垂直(ここでは、図 4 に示される LCTF センサの底面を水平面とする)のときの測定結果であり、LCTF の角変位はその水平面をゼロ基準に光軸まわりに決められている。波長は 690 nm を選び、センサの絞り  $f$  は 2.8、4、5.6、8、11 を選び、各絞りにおいて測定された相対輝度値が図 8(a)、(b)の結果となっている。直線偏光フィルタの偏波面、LCTF の回転中心、センサの光軸の合わせ方、CCD 測定精度等実験技術等の影響で、前述の正弦波状変化は完全ではないと考えられる。しかし、図 8(a)、(b)に示される相対輝度値と LCTF 回転角との関係は近似的に正弦波状に変化しており、フィルタ回転機構は設計通りに動作していると云える。すなわち、本研究の目的(野外、飛行観測への適用性評価、第 1 章)達成には十分な機能を有している。なお、LCTF センサに用いられているフィルタ(LCTF<sup>36)</sup>)のスペクトル透過率を図 9 に示すが、可視域(400~720 nm)における FWHM は 5~20 nm となっており、分解能は平均して 10 nm であるといえる。



(a) 偏波面水平

図 8 偏波面変位角とスペクトル輝度との関係





(b) 偏波面垂直

図 8 偏波面変位角とスペクトル輝度との関係

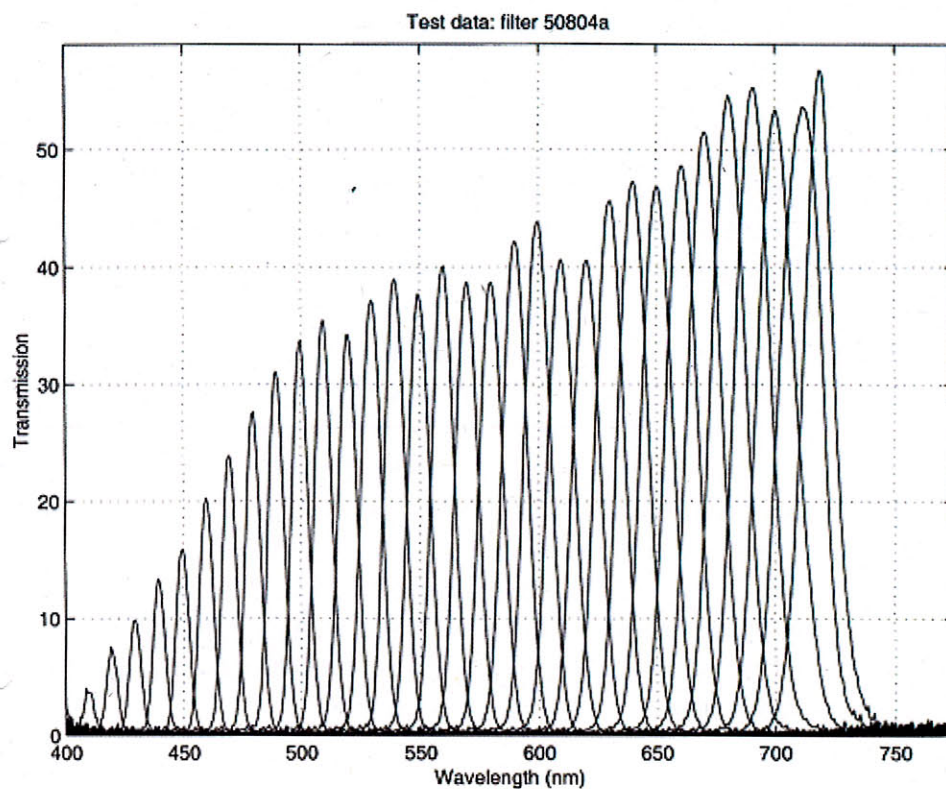


図 9 偏光フィルタ (LCTF) のスペクトル透過率

## 5 濁水モデル実験

本 LCTF センサは地球環境観測をニーズとして開発されてきているが、環境観測といっても土壌汚染、水質汚濁、森林破壊、大気汚染等のさまざまな課題が存在する。これらの観測ニーズはそれぞれに異なったユーザーから求められているが、ここでは水質汚濁観測への適用化を目標に行われた濁水モデル実験について述べる。

### 5.1 水質観測の必要性

田圃を耕し、水を引き、田植えのための苗床を作る作業、いわゆる、代掻きと呼ばれる作業において、濁った水の排水が近辺の川、湖沼を汚染させているのではないかと懸念が最近の環境問題として話題にされつつある。長い間、このような代掻き排水の水質汚濁への影響が問題にされることはなかったが、最近では、河川、湖沼の水質純度の向上が要求されるようになりつつあるので、代掻きの影響を明確にすることが水質環境問題の解決に必要とされるようになってきた。すなわち、代掻き排水の水質への影響を明らかにすることが新たな課題にされつつあり、本 LCTF センサを用いた航空機リモートセンシングによる水質濁度（代掻き排水の水質への影響度）の観測も課題解決への一助となりつつある。LCTF センサによる光学観測では、太陽光を反射する対象物のスペクトル画像及び反射光のスペクトル輝度が出力として得られるので、これらの出力と対象物の特徴とを関係付けることが必要となる。ここでは、そのような関係を明らかにするためのアプローチとして、濁度が既知の濁水モデル水面からの太陽反射光のスペクトル特性を LCTF センサによって観測し、この観測結果から同特性と濁度との関係を実験的に導いた結果を示す。濁水モデルについては、冬季代掻きが進められている地区周辺の河川を対象とし、同地域の田圃の土壌を用いて濃度別に濁水を作成し、各種濃度の濁水モデルとして用いることにする。

### 5.2 実験方法

実験では、既知の濃度の濁水面からの太陽反射光の輝度レベル（相対輝度）のスペクトル特性を濃度別に求めることになるので、実験結果に示される特性は、LCTF センサで未知濃度の濁水面からの太陽反射光の輝度レベルを観測した場合の特徴（濃度）抽出に用いることができる。以下に、このような LCTF センサの用法を明らかにするこ

とを目的とした濁水モデル実験の方法について述べる。

#### 5.2.1 実験器材

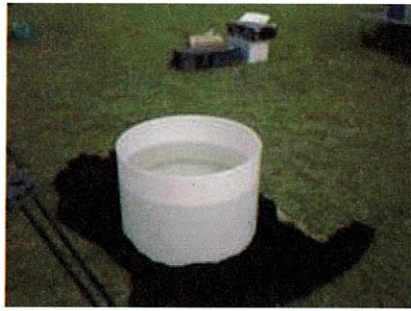
円筒形容器に注入された濁水モデルの例を図 10 (a)、(b)、(c)、(d)に示す。図の(a)、(b)、(c)、(d)はそれぞれ真水、懸濁濃度 10ppm、100ppm、350ppm のケースであるが、濃度が濃くなるにつれて、色も濃くなること分かる。同容器の大きさは高さ 50 センチ、直径 70 センチであるが、入れる水の量は 120 リットル程度である。容器の幾何学的特徴は、上端内径 70cm 下端内径 70cm の円筒形であるので、実測値として水面の底からの高さは約 32cm となる。10、25、50、100、200、350ppm の 6 ケースを観測対象とする。容器に順次土を混入しつつ、濃度を高めつつ、各濃度ごとに観測がなされる。図 11(a)に実験器材として、LCTF センサ、PC、等の配置状況を、図 11(b)に実験の光景を示す。

#### 5.2.2 実験手順

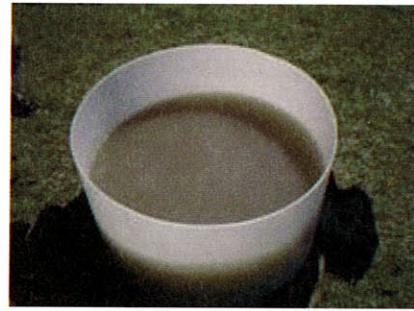
濃度別にカメラ角度、太陽位置、偏波面変位角を設定し、水面からの太陽反射光を LCTF センサに入射し、CCD カメラで選択波長に対応した出力を求めることになるが、その際の出力は LCTF 透過光の相対スペクトル輝度及び水面のスペクトル画像である。カメラ角度は、その光軸方向を水面に垂直、45° に設定した場合（カメラ角度 90°、45° と定義する）の 2 ケースを対象とする。太陽位置は、太陽光線方向とその地面への正射影の作る面がセンサの光軸とその地面への正射影が作る面に一致する場合を“太陽正対”とし、両面が直交する場合を“太陽方向 90°”方向とし、この 2 ケースを対象とする。また、偏波面変位角は、偏波面が水面に平行する場合を 0° とし、この位置から入射光進行方向右回りに順に 45°、90° に設定し、この各ケースを対象とする。

#### 5.2.3 実験条件

本実験は（独）農業環境技術研究所（農環研）において実施され、当日の天候は、晴天、高温、高湿の状態であり、熱による予測されない事態（太陽輻射の PC 動作への影響と LCTF が熱に弱い等）に備えて、日傘などを用いて実験器材は日陰に置き、送風機を使用した（図 11）。晴天による日差しの強さのために、また、雲等による太陽光の強度変化がないために、太陽反射光の波長特性の取得（スペクトル輝度、スペクトル画像の取得）は比較的容易に進められたと考えられる。



(a) 真水



(c) 濃度 100 ppm

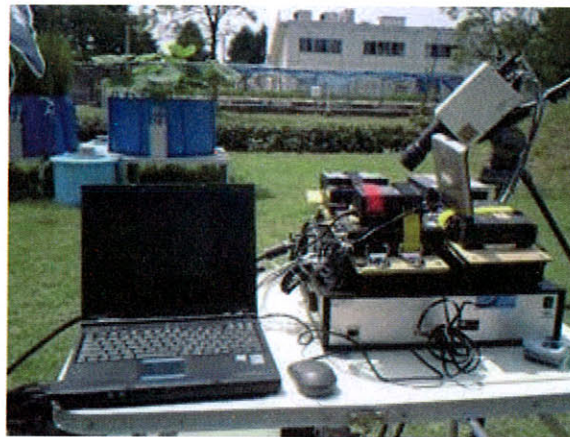


(b) 濃度 10 ppm



(d) 濃度 350 ppm

図 10 容器内の濁水の状況 (真水、10 ppm、100ppm、350 ppm )



(a) 実験装置の配置状況



(b) 野外実験の光景

図 11 野外における濁水光学観測の状況



### 5.3 実験結果

#### 5.3.1 濁度とスペクトル輝度との関係

太陽正対、カメラ角度  $45^\circ$ 、偏波面変位角  $0^\circ$  における濁度別スペクトル輝度の観測結果を図 12 に示す。低濃度 (25ppm 以下) 濁水の表面からの太陽反射光のスペクトル輝度は、波長 600nm 近傍、690nm 近傍で特徴 (輝度値) が著しく変化し、高濃度になるにつれて、これらの波長近傍のほかに 630nm 近傍でも著しい変化の波長特性が示されている<sup>32)</sup>。これらのことは、土壌印加によりそのような波長における波長反射率が水とは異なったためと考えられる。濁水濃度がある程度 (例えば、50ppm 以上) 以上になると、真水としての水面反射に加えて、濁水としての水面反射の影響もスペクトル輝度として現れており、そのときの波長が 630nm 近傍であるといえる。すなわち、本 LCTF センサによる太陽反射光の観測では、濁度 25ppm 以下の場合と濁度 50ppm 以上の場合におけるスペクトル輝度の違いは、630nm 近傍で著しい波長特性が現れるか否かということで特徴付けられている。したがって、河川、湖沼等の実環境において、この LCTF センサを用いた観測結果から 630nm 近傍で著しい太陽反射光輝度の波長特性が示されたならば、冬季代掻き地区の田圃の土壌と同じもので水が汚濁されていると考えることができる。ここで、近傍とは、おおむね  $\pm 10\text{nm}$  の波長幅を意味するが、これは

LCTF センサの出力のふらつき並びに実験精度 (実験日の太陽光強度の影響、水面の波うち等) によるものであると考える。さらに、高濃度になるにつれて、波長 710nm 近傍で輝度レベル曲線が下降から上昇に転じる傾向も水質汚濁のためとみなされるので、630nm 近傍における突出した波長特性と合わせて、LCTF センサによる水質汚濁観測の基準とすることができる。この濁度観測を量的に判断すれば、濁水モデル実験で示された 50ppm 以上が観測可能基準となる。2 次、3 次の反射光の入射等を考えると、低濃度 (25ppm 以下) の濁水では精度よくスペクトル特性を求めることが難しいと思われる。すなわち、濁度がある程度大きくなれば、波長特性が顕著な状態で計測可能ということになるので、量的に濁度を求めることが容易になる。しかし、一般的に言って、水質汚濁を求める際にはセンサの低濃度計測限界が必要となるので、今後は、そのような要求が満たされるように光学観測システムの構築、ならびに、濁水モデル実験が必要となる。

以上の実験結果より、LCTF センサで冬季代掻き地区の水質観測を行う場合、センサ出力 (輝度レベル) が波長 630nm 及び 710nm において著しい特性を示せば、近辺の田圃の土壌が濁度 50ppm 以上の濃度で混入されていると云えるが、一方、そのような特性が示されない場合は、濁度は 50ppm 以下であると考えられる。

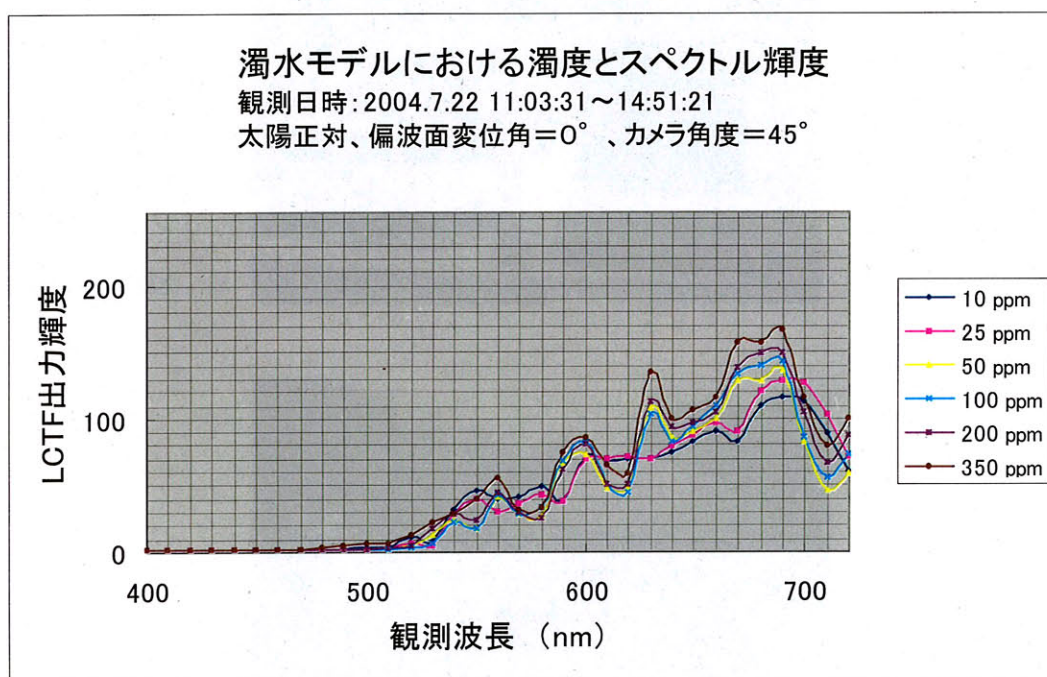


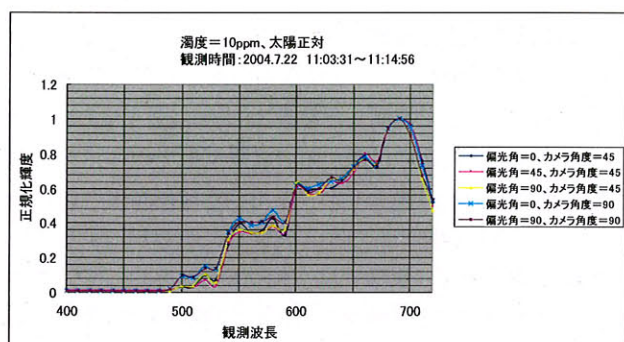
図 12 濁水モデルの濁度とスペクトル輝度の関係



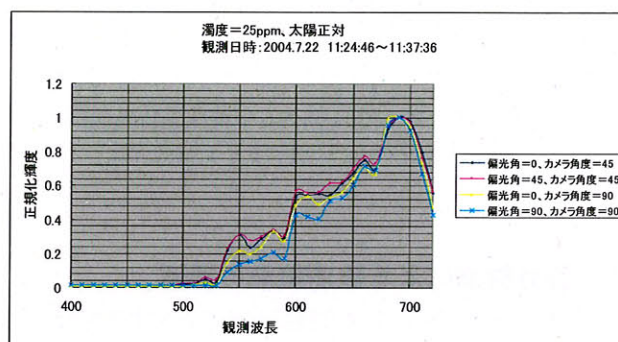
### 5.3.2 偏波面変位角を変化させたときの実験結果

濁水面からの太陽反射光のスペクトル輝度（以下、単に濁水輝度とする）の特徴（630nm、710nm における波長特性）が、太陽正対、カメラ角度 45°、偏波面変位角 0° を仮定したときの結果として前項で示されている。ここでは偏波面変位角、カメラ角度を変化させて、同様の実験を行ったときのスペクトル輝度特性について述べる。図 13(a)、(b)、(c)、(d)、(e)、(f)に、カメラ角度、偏波面変位角をパラメータとして濁度 10ppm、25ppm、50ppm、100ppm、200ppm、350ppm のときのスペクトル輝度特性の正規化された値を示す。この図 13 は濁水モデル実験の全ケースに

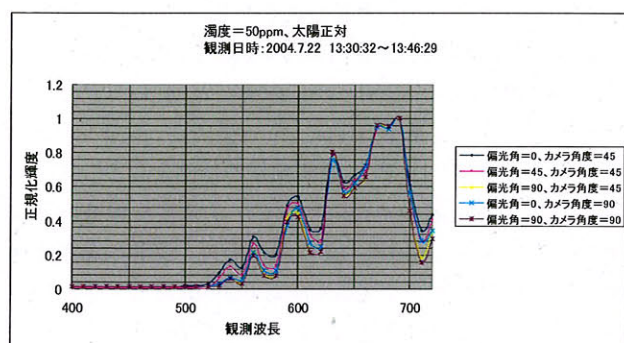
ついてデータ解析を行った結果である。全ケースでの観測時間が長く、その間太陽高度の変化によって輝度レベルが変動している関係上、各濃度とも最初の実験ケースでの観測値に正規化した相対輝度値で図示している。どの濃度においても、カメラ角度、偏波面変位角の相違によるスペクトル輝度特性の相違は少なく、各濃度における濁水のスペクトルを反映していると考えられ、図 12 に示されたと同様の波長特性の特徴が現れている。これらのことから、LCTF センサで濁度観測を行う場合、透過光波長 630nm、710nm における輝度特性に同様な特徴が観察されれば、濁度 50ppm 以上であると推察できる。



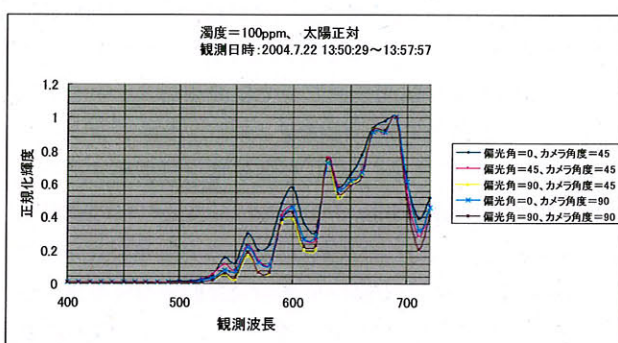
(a) 濁度 10ppm



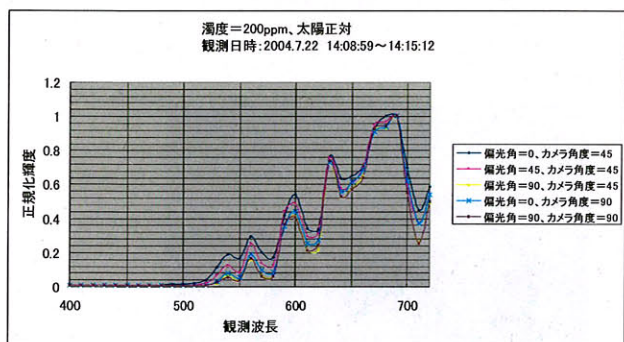
(b) 濁度 25ppm



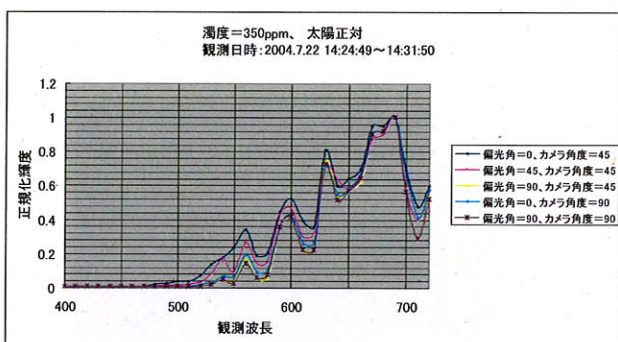
(c) 濁度 50ppm



(d) 濁度 100ppm



(e) 濁度 200ppm



(f) 濁度 350ppm

図 13 (a), (b), (c), (d), (e), (f) : 濁度 10ppm、25ppm、50ppm、100ppm、200ppm、350ppm における正規化スペクトル輝度特性



#### 5.4 実験結果の考察

本節に示された濁水モデル実験の結果は、LCTF センサによって濁水の濁度観測を行う場合の LCTF センサ出力と濁度との関係を実験的に明らかにしており、冬季代掻き地区における田圃土壌の流出による水質への影響に関しては、濁度 50ppm 以上の場合に推定可能であるといえる。一方、今回の実験では、濁度レベルによって LCTF センサ出力がどの程度になるかを定量的に規定することはできないが、図 12、13 に示された、透過光波長 630nm、710nm における輝度特性の値が、濁度レベルに応じて、高くなっていることを考えれば、観測ごとに相対輝度レベルの大小を変えることなく、同一輝度レベルで出力データ処理して相対スペクトル輝度を表示することによって、濁度の大小を定性的に示すことは可能である。したがって、図 12、13 に示される濁度によるスペクトル特性の特異性は濁度の大小の定性的表示の一例とみなすことができる。

### 6 野外観測による観測機能の評価

LCTF センサを用いた光学観測システムを地球環境観測用航空機リモートセンシングに実用化していくためには、実利用状態（地表面観測状態）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 LCTF センサの画像取得機能を評価することが必要となる。また、このような実環境（real world）観測を通じて光学観測システムを構成することは、航空機等飛行体搭載リモートセンシングへの適用化としてだけでなく、それ自体が地上設置型リモートセンシング（ground-based remote sensing）への適用化にも有用となる。これは、いずれのリモートセンシングでも、観測対象物からの太陽反射光の分光偏光特性を捉えることになるからである。本章ではこのような実利用化の観点から、LCTF センサの耐実環境評価のために行われた野外観測における画像データ取得機能及び対象エリア内のスポットからの太陽反射光のスペクトル輝度取得機能を示すとともに、観測対象の特徴評価手順について述べる。

#### 6.1 水質濁度観測の試み

LCTF センサを用いた実環境観測では、冬季代掻き排水の水質への影響が課題になりつつある冬季代掻き地区周辺の河川を対象とし、対象内エリアのスペクトル画像およびエリア内スポットからの太陽反射光のスペクトル輝度を求め、野外観測に耐えることを明らかにする。得られた LCTF センサ出力データに前章の結果（濁水面からの太陽反射光輝度の波長特性の特異現象）を適用し、LCTF センサの水質濁度観測への可能性を示とともに、これによって河川、湖沼等の水質がどの程度代掻き排水に影響されているかを定性的に明らかにする。

#### 6.2 代掻き田圃の観測

冬季代掻き地区における代掻き田圃からの太陽反射光を LCTF センサで観測した結果について述べる。このような観測は、同地区の田圃からの太陽反射光のスペクトル輝度特性が、前章の濁水モデルを用いた観測結果と比較して、どのような相関があるかを実験的に明らかにするためである。濁水モデル実験では、水に土壌が混じっている状態における反射光観測であるが、田圃の観測は実環境（real world）試験であり、図 14 の実験光景に示されるように、耕作後に水を張った土壌表面からの反射光観測がなされる。したがって、両者の観測条件の違いは存在する。しかし、冬季代掻き地区の土壌が両観測でどのようなスペクトル特性を示すかを明らかにすることは、LCTF センサ出力のセンシング基準の作成（キャリブレーション）のために有用となる。図 15 に観測結果の一例として、田圃水面からの太陽反射光の相対スペクトル輝度を偏波面変位角に即して示す。図 12、13 の濁水モデル実験の結果と比較して、LCTF センサ透過光波長 630nm 近傍で著しい波長特性を示すことは共通しているが、710nm 近傍における特性変化については共通要素が見受けられない。このことは、当 LCTF センサで濁水観測を行う場合、少なくともセンサ透過光波長 630nm 近傍における波長特性に注目する必要があることを示している。



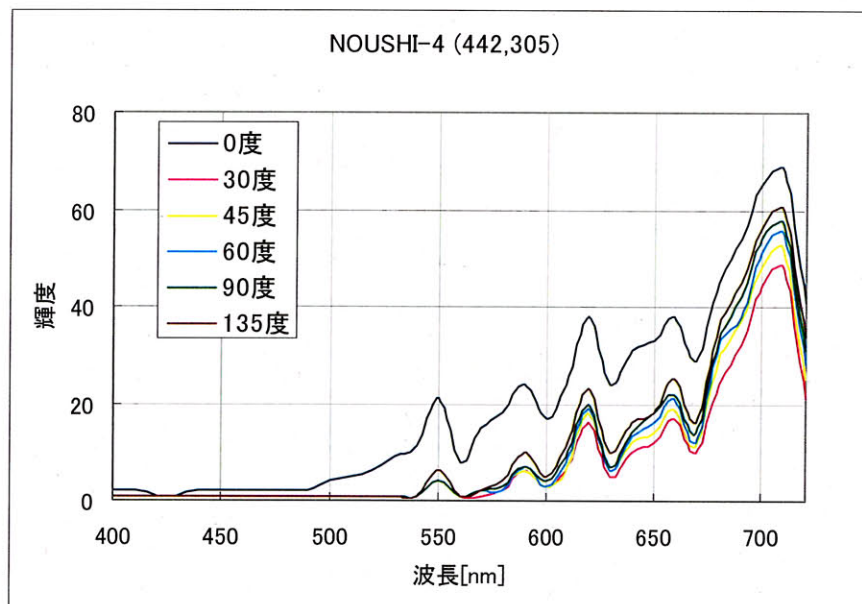
(a) 観測対象の田圃



(b) 観測装置の設置状態

図 14 代掻き田圃の光学観測の光景





### 6.3 偏波面変位角のセンサ出力への影響

LCTF センサによって対象物からの太陽反射光の特性を観測する場合、LCTF センサの偏波面の角位置によって LCTF センサ出力 (スペクトル画像) が異なるので、LCTF センサの配置 (太陽方向との関係)、偏波面変位角による出力の違いをあらかじめ地上試験によって明らかにし、有効スペクトル領域で出力が取得可能な偏波面変位角の範囲を設定しておくことが必要である。特に、航空機搭載時においては、偏波面変位角を一定に保った状態で飛行観測がなされる場合、光学特性が取得可能な偏波面を定めてから、飛行観測を行う必要がある。前節で示された代掻き田圃(図14)の表面からの太陽反射光を観測して、波長 630nm におけるスペクトル画像を偏波面変位角  $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$  に即して示せば、図 16 のようになる。これらの画像を目視してみれば、偏波面変位角の違いによる水面における鏡

面反射の相違は明白であり、画像解析 (対象物の特徴抽出等) に用いるには、偏波面変位角  $90^\circ$  のものでなければならないといえる。一方、図 16 のエリア内の任意のスポットからの太陽反射光のスペクトル輝度は図 17 のようになり、偏波面変位角  $0^\circ$ 、 $45^\circ$  においては飽和する (波長に関係なく一定になる) 部分が現れる。この特性からも、観測時の偏波面変位角は  $90^\circ$  にする必要があるといえる。これは、航空機搭載試験を行う際に適用して考えれば、航空機が太陽方向に進行するときには偏波面変位角を飛行方向 (機軸方向) に設定すればよいこと、太陽と直角方向に進行するときには偏波面変位角を機軸に直角方向に設定すればよいことを意味するが、当日の天候、地形、管制等の影響で航空機の運行は所望通りになるとは限らないので、飛行試験の際には偏波面変位角を  $0^\circ$  または  $90^\circ$  にして、両ケースのデータを取得するようにしている。

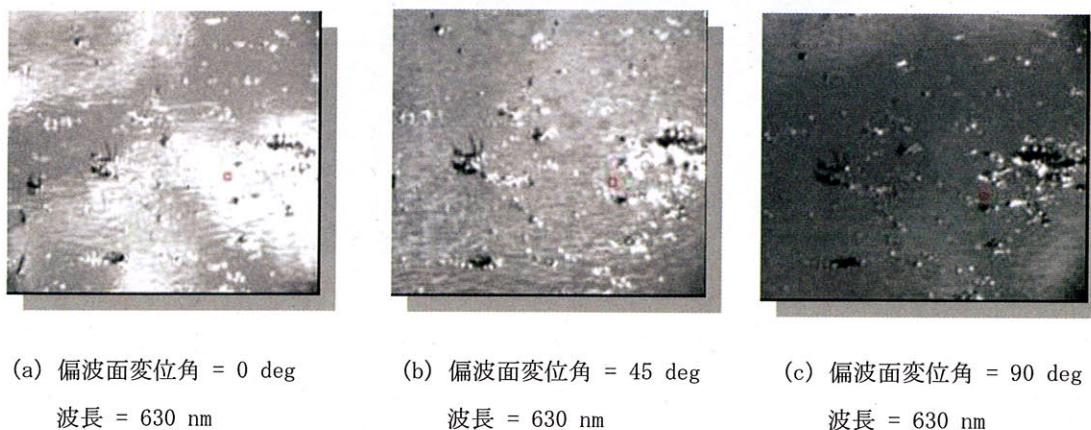


図 16 代掻き田圃のスペクトル画像(a),(b),(c)

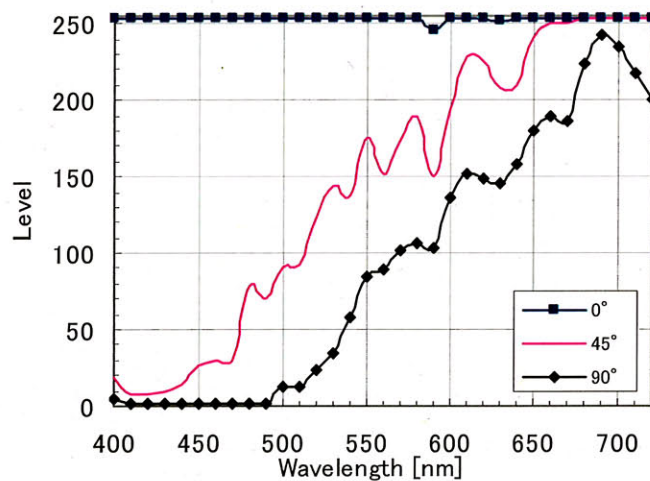


図 17 代掻き田圃表面からの太陽反射光の相対スペクトル輝度

#### 6.4 代掻き田圃周辺の河川、湖沼における観測

代掻き田圃周辺の河川、湖沼の水質を野外観測 (real-world observation) によって調べ、水面からの太陽反射光のスペクトル特性の測定に対する LCTF センサの適用性を明らかにする。地上光学観測の対象に選んだ冬季代掻き地区 (湖周辺) の河川は同時に航空機観測の対象ともなる地域である。これらの地域の河川水面からの太陽反射光のスペクトル特性にどのような特徴が存在するか

を地上、飛行観測の結果から見出し、本 LCTF センサの航空機リモートセンシングへの有用性を明らかにする。地上光学観測の対象となる湖及びその周辺の写真を図 18 に示す。この写真は航空機観測 (次章) から得られた上空からのビデオ撮影写真である。図の A1、B1、C1 はそれぞれ、代表的な 3 つの河川 (以下、河口 A1, 河口 B1, 河口 C1) と記す) が湖に注ぎこむ河口周辺である。また、カッコ内の数字は撮影年月日を示している。

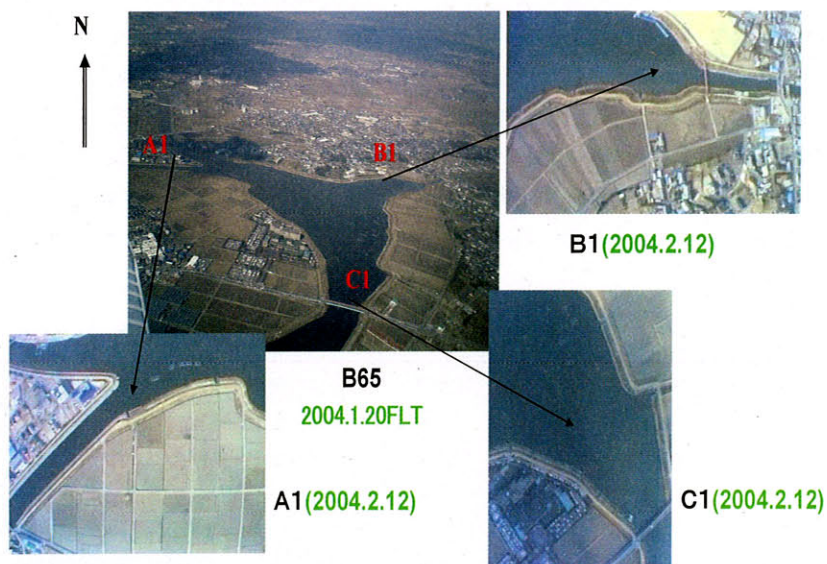


図 18 湖及びその周辺の上空写真



図 19 に河川が湖に注ぐ付近 A1 における光学観測の状況を、図 20(a) にこの観測における LCTF センサ出力から得られた太陽反射光のスペクトル輝度をそれぞれ示す。図の A1 は被観測場所を、F8 は対物レンズの絞りを、 $100 \times 100$  はスペクトル輝度を抽出する画像サイズ (撮像対象面積、単位はピクセル) をそれぞれ意味する (以下同様)。図 20 には、偏波面変位角別のスペクトル輝度が示されているが、波長 550nm、580nm、700nm 近傍で波長特性が著しく現れている。また、偏波面変位角による波長特性の傾向には変化があまり見られないが、輝度レベルの違いは顕著に現れている。特に、偏波面変位角  $90^\circ$  で輝度レベルが低いのは、この状態では偏波面が地面に水平となっているため、この状態では偏波面が地面に水平となっているために水面反射光がほとんど LCTF センサに入射しないことが原因していると思われる。図 20(a) の特性には波長 630nm、710nm 近傍では輝度の波長特性の特徴は現れていない。同様な観測において、画像サイズ  $200 \times 200$ 、 $300 \times 300$  と 4 倍、9 倍に広げたときの観測結果を図 20(b)、(c) に示すが、観測対象面積を広くしても波長 630 nm 近傍で特性の変化は顕著に現れていないことがわかる。以上の結果から判断する限り、河川水の濁度は 50ppm 以下であると考えられる。

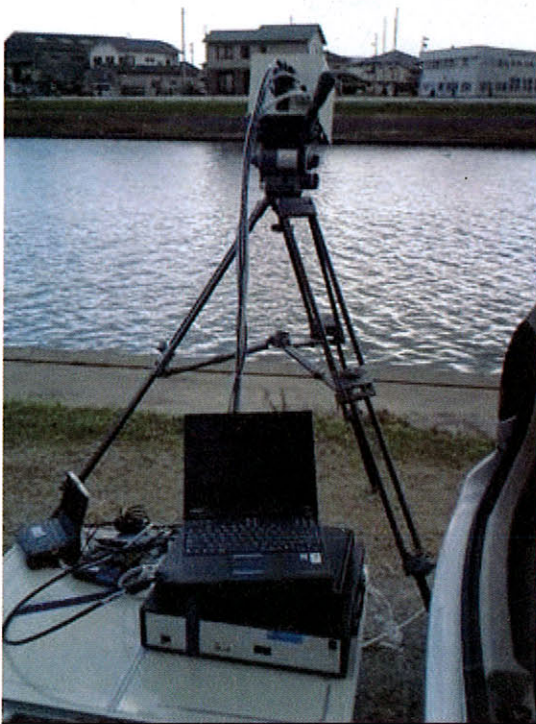


図 19 湖の河口 A1 付近での光学観測の情景

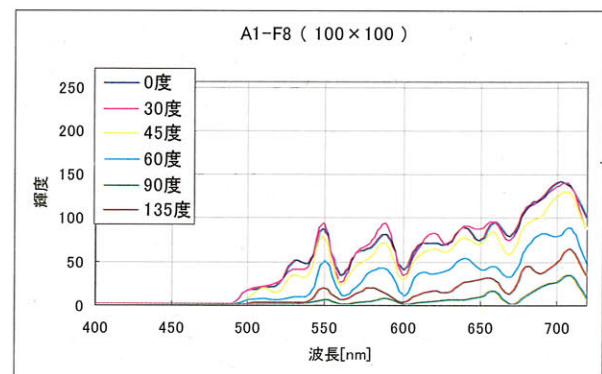


図 20(a) 河口 A1 観測結果 (スペクトル輝度) その 1

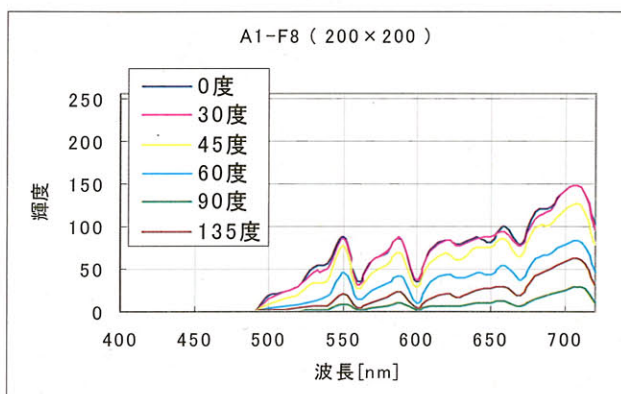


図 20(b) 河口 A1 観測結果 (スペクトル輝度) その 2

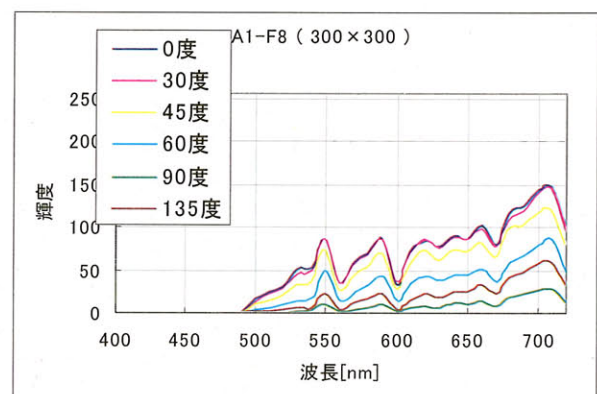


図 20(c) 河口 A1 観測結果 (スペクトル輝度) その 3

同様な観測を別の河川が湖に注ぐ C1 付近で行ったときの観測状況を図 21 に、LCTF センサ出力から得られたスペクトル輝度を図 22(a)、(b) にそれぞれ示す。図 22(b) は、図 22(a) に比して LCTF センサの絞りを 5.6 から 8 へ 1.4 倍に絞って観測したときの結果であるが、

この両者の特性変化傾向の違いはみられない。図 20(a)、(b)、(c)、図 22(a)、(b) を比較して、輝度レベルの違いは見られるが、スペクトル特性の変化傾向はほとんど同じであることが分かる。この特性から河川水の濁度は 50ppm 以下であると考えられる。



図 21 河口 C1 付近での光学観測の情景

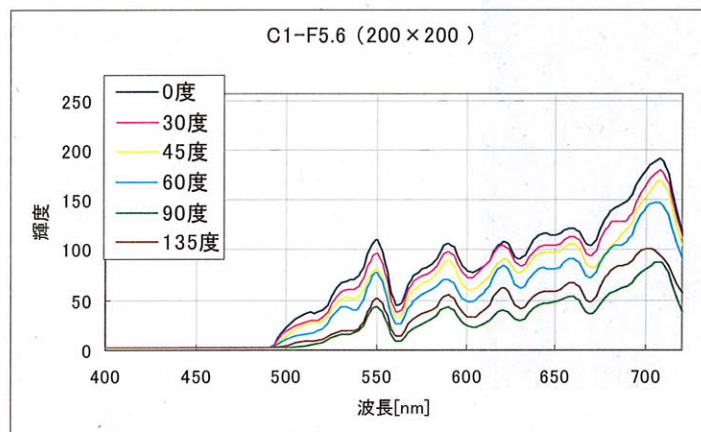


図 22(a) 河口 C1 観測結果 (スペクトル輝度) その 1

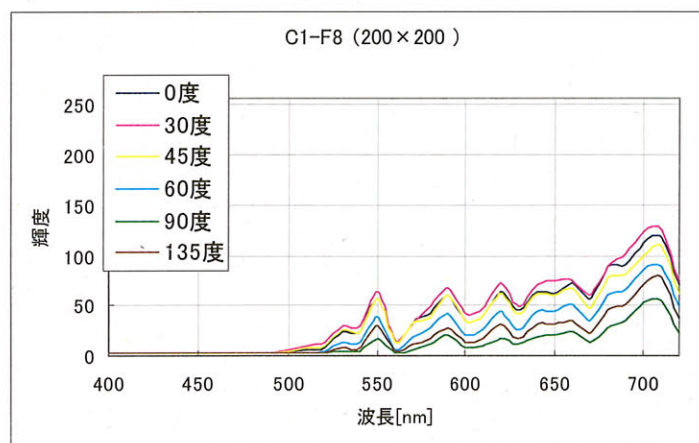


図 22(b) 河口 C1 観測結果 (スペクトル輝度) その 2



また、河口 B1 下流付近光学観測を行ったときの観測状況を図 23 に、LCTF センサ出力から得られたスペクトル輝度を図 24(a)、(b)にそれぞれ示す。図 24(b) は、図 24(a) に比してセンサの絞りを 2.8 から 1.4 に下げたときの結果であるが、特性変化の傾向は同様である。図 20(a)、(b)、(c)、図 22(a)、(b)、図 24(a)、(b)を比較した場合、輝度レベルの違いは見られるが、スペクトル特性の変化傾向はほとんど同じであることが分かる。そしてまた、波長 630nm、710nm 近傍では輝度の波長特性の特異現象は現れていないことも共通しており、各観測対象の河川水の濁度はいずれも 50ppm 以下であるとみなされる。

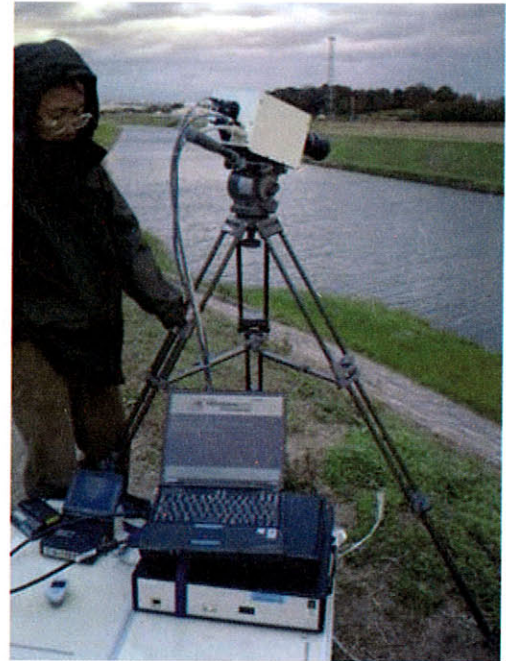


図 23 河口 B1 下流付近での光学観測の情景

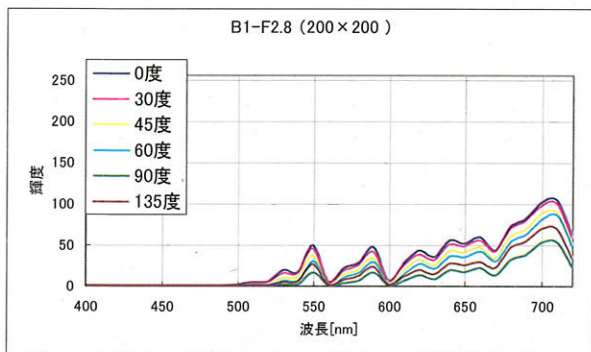


図 24(a) 河口 B1 観測結果 (スペクトル輝度) その 1

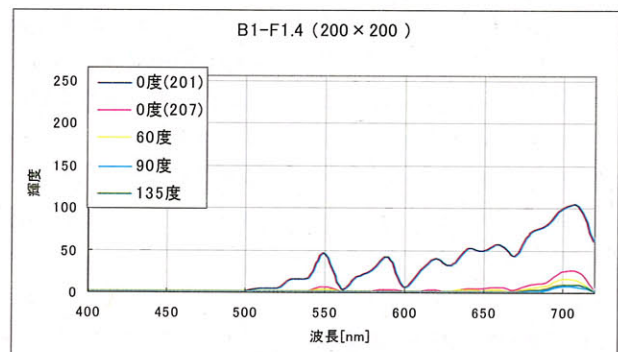


図 24(b) 河口 B1 観測結果 (スペクトル輝度) その 2

各観測 (図 19、21、23) は川べりに LCTF センサを設置して行われたが、LCTF センサの水面からの高さは 3、4 メートル程度、観測対象から LCTF センサまでの距離は 10 メートル程度であったので、LCTF センサへの太陽反射光の入射角はかなり高く、観測対象エリア以外の周辺 (水面、川辺、農地等) からの太陽反射光の影響も相対的に大きいと推定されるが、前述の第 5 章および本観測結果 (水面からの太陽反射光のスペクトル特性) から定性的な判断として、代掻き排水の河川への影響度は濁度 50ppm 以下であるといえる。

## 6.5 野外観測評価のまとめ

本章では、試作済の LCTF センサが地表面からの太陽

反射光の計測に有用か否かを明らかにするために、水域汚濁を例に行われた地上観測の結果を光学特性 (スペクトル輝度) によって示したが、被反射対象エリアのスペクトル画像も偏光面変位角に対応した特性となっている (図 16)。これによって、本 LCTF センサは実環境 (real world) での使用に耐えるものであるといえる。今回の野外観測では、地上観測機能の確認という観点からして、十分な結果であると考えられる。すなわち、本 LCTF センサは前述の地上設置型リモートセンシング用として使用可能なものであるといえる。また、上記各野外観測における観測システムの稼動が PC 操作によってなされたことからして、搭載工事等を施して搭載化を進めれば、航空機搭載リモートセンシング用光学センサとして十分機能するといえる。



## 7 飛行試験評価

LCTF センサを航空機リモートセンシング用として実用化するには、インターフェース、データ記録装置等の補助装置を組み込んで搭載型光学観測システムの構成及び同システムの地上評価試験と共に、動的環境下における飛行評価試験も必要となる<sup>38)</sup>。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。本章では、可視域 LCTF センサを用いた搭載型光学観測システムによる飛行観測（画像取得）の結果を示すとともに、上述の目的達成が可能になることを明らかにする。システム構成は第3章で示したものと同様であり、機上観測の手法（器材操作）も前章の地上観測の手法とほとんど同じであるが、観測時刻の同期設定に機上搭載計算機を用いること、パワーサプライに機上電源を用いること、等が異なる。以下、本章では飛行試験技術及び飛行試験結果として、高度、速度、観測時間等に関する飛行パラメータの設定、飛行試験の有用性、搭載観測システム、湖・河川・農場上空における飛行試験、等とともに、得られた飛行試験結果の評価について述べる。

### 7.1 飛行パラメータの設定

地上設置型観測に比して、飛行試験では撮像対象が時々刻々推移する上に、LCTF センサの観測波長選択時間の関連で撮像対象画像の波長も時々刻々変化するので、飛行試験データ（取得画像）の解析において対象物の特徴をより詳しく抽出するためには、飛行高度と飛行速度を選定して、全観測波長帯域で同一対象地域のスペクトル画像をとるように撮像画像の観測重複率を高める必要がある。しかし、実験用航空機の飛行領域、飛行可能高度範囲は、飛行地域の状況（飛行空域管制制限）に応じてあらかじめ決められているので、このような制約範囲内で飛行する際、飛行高度、飛行速度と撮像可能な観測地上幅、地上分解能を決めておくことが必要である。飛行観測において、波長帯域観測時間  $T$ （1回のデータ取得時間）は、LCTF センサの有効波長帯域（400～720nm）の範囲内で観測開始波長、観測終了波長を設定して事前に決められるものであり、画像取得の波長間隔（1データごとの波長帯域）は、観測のたび毎に、分解能 10nm（LCTF の分解能）の整数倍の量として決められるものである。飛行高度を  $h$ 、LCTF センサ

の視野角を  $\theta$ 、この視野での観測地上幅を  $L$ 、飛行速度  $V$  とともに、航空機が  $T$  時間に移動する距離  $L_1$ 、として LCTF センサが機上から地上を観測するときの観測重複率  $k$  は次のようにして決められる。

$$L=2h \times \tan(\theta/2) \quad (7.1)$$

$$k=(L-L_1)/L=1-V \times T/L \quad (7.2)$$

上式では航空機のバンク角は  $0$  としているが、飛行試験においてもバンク角  $0$  の水平飛行の状態で観測を行うようにしている。また、飛行機の進行方向に垂直に並んだ画素列の数を  $p$  とし、各画素列の画素数を  $N$  とすれば、地上分解能を  $m$ 、重複画素列の数  $n$  はそれぞれ

$$m=L/N \quad (7.3)$$

$$n=p(1-VT/L) \quad (7.4)$$

となる。上記の  $k$ 、 $n$  が正值のときには、航空機の飛行に伴って観測対象エリアが変化しても、同一観測対象地域での全観測波長帯域のスペクトル画像の重複部分が存在するので、そのような状態が発生するようにして飛行観測を行うことが必要である。なお、当機構所有の実験用航空機（ビーチクラフト 65 型機）に本 LCTF センサを装着したときの画角  $\theta$  は  $37.2^\circ$  である。また、LCTF センサ内の CCD カメラの画素数は  $480 \times 640$  である。

### 7.2 飛行試験の有用性

試作済の LCTF センサを航空機リモートセンシング用として開発を進めるための評価試験として、地表面の各種対象物からの太陽反射光のスペクトル輝度、対象物のスペクトル画像が取得できる機能の有無を確認することが必要となるので、飛行試験でも地上野外試験と同様、飛行観測の可能性を明らかにするとともに、LCTF センサの搭載化技術、利用技術、飛行試験技術の確立を進めることが必要である。したがって、撮像対象は任意に選べばよいが、ここでは本 LCTF センサの当面の外的ニーズに対応してなされた飛行試験の結果を示す。そのようなニーズとしては、作物の生育状態の観測、農業排水の河川、湖沼汚染への影響度の観測、牧場における家畜、牧草の仕分けの観測、等、農業環境に関する対象物の光学観測がある。特に注目されているのは、前章で述べた冬季代掻き地区の河川、湖沼の飛行観測である。これは、代掻き排水の水質汚染への影響度を上空から広域光学観測できることの可能性を示すことになり、航空機リモートセンシングの環境課題解決への利用につながるからである。

### 7.3 搭載型光学観測システムの概要

図 25 に当機構所有の実験用航空機（ビーチクラフト 65 型機）内に装着された LCTF センサ観測システムの状況を示す。LCTF センサは、その光軸が垂直下方を向くように、機体内床面のカメラ孔に設定されるので、水平飛行においては、地表面の撮像対象は、7.1 節の(7.1)式から求められる地上幅 L を辺とする長方形になる。LCTF センサ以外の主な搭載器材は PCI 拡張ボックス、制御ボックス、ノート PC である。観測システムの機上稼動はすべて PC マニュアル操作によってなされる。航空機の時刻、位置は機体内に常備されている飛行実験データ収集システム FDAS (Flight Data Acquisition System) からの出力信号を基準としたアップデートを光学観測システム出力に適用する。ここで、FDAS は、GPS/INS 複合航法システムが出力する GPS 時刻信号をローカル時刻に換算しつつ、時々刻々の航法情報（航空機の位置、速度、高度、姿勢等）を出力している。観測時間帯（被観測対象の上空を飛行する時間帯）には航空機が水平飛行を行うこととしているが、この水平設定は LCTF センサが地表面を観測するため光軸を常に垂

直にする必要があるためである。

飛行観測では、有効波長帯域（400～720nm）の範囲内で観測開始点、終了点の波長を設定して、画像取得の波長間隔（1 データごとの波長帯域）は、観測のたび毎に、分解能 10nm の整数倍の量に（離散的に）設定し、以後は自動的に画像取得がなされる。したがって、飛行観測は、光学観測システムによるデータ取得（PC 操作）と FDAS 出力情報の選択（PC 操作）の二つの機上 PC 操作とパイロットの操縦とによって構成されている。FDAS、光学観測システムともに離陸（take-off）から着陸（landing）まで稼動状態となっているが、飛行観測は FDAS によって観測開始位置を確認してから行われ、以後は、FDAS 信号（時刻、航法情報）に対応した画像として取得され、HDD（ハードデスク）に蓄積されるようになっている。観測時刻の設定は、飛行後に HDD データを解析するときに、FDAS 時刻情報と光学観測システムとの時刻情報を対応することによって行われ、同時に取得画像と航法情報（緯度、経度、高度、速度）との対応もなされる。

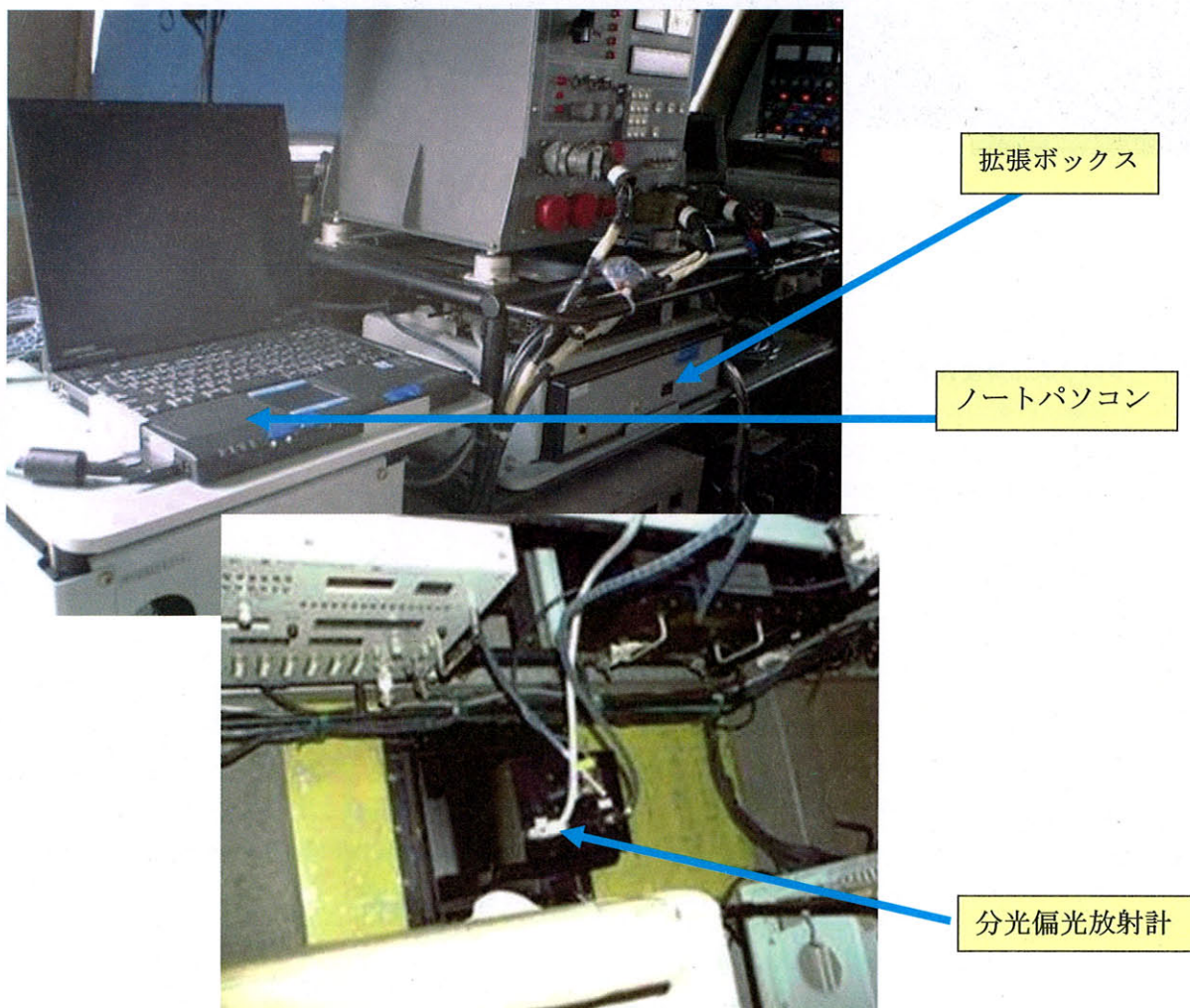


図 25 航空機内に装着された搭載型光学観測システム

#### 7.4 冬季代掻き地区飛行観測

LCTF センサを用いた飛行観測の目標は、前述したように、航空機搭載状態で上空から地表面のスペクトル画像が取得できることの実証であり、これは同時に搭載化の技術実証にもつながるものでもある。したがって、撮像対象は特定する必要はないが、地上評価試験との比較の関連で、また、観測のニーズ対応の関連で、本研究では LCTF センサを用いた地表面観測がなされた地域（含予定）を飛行観測対象にすれば、それらの必要性を満たすことができる。空撮対象としては、地上観測の場合と同様、代掻き田圃の排水による水質汚染が懸念されている湖および周辺河川を選び、これらの地域の水面からの太陽反射光を航空機搭載 LCTF センサで捉えることができたので、その結果をスペクトル画像によって示す。

飛行高度を高くすれば、それだけ広い地上範囲を空撮することができるが、当地区においては、航空管制の関係で

実験用航空機の飛行高度は 10,000ft 以上または 2,000ft 以下に制限されている。前者の高高度での飛行は、当日の天候の関係で実施不可であったので、高度 2,000ft 付近の上空から撮像されたスペクトル画像のみが得られている。この場合、撮像可能な観測地上幅は小さく (297m)、飛行観測による観測対象エリアの連続スペクトル画像のエリアの集合体としての地域画像を求めた例を図 26 に示す。図 26 は偏波面変位角が  $90^\circ$  のとき、すなわち、LCTF センサの偏光面が航空機の進行方向（機軸方向）に平行な状態で撮像された結果である。この連続撮像画像では図 18 の A1 河口付近が撮像されている。

飛行高度等の飛行制限の強い地域における航空機リモートセンシングは対応する制約条件のために十分目的達成に必要なデータ（含画像）が得られないケースに対しては、前述の地上設置型リモートセンシングによる光学観測の結果を飛行試験の結果に適用することが必要になる。

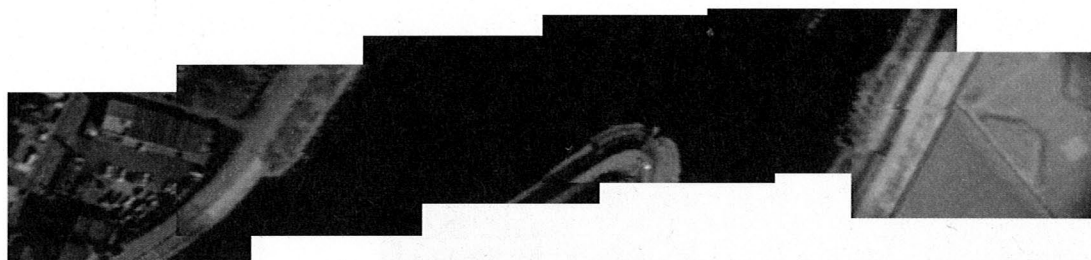


図 26 空撮による湖と河口 A1 周辺の組み合わせスペクトル画像  
(高度 ; 2,000 ft、地上分解能 ; 145 m x 145 m、  
偏光面変位角 =  $90^\circ$  、波長 = 650 nm ~ 700 nm)

#### 7.5 空撮データの 3 次元輝度表示

対象物からの太陽反射光のスペクトル輝度を用いて光学特性を推定する場合、平面的な広がりを持つ対象物からの反射光として、その輝度を観測する必要がある。このような平面的な広がりを持つ対象物のスペクトル輝度を 3 次元座標系 (x, y, z) で表わせば、2 次元 (x, y) でエリアを、残りの 1 次元 (z) でスペクトル輝度値を表し、1 波長ごとに 1 エリアの 2 次元的な輝度分布をみることができる。図 26 の組み合わせ画像内のあるエリアを対象に、波長 680 nm におけるスペクトル輝度を求めると、図 27 のようになる。図中のスペクトル輝度レベルの高い所は陸域部で、スペクトル輝度レベルの低い湖の部分も微細なスペクトル輝度の変化がみられる。これらの結果より、エリア内の位置によってもスペクトル輝度が異なることが示されたので、対象物の特徴抽出（例えば、濁度観測等）の精度向上には、できるだけ広いエリアからの太陽反射光を観測して 3 次元スペクトル輝度特性を求めることが有効であるといえる。

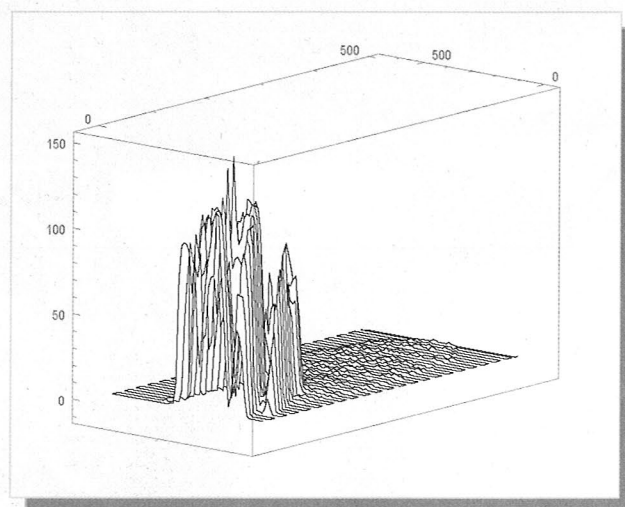


図 27 A1 河口周辺からの太陽反射光の 3 次元的スペクトル輝度  
(偏光面変位角 =  $90^\circ$  )



## 7.6 空撮スペクトル輝度分布

スペクトル画像内のあるエリアにおける輝度の3次元表示方法を前節で述べたが、本節では、個々の画像内（波長は一定）のスペクトル輝度の大きさの分布をカラー画像表示化し、その分布特性から個々の（同一波長で撮像されている）観測領域の波長特性を追求する。すなわち、エリア内の太陽反射光の輝度の大きさをカラー分布図として求め、この分布図から対象物の特徴を示そうとする試みである。このためには、輝度レベルをいくつかの閾値でレベルスライスする方法（レベルスライス法）<sup>39)</sup>で擬似カラー表示することにより、スペクトル輝度の大きさを明確に捉えることができる。図28、29にC1河口付近、B1河

口付近の空撮連続画像の処理の結果（対象地域の組み合わせ画像）を示す。図28、29の個々のスペクトル画像の観測対象および観測波長は異なっているが、輝度分布図はいずれも観測エリアからの太陽反射光を同じスライスレベルで処理した結果である。図28から、波長630nm近傍（620～640nm）において波長特性の特異現象は現れていないことが分かる。図29においては、波長620～640nm（左から3、4、5番目）の三つの画像を目測した場合、各画像の右下方部分で、位置的な色彩の相違が若干見られるが、大部分の領域で波長特性の特異現象は現れていない。これらの飛行観測の結果からも、代掻き排水の河川への影響度はない（濁度50ppm以下）といえる。



C1

飛行観測日時: 2004.1.26 12:20

波長分解能 = 10 (nm)

観測波長 = 620/630/640/650/660/670 /680 (nm)

偏光角度 = 90 (deg)

図28 飛行観測で撮えたスペクトル輝度のレベルスライス分類結果 その1 (C1 河口付近)



B1

飛行観測日時: 2004.2.12 12:20

A1-B1

波長分解能 = 10 (nm)

観測波長 = 600/610/620/630/640/650/660/670 (nm)

図29 飛行観測で撮えたスペクトル輝度のレベルスライス分類結果 その2 (B1 河口付近)

### 7.7 農地飛行観測の試み

LCTF センサによる上空からの飛行観測技術を農業分野に適用する試みとして、筑波地区の実験用農地(小麦畑)の飛行観測を行ったときのスペクトル画像を図 30 に示す。図では、偏波面変位角が  $0^\circ$  における、波長 600 nm、640 nm、680 nm、720 nm の 4 つのスペクトル画像が組み合わされている。飛行試験において、農地の広さは約 10,000

m<sup>2</sup>、飛行高度は 2,450 ft であった。図 30 は、LCTF センサを用いた農業観測の可能性を示しているが、一方で、広範囲の地表面観測が可能になるような(地上分解能が向上するような)工夫、例えば、センサ装着において視野角が広がるような工夫、飛行高度が高く取れるような飛行条件の設定、等今後の飛行試験における要処置事項(アクションアイテム)を明らかにしている。

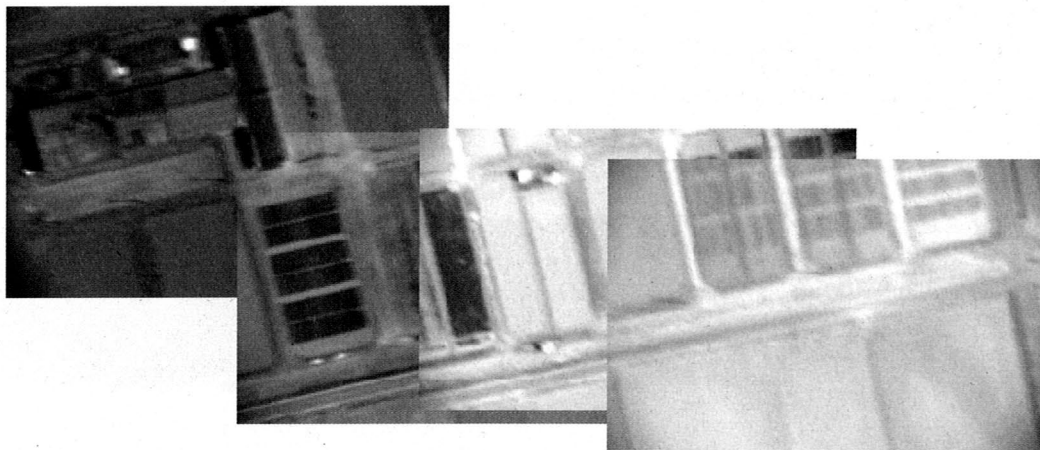


図 30 空撮によって得られた実験用農地の組み合わせ画像  
(面積 100m x 100 m の麦畑、2,450 ft の上空から撮像された  
3 つのスペクトル画像、波長 : 600 、640、680、720 nm の組合せ)

### 7.8 飛行観測評価のまとめ

飛行試験の特長は、上空から広い範囲の地表面、水面が観測できることである。本 LCTF センサを用いた試験では、広範囲な地上を観測して撮像対象物の波長特性(例えば、濁度に反応するスペクトル輝度、第 5 章参照)が現れる地域を見出すこと、そして、冬季代掻き地区の水域が代掻き排水に影響されているか否かを見出すことをターゲットとして、LCTF センサの搭載評価が進められた。その結果、地上実験によって、ある対象物に対して本 LCTF センサが感知する波長特性が明らかになれば、LCTF 透過光の波長をその特性値に設定して飛行観測を行えば、広範囲における地表面観測が可能になり、水質汚濁、植生分布等の解明ができることが明らかとなった。また、LCTF センサを搭載型観測システムとして構築するための手順、航空機で飛行観測する時のパラメータ設定、実環境(real world)としての水質の観測、画像データの取得とその処理方法、農業観測への適用の試み等、航空機リモートセンシングを実施するための基本概念を実証的に示すことができた。さらに、飛行試験データ取得技術、データ解析に

よる特徴抽出技術については、飛行試験を実施しつつ改善を図っていく必要性も明らかになった。今後は本章の記述をベースに実用的な航空機リモートセンシング技術を構築して、地上観測では得られない広域地表面観測を実施し、本 LCTF センサの利用技術の拡大を進めることが必要となる。なお、将来の飛行観測を考慮して、JAXA の実験用航空機ドルニエ Do-228 型機を用いた航空機リモートセンシングの準備も進められている<sup>33)</sup>。図 31 にドルニエ Do-228 型機に装着された光学観測システムを、表 3 にビーチクラフト機とドルニエ機の性能比較を示す。これら表の値は、航空機全集等に示された値であり、搭載重量によって最大運用高度、航続距離等運用時の値は異なる。





図 31 ドルニエ Do-228 に装着された LCTF センサ観測システム

表 3 ビーチクラフト機 65 とドルニエ機 Do-228 の性能比較

主要な諸元及び性能	ビーチクラフト・65	ドルニエ Do228-202
最大離陸重量 (kg)	3,493	6,200
全長 (m)	10.16	16.56
全幅 (m)	13.99	16.97
全高 (m)	4.32	4.86
実用上昇限度* (m)	8,626	9,020
最大巡航速度*(Km/hr)	343	432
最大航続距離*(Km)	1,931	2,704
最大航続時間* (hrs)	7	8.2

\*搭載重量によって異なる



## 8 結 論

### 8.1 成果の概要

可視域 LCTF センサのプロトタイプモデルの試作および野外評価試験<sup>31)</sup>に続いて、航空機搭載を睨んで小型軽量化、装着方法、PC 操作の容易性等を考慮した改良設計を行い、新規に改良型可視域 LCTF センサを製作し、周辺装置、補助装置、駆動ソフトウェア等を付して光学観測システムを構築し、室内、地上、飛行評価試験を通じて、航空機リモートセンシング用として使用に耐えるものであることを示すことができた。また、各評価試験はユーザーニーズを考慮した内容のものであり、地表面観測用光学センサとして開発・実用化に必要な内容を含んでいる。

本研究の成果を示すと次のようになる。

- (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、本 LCTF センサの航空機搭載地表面観測への適用性が示された。
- (2) フィルタ (LCTF) 回転機構の機能装着・動作確認により、本 LCTF センサは機能性能的に透過光の偏波面の変化を可能にする光学センサであることが明らかになった。
- (3) LCTF センサ、PC、制御装置、携帯用発電機、等を用いた地上実験装置の完成、並びに、河川、湖沼を観測対象とした野外実験の結果より、本装置はリモートセンシング用としての機能を有していることが確認された。
- (4) 野外実験により、太陽光を反射する地上対象物のスペクトル画像の特性、観測スポットからの太陽反射光のスペクトル輝度が、透過光の波長 (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) 濁水モデルを用いた野外光学試験の結果、太陽反射光の光学特性 (スペクトル輝度) が濁水濃度変化に対応することが示され、本光学観測システムの水域環境計測への適用性が明らかになった。
- (6) LCTF センサを冬季代掻き地区の水域環境観測に応用した結果、本センサの実環境観測への適用性が明らかになった。同時に、同地区における代掻き排水が近辺の河川の汚濁に影響していないことも明らかになった。
- (7) 飛行試験の結果、本 LCTF センサは、飛行 (動的) 環境下でも使用に耐えるセンサとして航空機リモートセンシングへの適用性を有することが確認された。

以上の (1) ~ (7) を通じて、航空機リモートセンシング技術の構築には、観測センサの設計製作とシステム化 (2, 3 章)、性能評価 (4 章)、基準データによるセンサ出力のキャリブレーション化 (5 章)、地上リモートセンシング (ground-based remote sensing) による実環境評価 (6 章)、搭載化技術の確立と搭載評価 (7 章) を進める必要性が示された。

これらの成果をベースに航空機リモートセンシング用へ製品化していくためには、LCTF センサ本体及び周辺装置 (制御装置、PC) の機能性能の向上とならんで、重量、形状、消費電力、配線を考慮した設計技術、関連ソフトウェアの整備 (信頼性、ロバスト性)、空撮対象に適合する飛行試験技術の確立を図ることが要求される。また、開発製品化をにらんで部品調達方法、試験検査技術、信頼性技術、保守点検技術の確立、向上を図ることも必要になる。

### 8.2 ニーズ対応

本研究の実施過程で、LCTF センサの利用がいろいろと注目され、本 LCTF センサの出力 (分光偏光特性) は地表面対象物の特徴推定に有用になりうるであろうとのユーザーニーズに基づいて野外観測、飛行観測のデータが取得されてきている。

代掻き田圃の排水の河川、湖沼への影響度 (水の濁度) の地上、飛行観測は、農環研 (NIAES) が進めている採水分析作業 (水の濁度観測) に本 LCTF センサのデータが補助的役割を果たしているとの評価を受けている。事実、LCTF センサによる代掻き排水の水質汚濁の地上、飛行観測結果の数値 (50ppm 以下) は、農環研の採水分析の結果とほぼ一致しており (農環研、法人プロ報告会、2005 年 3 月 10 日)、2005 年度以降においても光学観測継続への期待が寄せられている。

東京湾の赤潮観測、大海での魚群観測にも有用になりうるとの期待を漁業情報サービスセンター (JAFIC) から受けており、これらに関する地上観測、飛行観測が注目課題となりつつある。地表面 (地面、水面) の表面条件の抽出の一助に有用な LCTF センサとして、各種ユーザーから期待が寄せられているので、製品化技術の確立は緊急課題となっている。なお、赤潮対策の一環として、JAFIC と共同で、東京湾赤潮発生予想水域における水面からの太陽反射光の光学特性の観測にも本 LCTF センサが用いられている。

本 LCTF センサは地表面対象物からの太陽反射光の分光偏光特性を捉えることができ、既存の特徴測定技術の補助的手段として有用視されている。今後そのような分光偏光特性から被反射対象物の特徴抽出技術 (データ解析ソフトウェア) が開発されれば、現用の計測技術 (例えば、水

質濁度の採水分析技術) から得られる結果との併用でより広範囲で精度の高い特徴抽出が可能になる。したがって、ユーザーからみても、本 LCTF センサの観測技術を補助的手段として利用するだけでなく、データ解析技術の新規研究開発による特徴抽出の可能性が必要とされている。これは、同時に各ユーザーが目標とする特徴抽出に即して本 LCTF センサの出力を利用するための研究分野を切り開くことにもつながるものである。

### 8.3 JAXA における将来の位置づけ

本研究は、旧 NAL 時代からのセンサ技術の研究の一環として継続されてきたものであるが、環境問題対応という時代的かつ世界的な要請に対して、JAXA が有する航空宇宙技術が果たすことのできる役割の一つとして位置づけられる分野である。したがって、宇宙機/航空機利用地球観測センサとして開発・実用化が進められれば、JAXA としては環境問題に十分な使命を果たすことになるが、その前提として航空機リモートセンシングへの適用化研究を進めて、上空からの地表面観測技術を確立し、ユーザーニーズに対応した成果を示すことが必要になる。つまり、将来の位置付けは、地球観測に対応する外部ニーズに対応しつつ、まず、(1) 当 LCTF センサ搭載航空機観測の利用拡大を進めること、次に、(2) 宇宙機搭載型への開発・実用化を図ることにあるといえる。

### 8.4 ユーザーニーズからみた開発・実用化への必要性

研究試作品としての本 LCTF センサをユーザーニーズに対応しつつ開発・実用化していくためには、各ユーザーの用途を把握することが必要であり、使用波長帯域(可視)、偏光面変位角の使用域、変位幅は被観測対象によって決まるものであり、また、操作性、データ取得スピード(LCTF 透過波長 sweep 速度等)等も考慮する必要がある。現在の機能、性能からみて、関心を寄せているユーザーの使用目的および開発・実用化の必要性はつぎのようになる。

#### a) 農業環境観測への適用

代掻き排水の河川汚濁への影響度の観測を JAXA/NIAES 共同で行い所望の成果が得られたことで、JAXA の LCTF センサの有用性が注目されている。すなわち、JAXA 航空機による広領域光学観測の結果が NIAES の採水分析結果と同様の結論を下すことができたことで、水域に限らず、農作物等地表面対象物の特徴を多方面から異なった手法で観測・推定すれば、推定精度の向上が達成されることに期待が寄せられている。今後も引き続き飛行観測が可能ならば農業技術のより一層の進展に有用になり得ることは有意義である。地表面観測の観点から、航空宇宙

技術が農業分野に適用できるようになって行くことは、LCTF センサが、学術面、実用面を問わず、将来の農業技術の研究に対してのみならず、航空宇宙技術そのものに対しても、広い視野からの研究を推進するのに有用となるので、各関係機関は JAXA と共同で研究ができることを望んでいる。

#### b) 漁業環境観測への適用

赤潮観測では、長期にわたる観測で赤潮発生の時間的なメカニズムを捉え、予測を可能にすることが最重要事項である。予測ができれば、赤潮被害防止対策の手段、手法の研究開発を進めることができるので、継続して観測を進めることにより、甚大な漁業被害の低減化への道がひらけるものとして、漁業情報サービスセンター(JAFIC)、地方の水産試験場、等から海水観測への適用センサとして期待が寄せられている。

本研究は、平成 14、15、16 年度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)によって進められたものであり、今後は、本成果をベースに民間への技術移転をおこない、開発・実用化を展開していくつもりである。また、第 5、6、7 章に示されている、濁水モデル実験、野外観測、飛行観測は、農業環境技術研究所(NIAES)との共同研究によって進められており、関連して、愛知県農業総合試験場(AARC)、畜産草地研究所(NILGS)、漁業情報サービスセンター(JAFIC)からの協力をいただいている。

## 参考文献

- 1) H. Shimada, "ADEOS2 and NASDA future programs", Proceedings of SPIE, Vol.5234, pp.1-10, Barcelona, Sept. 2003
- 2) J. E. Leible and J. A. Kronenwetter, "NPP :NASA's Continuity Mission for Earth Observation", Proceedings of SPIE, Vol. 4881, pp.86-94, Agia Pelagia, Crete, 2002
- 3) N. Oppelt and W. Mauser, "Hyperspectral Remote Sensing for the Monitoring of Plant Parameters of Maize", Proceedings of SPIE, Vol. 4879, pp.13-24, Agia Pelagia Crete, 2002
- 4) M. Raz, A. Karnieli and D. Bonfil, "Characterization of Wheat Growth Conditions by Visible and NIR Reflectance", Proceedings of SPIE, Vol. 4879, pp.400-409, Agia Pelagis Crete, 2002
- 5) S. H. Shakir and M. D. Rethwisch, "Characteristics of AVIRIS Bands Measurements in Agricultural Crops At Blythe Area, California, Proceedings of SPIE, Vol. 4879, pp.25-41, Agia Pelagia, Crete, 2002"
- 6) 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
- 7) 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
- 8) V. Tchernykh, S. Dyblenko, K. Janschek, K. Seifart and B. Harnisch, "Airborne test results for a smart pushbroom imaging system with optoelectronic image correction", Proceedings of SPIE, Vol. 4234, pp.550-559, Barcelona, Sept. 2003
- 9) 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
- 10) 加藤淳子, 上原由子, 谷本俊明, "人工衛星データを用いた荒廃水田の判別", 日本リモートセンシング学会誌, 第23巻, 第5号, pp.550-554, 2003年12月
- 11) 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.
- 12) 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
- 13) Y. Zur, O. Braun, D. Stavitsky and A. Blasberger, "A potential Hyper-Spectral remote sensing imager for water quality measurements", Proceedings of SPIE, Vol. 4881, pp.709-714, Agia Pelagia, Crete, 2002
- 14) 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
- 15) 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
- 16) H. Yoshioka, T. Miura and H. Yamamoto, "Relationships of Spectral Vegetation Indices for Continuity and Compatibility of Satellite Data Products", Proceedings of SPIE, Vol.5655, pp. 233-240, Honolulu Hawaii, Nov. 2004
- 17) K. Lawrence, B. Park, W. Windham, C. Mao and G. Poole, "Reflectance calibration of focal plane array hyperspectral imaging system for agricultural and food safety applications", Proceedings of SPIE, Vol. 4879, pp.362-372, Agia Pelagia, Crete, 2002
- 18) 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
- 19) F. Zhang, F. Yang and Y. Wan, "Study on the Application of Hyperspectral Remote Sensing in Plant Classification", Proceedings of SPIE, Vol. 4879, pp.297-310, Agia Pelagia, Crete, 2002
- 20) B. Park, K. C. Lawrence, W. R. Windham and D. P. Smith, "Assessment of hyperspectral imaging system for poultry safety inspection", Proceedings of SPIE, Vol. 4879, pp.269-279, Agia Pelagia, Crete, 2002



- 21) N. Gupta, “Remote sensing using hyperspectral and polarization images”, Proceedings of SPIE, Vol. 4574, pp.159-166, Newton USA, Oct. - Nov.2001
- 22) A. Mueller, R. Richter, M. Habermeyer, H. Mehl, S. Dech, H. Kaufmann, K. Segl, P. Strobl, P. Haschberger, R. Bamler, “ARES- A New Reflective / Emissive Imaging Spectrometer for Terrestrial Applications”, Proceedings of SPIE, Vol. 4881 pp.159-166, Agia Pelagia, Crete, Sept. 2002
- 23) B. Crowther, V. Zakharenkov, G. Jensen, V. Sinelshchikov, et.al., “Sensor design and capabilities for the Russian American Observation Satellites (RAMOS)”, Proceedings of SPIE, Vol. 5234, pp.96-105, Barcelona, Sept. 2003
- 24) 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
- 25) 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
- 26) 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. 4881, pp.503-510, Agia Pelagia, Crete, Sept. 2002
- 27) 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. 4881, pp.575-583, Agia Pelagia, Crete, Sept. 2002
- 28) H. Shingu, K. Homma, H. Kurosaki, T. Suzuki and H. Yamamoto, “Field observation of surface conditions using LCTF spectropolarimeter”, Proceedings of SPIE, Vol. 5017, pp. 116–127, Santa Clara, Jan. 2003
- 29) K. Homma, H. Shingu, H. Yamamoto, H. And Kurosaki, “Outdoor experiments of LCTF spectropolarimeter for Earth observation”, Proceedings of SPIE, Vol. 5234, pp. 628–637, Barcelona, Sept. 2003
- 30) K. Homma, H. Shingu, H. Yamamoto, H. Kurosaki, and M. Shibayama, “Application of an imaging spectropolarimeter to agro-environmental sciences”, Proceedings of SPIE, Vol. 5234, pp. 638–647, Barcelona, Sept. 2003
- 31) 新宮博公, 本間幸造, 山本浩通, 黒崎裕久, 鈴木孝雄, “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”, 宇宙航空研究開発機構研究開発資料, JAXA-RM-03-003, 2004 年 3 月
- 32) K. Homma, M. Shibayama, H. Yamamoto, K. Sugahara and H. Shingu, “Water pollution monitoring using a hyperspectral imaging spectropolarimeter”, Proceedings of SPIE, Vol. 5655, pp. 419–428, Honolulu, Nov. 2004
- 33) K. Homma, H. Shingu, H. Yamamoto, M. Shibayama and K. Sugahara, “Flight evaluation of hyperspectral and multi-polarizable imaging spectropolarimeter”, Proceedings of SPIE, Vol. 5655, pp. 445–453, Honolulu, Nov. 2004
- 34) 鶴田匡夫, “応用光学Ⅱ”, pp194-197, 培風館, 1995 年 10 月
- 35) 新宮博公, 本間幸造, 黒崎裕久, 鈴木孝雄, “液晶光学計測装置及びそれを用いた光学計測測定システム”, 2004 年 11 月 12 日, 特許第 3613578 号
- 36) Cambridge Research and Instrumentation, Inc., “Varispec Tunable Filter User’s Manual”, 2001
- 37) 本間幸造, 新宮博公, 山本浩通, “LCTF と CCD の交換が可能な液晶光学計測装置”, 平成 16 年 3 月 31 日, 特願 2004-106945
- 38) 本間幸造, 山本浩通, 新宮博公, 那須彰一, 及川徹也, “放射計, 放射計制御装置, 計測システム, 放射計制御方法および放射計制御プログラム”, 平成 16 年 11 月 2 日, 特願 2004-319665
- 39) 高木幹雄, 下田陽久, “画像解析ハンドブック”, pp.665, 東京大学出版会, 1993 年
- 40) K. Homma, H. Shingu, H. Yamamoto, M. Shibayama, K. Sugahara and S. Itano, “Agro-environment observation using near-infrared LCTF spectropolarimeter”, Proceedings of SPIE, Vol. 5655, pp. 407–418, Honolulu, Nov. 2004

## 付録 近赤外域 LCTF 分光偏光放射計 による野外観測

本文では、可視域分光偏光放射計の試作結果ならびに評価試験の結果を述べたが、フィルタを可視 LCTF から近赤外 LCTF に交換すれば、近赤外域分光偏光放射計として機能させることができる。本文図 3 に示される可視域分光偏光放射計において、LCTF のみを近赤外域 (650~1100nm) のものと取り替えて、近赤外域分光偏光放射計を構成し、これを用いた光学観測システムを構成し、野外観測に供した結果を以下に述べる。この光学観測システムの構成においても、本文と同様な関連周辺装置が用いられている。

野外実験では、まず、JAXA 近辺の河川 (野川) を対象に、川べり、植物、水面からの太陽反射光のスペクトル特性、スペクトル画像を取得し、光学センサとして野外実験に耐えるものであることを確認する。次に、農業観測への適用化を確認するために、試験用農場における農作物観測例、牧場における牧草、動物 (牛)、等の観測例を示す。また、田圃の代掻き排水による河川、湖沼の汚濁度の観測に可視・近赤外両分光偏光放射計が有用になりうることを示す<sup>40)</sup>。

### A.1 野外予備実験

新規試作の近赤外域分光偏光放射計の実環境 (real world) への適用可能性を試すために、当機構近辺の野川を観測対象として行われた実験の結果を示す。野川の川岸に設置した光学観測システム (近赤外光学センサ、PC、制御ユニット、電源で構成) を付図 1 に、撮像水面の画像を付図 2 に示す。付図 2 の番号 1、2、3、4 におけるスペクトル輝度を偏波面変位角  $0^\circ$ 、 $90^\circ$  に分けて付図 3、4 に示す。また、有効波長域 (650~1100nm) におけるスペクトル画像のうち比較的鮮明なものを付図 5 に示す。付図 3、4 より、異なる点からの太陽反射光はそれぞれに異なるスペクトル特性を有すること、また、その特性は偏波面変位角によっても変わることが分かる。付図 5 は、画像取得の可能性とともに、観測偏波面を選択するための LCTF 回転機構が実環境でも有効に動作していることを示している。これらの結果は、近赤外域分光偏光放射計光学観測システムは、実環境でも使用に耐えるものといえる。

### A.2 農作物分類機能の評価

葉野菜 (ハヤサイ) 畑の観測データから位置による光学特性の違いを求めた結果及び実野菜 (ミヤサイ) 畑の観測データから構成要素 (葉、茎、実) による光学特性の違いを求めた結果を示す。

### A.2.1 葉野菜畑の観測

農環研の実験用農場において、小松菜畑を観測対象として、近赤外域 LCTF 分光偏光放射計によってスペクトル画像を求め、かつ、スペクトル輝度を算出した結果を示す。付図 6 に小松菜畑全体のスペクトル画像 (波長: 650nm、偏波面変位角:  $0^\circ$ ) を示す。図の 1、2 とあるのはそれぞれ畑の中央部 (日当りのよい場所)、端部 (日当たりの悪い場所) であり、この 2 箇所のスペクトル輝度を偏波面変位角別に示すと付図 7~10 のようになる<sup>40)</sup>。また、畑全体のスペクトル画像を偏波面変位角別に示すと付図 11 のようになる。付図 7~10 は、スペクトル輝度が観測対象 (1、2) によって、また、波長、偏波面変位角によって変化することを示しているが、800~1000nm の波長域においては波長特性が顕著でないことも分かる。これは、付図 11 において、700nm、800nm のスペクトル画像の違いはみられるが、800nm、900nm のスペクトル画像の違いが顕著でないことと関連していると考えられる。付図 11 においても、偏波面変位角の違いによる画像の違いは示されている。以上のことから、当近赤外域 LCTF 分光偏光放射計は野菜畑の観測に十分耐えるものであること、そして、観測データの解析によって生育状況の特徴抽出も可能になり得ることが分かる。

### A.2.2 実野菜畑の観測

個人菜園で栽培されている胡瓜を例にとり、胡瓜の実、葉、茎からの太陽反射光の特性を近赤外域 LCTF 分光偏光放射計で計測した結果について述べる<sup>30)</sup>。付図 12 に栽培状態の胡瓜のスペクトル画像 (偏波面変位角  $=0^\circ$ 、波長  $=690\text{nm}$ ) を示す。図の番号 1、2、3 はそれぞれ実、葉、茎である。偏波面変位角  $=0^\circ$  における 1、2、3 の相対スペクトル輝度は付図 13 のようになる。また、付図 12 の画像の偏波面変位角、波長別の特徴を示せば付図 14 のようになる。付図 14 のスペクトル特性において、1、2、3 の相違は顕著に現れていないが、これは反射対象点とともに同じ色 (緑) をしているためと考えられる。付図 14 の画像は、スペクトル反射率の違いによる画像の違いは顕著であるが、一方、偏波面変位角による相違は顕著ではない。付図 13、14 の特性から、対象物が同じ種類の植物でかつ同じ色である場合には、それらの対象物からの太陽反射光の特性が顕著でないこと、及び、これらの特性の違いを分類するには特性解析の性能向上が必要になることがいえる。

### A.2.3 農作物観測からみた光学センサの アクションアイテム

近赤外域 LCTF 分光偏光放射計で農作物からの太陽反

射光を計測して、センサ出力を解析して、農作物の分類がなされるので、近赤外域 LCTF 分光偏光放射計自体も分類に即応できる機能性能を有することが要求される。前記の 2 実験からして、農作物の種類、構成要素（葉、茎、等）による波長特性の違いをあらかじめ設定しておいて、その箇所、種類の波長域において偏波面変位角特性を詳細に求めるような工夫が利用技術として必要になる。同時に、使用目的に応じてそのような必要性を満たすようなセンサの設計製作も要求される。

### A.3 牧場観測

畜産草地研究所（栃木県西那須郡那須野町千本松 768）の実験用牧場において、近赤外域 LCTF 分光偏光放射計を用いて牧場観測を行い、牧場内の家畜（牛）、フェンス、牧草からの太陽反射光のスペクトル輝度、牛とともに種々の草類、木々で構成される牧場のスペクトル画像を取得した結果を示す<sup>40)</sup>。付図 15 は牧場内の観測対象領域のスペクトル画像（偏波面変位角 $=0^\circ$ 、波長 $=780\text{nm}$ 、図内の番号 1、2、3 はそれぞれ牛、フェンス、草）を示している。これらのスポット 1、2、3 からの太陽反射光を近赤外域 LCTF 分光偏光放射計で計測し、CCD 出力から求めた相対スペクトル輝度を付図 16、17 に示す。また、偏波面変位角 $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $135^\circ$  における観測対象領域のスペクトル画像は付図 18 のようになる。付図 16、17 を比較して分かるように、観測対象によるスペクトル輝度の違い、偏波面変位角によるスペクトル輝度の違いが現れている。また、付図 18 には、波長、偏波面変位角による画像の違いが顕著に現れている。これらのことより、当近赤外域 LCTF 分光偏光放射計は牧場観測にも適用可能であるといえる。特に、偏波面変位角 $0^\circ$  で牛からの太陽反射光の輝度特性が顕著になる波長帯があることからして、牧場内の動植物の識別への適用性が示されている。

### A.4 水質濁度観測の試み

本文では、可視域分光偏光放射計による濁水観測の結果について述べたが、ここでは、上記のように簡略製作（LCTF の交換のみ）の近赤外域 LCTF 放射計を用いた濁水観測の結果を示す。濁水作成のときの土は、本文の例と同じく、代掻きが行われている地区の田圃の土壌を用いることにする。このような田圃の土壌サンプルを用いた濁水モデルを構築し、濁水に含まれる土壌成分の沈殿具合と濁水表面からの太陽反射光の相対スペクトル輝度との関係を示す<sup>40)</sup>。

付図 19 に示すように L70xW40xH10cm の黄色のプラスチック容器 3 台に、代掻き土壌のサンプル及び水を入れ、代掻き濁水状態のモデルを構築し、高濃度、低濃度 2 種類濁

水沈殿促進薬（KCl）をそれぞれ容器（1）、（3）に入れ、容器（2）はそのままにし、3 種類の濁水状態からの太陽反射光のスペクトル輝度を近赤外域 LCTF 分光偏光放射計で観測した結果について述べる。ここで、容器（2）は通常の代掻き後の濁水状態であり、これを用いた結果を標準とする。偏波面変位角 $90^\circ$  における実験結果の例を付図 20、21 に示すが、これらの比較から次のことがいえる。

- ・付図 20No.1 においては、汚濁物質が全て沈殿した状態で、スペクトル輝度レベルは全スペクトルに亘って大きくなっている。
- ・付図 21No.3 においては、汚濁物質の沈殿が十分でないため、波長 $825\text{nm}$ 以下（可視域）と波長 $1,025\text{nm}$ 以上（近赤外域）では汚濁物質の水中濃度が高い方が輝度レベルが高く、 $825\sim 1,025\text{nm}$ （近赤外域）では逆に水中濃度が低い方が輝度レベルが高く観測された。
- ・原理的には、水中濃度に比例して乱反射が大きくなり、汚濁物質の反射波長域を除いたスペクトル輝度レベルは低くなることが予想される。また、汚濁物質が全て沈殿し底に堆積すると、水中乱反射がなくなり、太陽反射光が強くなり、スペクトル輝度レベルは全スペクトルに亘って大きくなる。
- ・付図 20 をみると、スペクトル輝度レベルが $640\text{nm}\sim 1100\text{nm}$ の全スペクトルに亘って大きく、汚濁物質による乱反射が少なく、太陽光の水中反射特性が強く反映しているとみられ、沈殿が完了した状態は識別可能であると言える。
- ・付図 21 からは、汚濁状態と沈殿途上の状態の差は明確ではない。即ち沈殿の量的な大小の比較は困難である。その原因は、下記の諸点が考えられる：
- ・低濃度沈殿促進薬の不適切性、もしくは汚濁基準状態の変遷
- ・スペクトル特性取得データ間の差違：位置、サンプリングの大きさ  
水面に漂うゴミの状態の相違
- ・今回の汚濁物質が土（反射波長域 $=580\text{nm}\sim 645\text{nm}$ ：黄土色）であり、使用放射計の観測波長帯域が $650\text{nm}\sim 1100\text{nm}$ であり、汚濁物質の反射特性を捉えていない。従って、底に堆積した堆積汚濁物質からの反射特性や水中汚濁物質の量的な状態を捉えるには、可視放射計による観測が必要になる。
- ・結論的に言えることは、汚濁の有無は識別可能である。また、高濃度／低濃度の沈殿促進薬の濃度の量的効果の観測に関しては、より厳密な実験を必要とする。

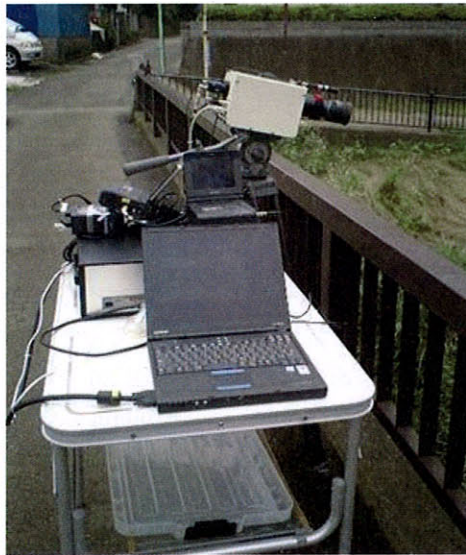
### A.5 近赤外域分光偏光放射計野外観測のまとめ

付録では、近赤外域 LCTF 分光偏光放射計が地表面か



らの太陽反射光の計測に有用か否かを明らかにするために行われた地上観測の結果を示したが、川辺、農地、牧場、農業用水路、田圃（濁水モデル）のいずれを観測対象にしても画像データ取得機能が確認されているし、また、スペクトル輝度、偏光面変位角も被反射対象点に対応した特性が示されている。これによって、本近赤外域 LCTF 分光偏光放射計は実環境（real world）での使用に耐えるものであるといえる。すなわち、近赤外域 LCTF 分光偏光放射計の野外（実環境）評価のために、センサ自体は、可視域のものと LCTF を交換するだけの簡略仕立ての製作であったが、十分実用に耐えるものであることが実験的に明

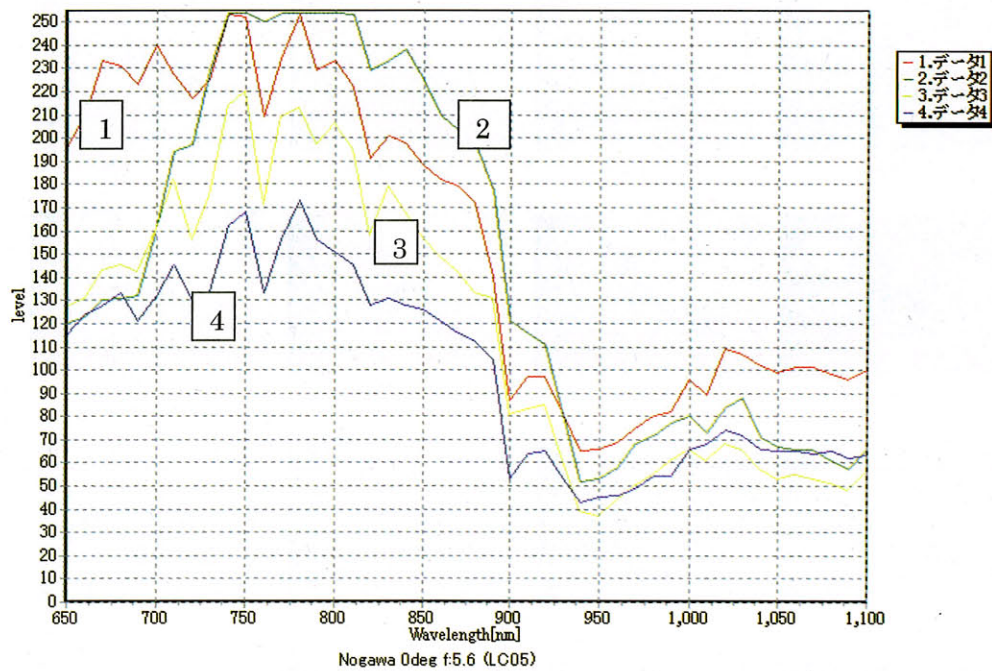
らかになったので、今後は詳細な設計仕様に基づいて実用タイプのものを製作することが可能になる。また、上記各野外観測における観測システムの稼動が PC 操作によってなされたことからして、搭載工事等を施して搭載化を進めれば、航空機搭載リモートセンシング用光学センサとして十分機能するといえる。なお、上述の野外観測におけるユーザー側の見解に関して云えば、農作物観測では農環研が進めている農作物生育状況観測（地上光学観測）を補佐する手段として、牧草地観測では、畜産研が進めている牧草種類別生育状況把握の一助として、それぞれ本近赤外域 LCTF 分光偏光放射計の出力データが注目されている。



付図1 野川周辺光学観測における実験装置



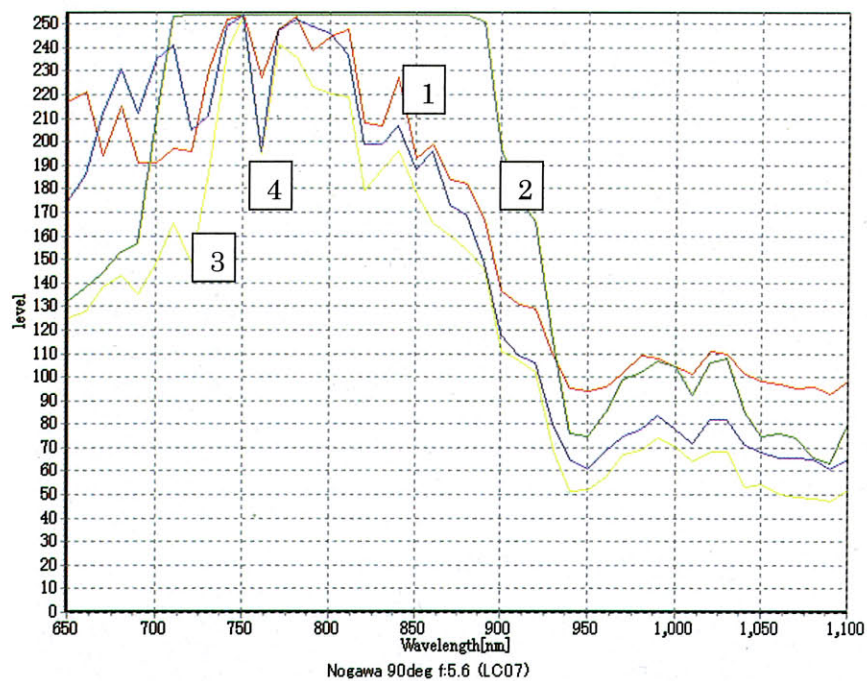
付図2 近赤外域 LCTF 分光偏光放射計を用いた野川観測エリア



(偏波面変位角=0°)

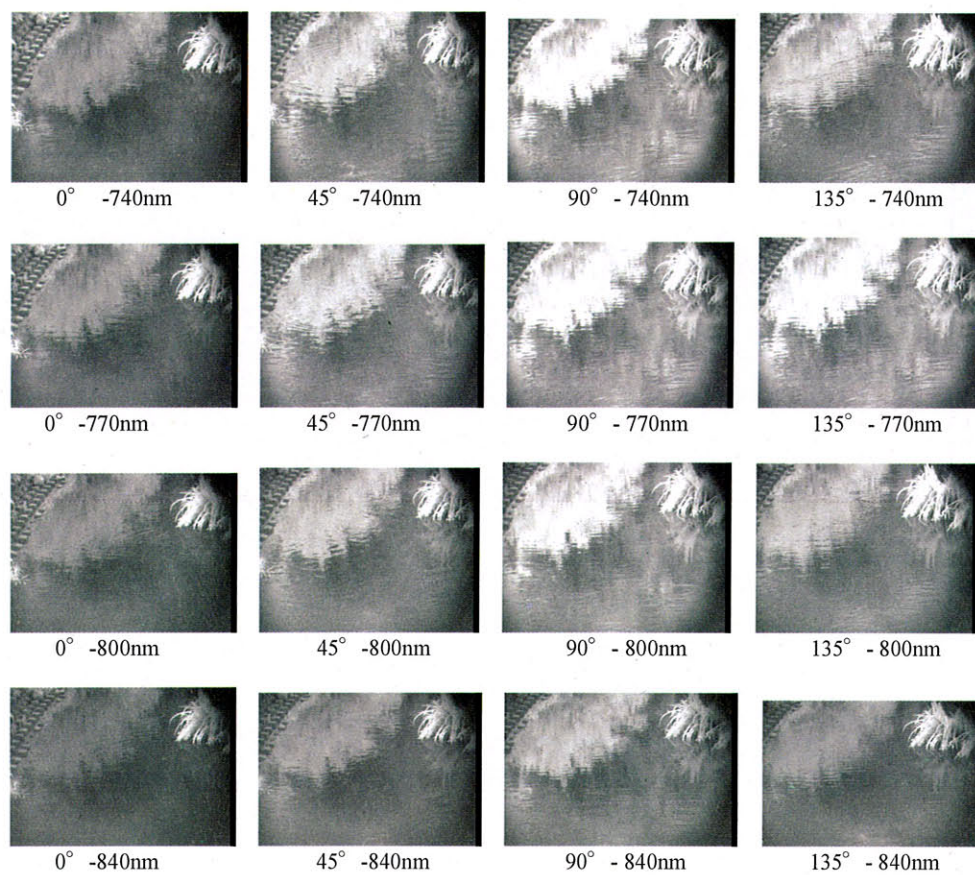
付図3 観測エリアからの太陽反射光の輝度スペクトルその1





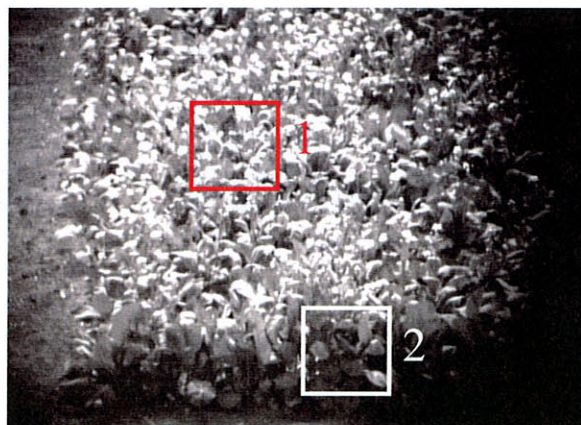
(偏波面変位角=90°)

付図4 観測エリアからの太陽反射光の輝度スペクトルその2



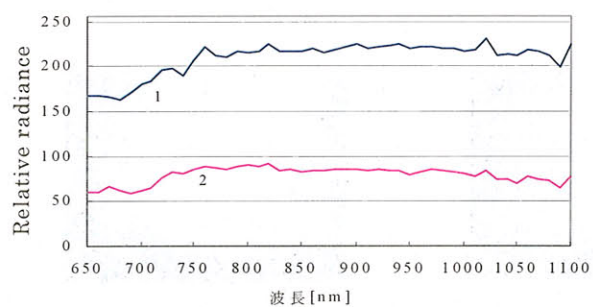
付図5 近赤外域 LCTF 放射計出力から得られたスペクトル画像



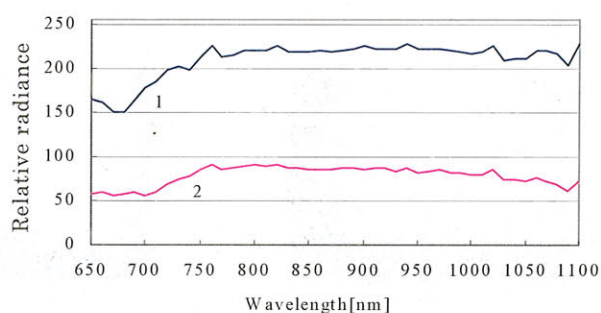


( 偏波面変位面角 = 0 deg、波長 = 650 nm )

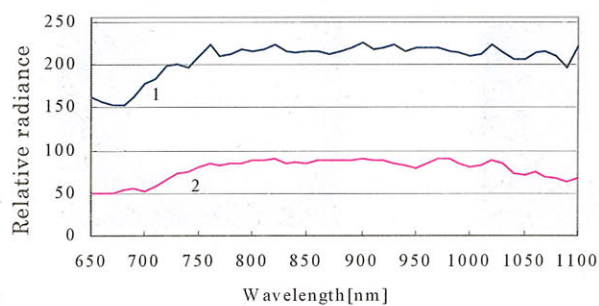
付図6 農園観測における撮像対象エリア



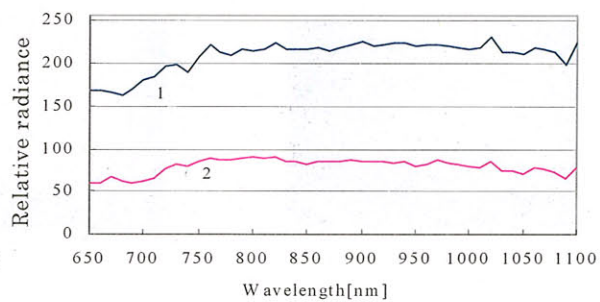
付図7 観測対象 1, 2 からの太陽反射光のスペクトル輝度その 1 (偏波面角 = 0°)



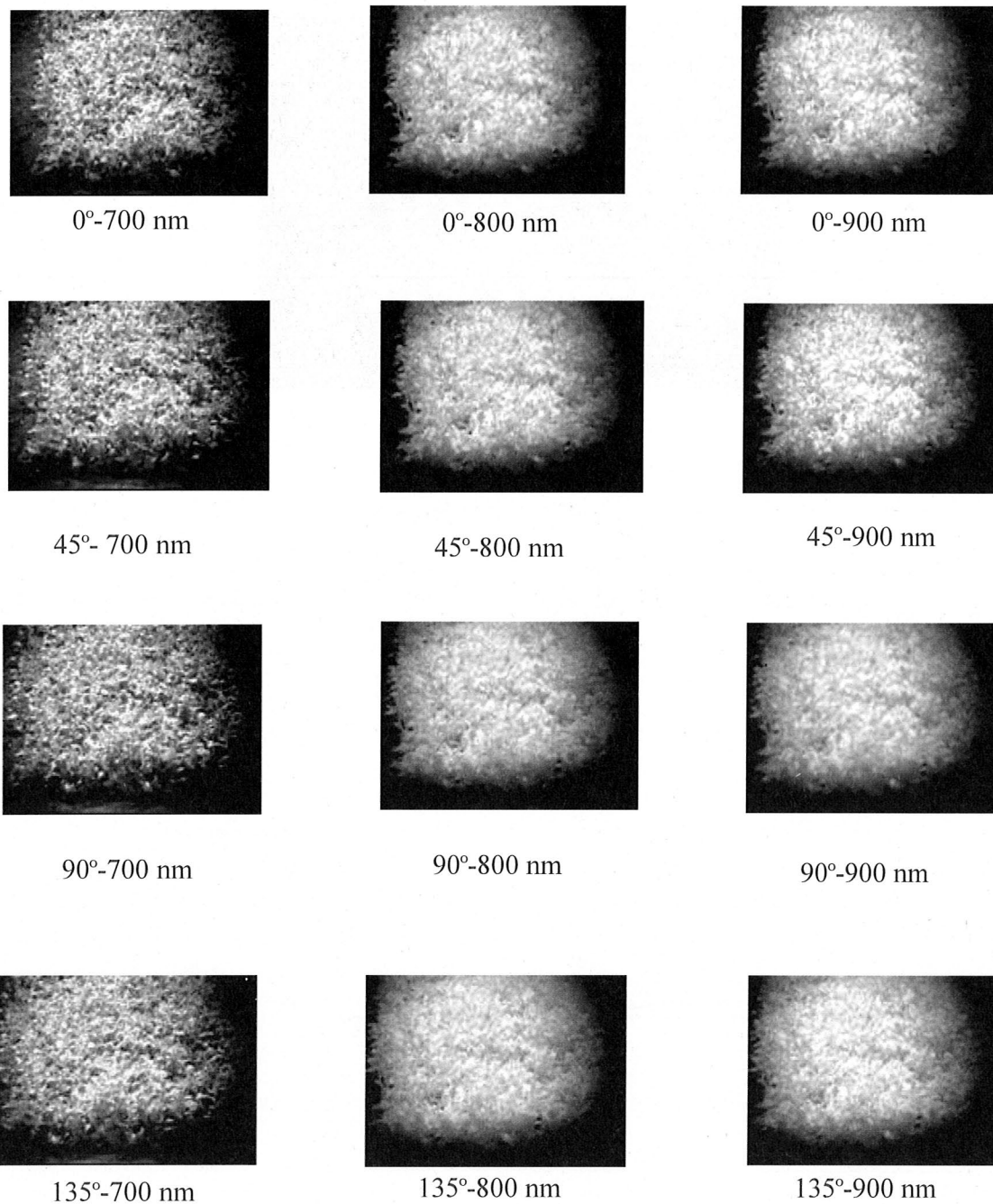
付図8 観測対象 1, 2 からの太陽反射のスペクトル輝度その 2 (偏波面角 = 45°)



付図9 観測対象 1, 2 からの太陽反射光のスペクトル輝度その 3 (偏波面角 = 90°)



付図10 観測対象 1, 2 からの太陽反射光のスペクトル輝度その 4 (偏波面角 = 135°)

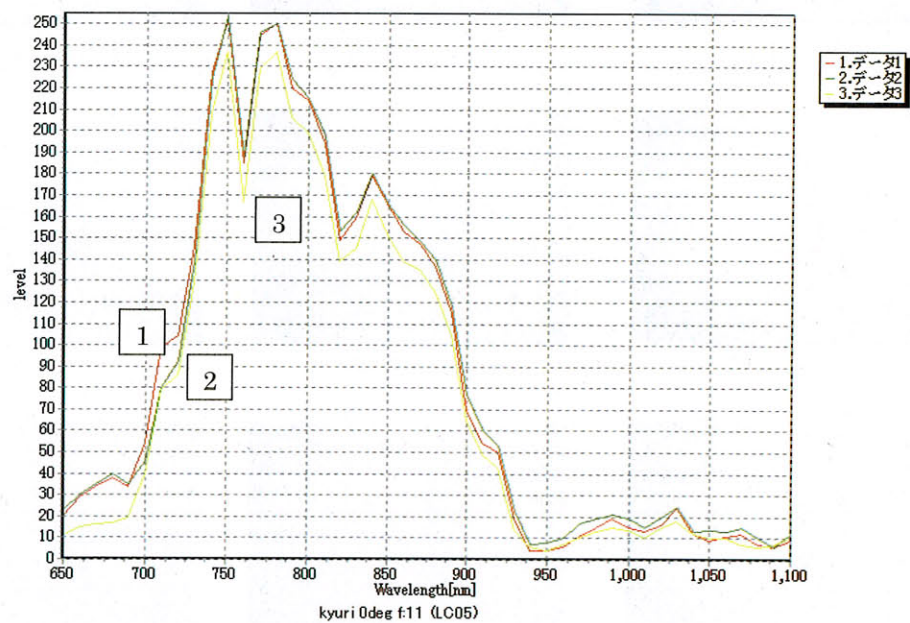


付図 11 農場観測で得られた小松菜畑のスペクトル画像



(偏波面変位角 = 0 deg、波長= 690 nm )

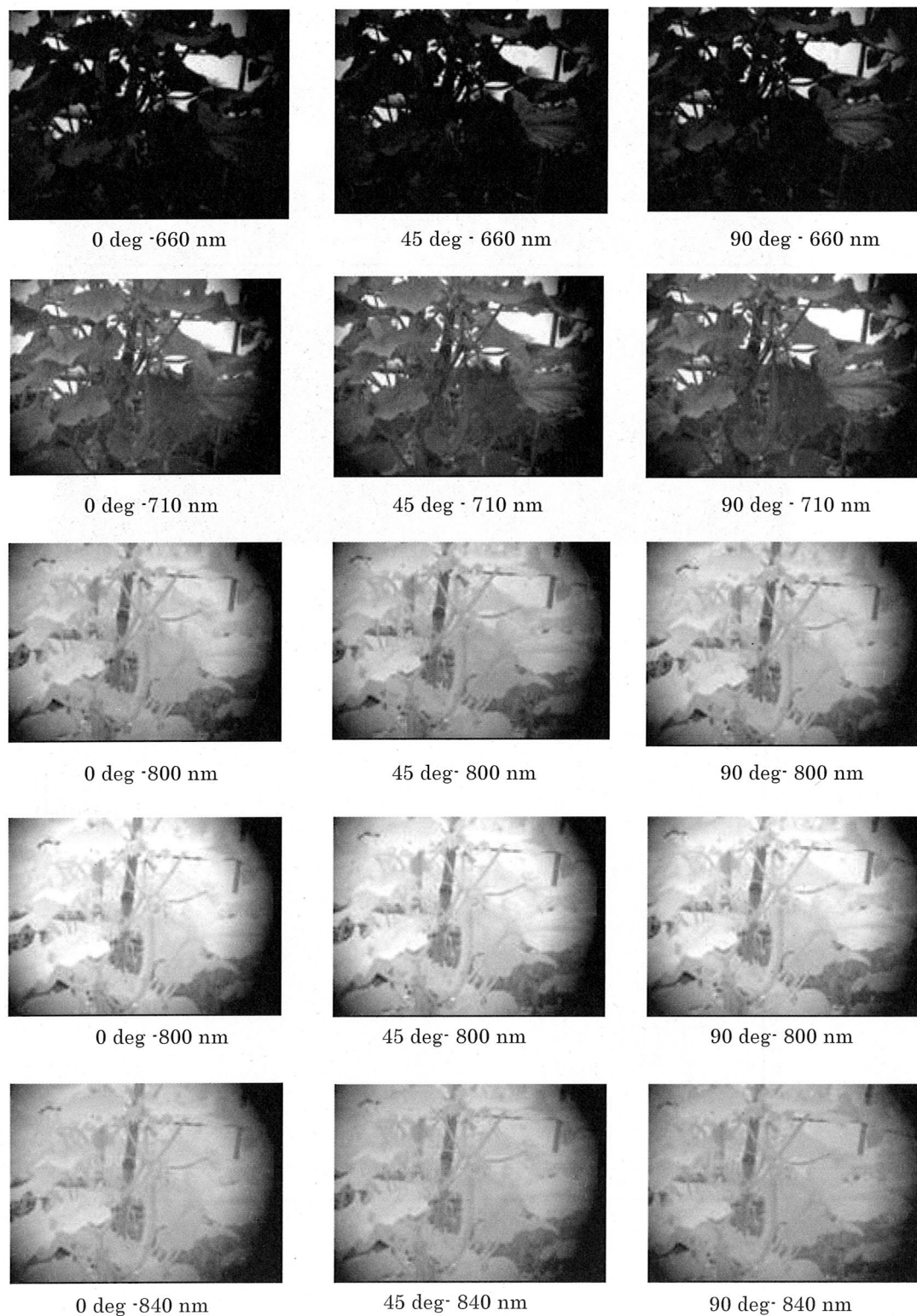
付図 12 胡瓜畑の観測対象



(偏波面変位角=0 deg )

付図 13 観測対象点からの太陽反射光のスペクトル輝度

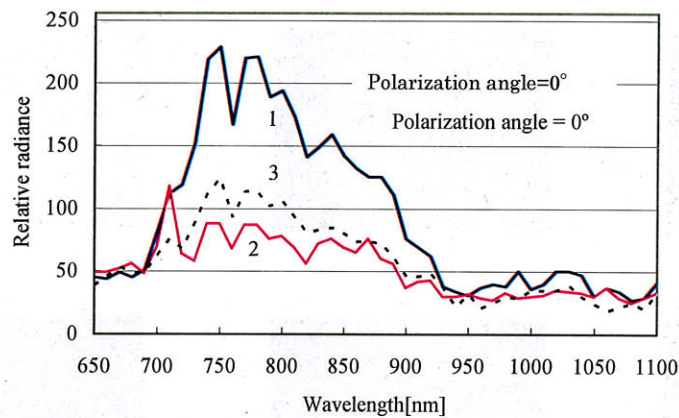




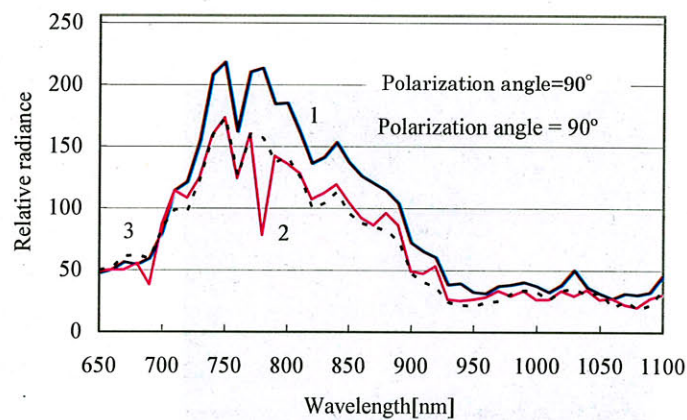
付図 14 観測対象（胡瓜）のスペクトル画像



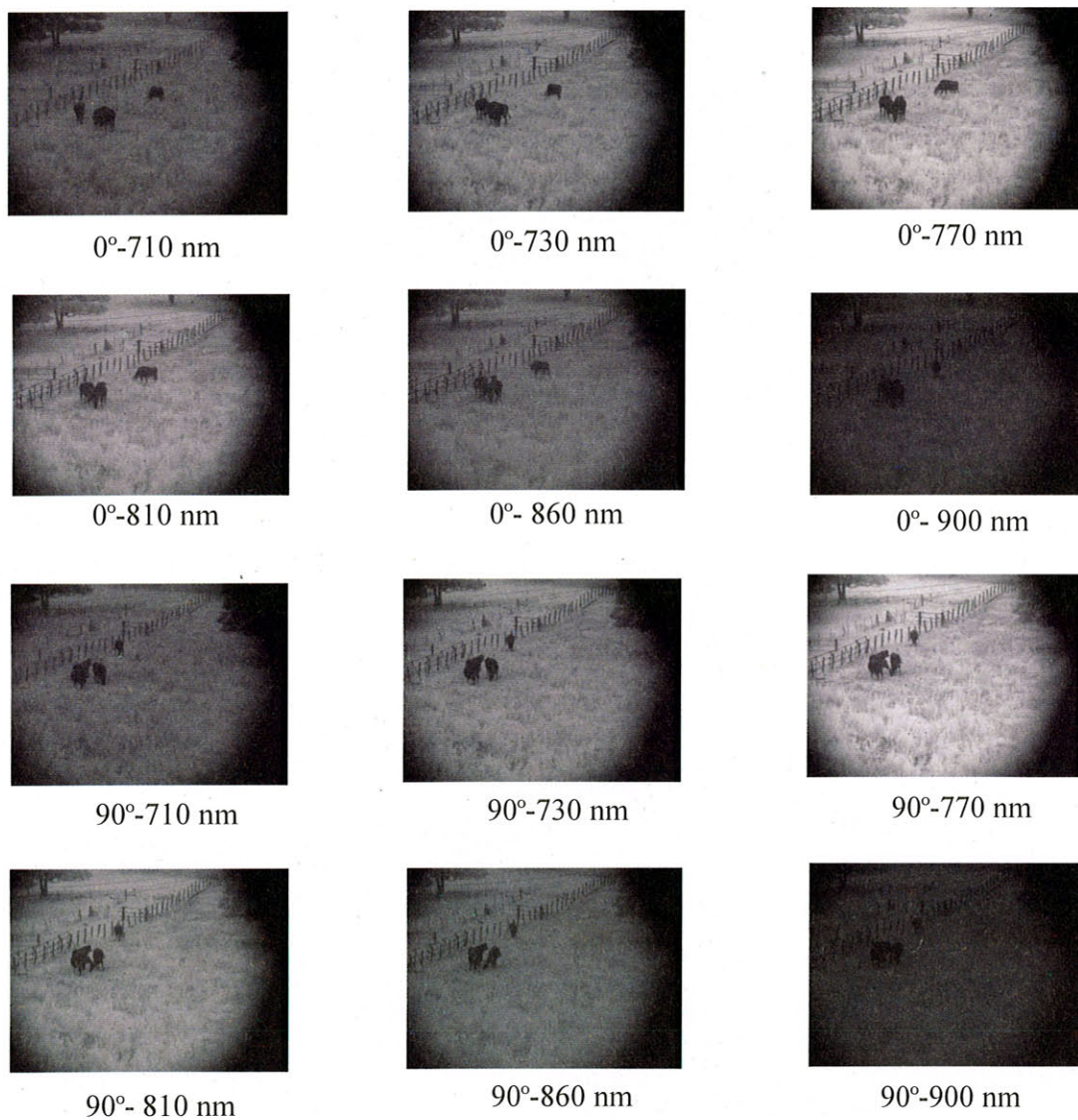
付図15 牧草地観測の対象エリア



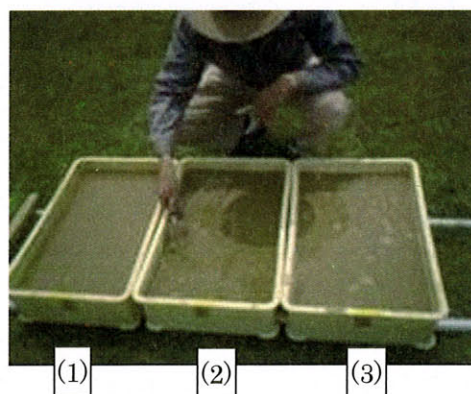
付図16 牧草地観測の対象点1, 2, 3からの太陽反射光のスペクトル輝度その1 (偏波面変位角 $=0^\circ$ )



付図17 牧草地観測の対象点1, 2, 3からの太陽反射光のスペクトル輝度その2 (偏波面変位角 $=90^\circ$ )



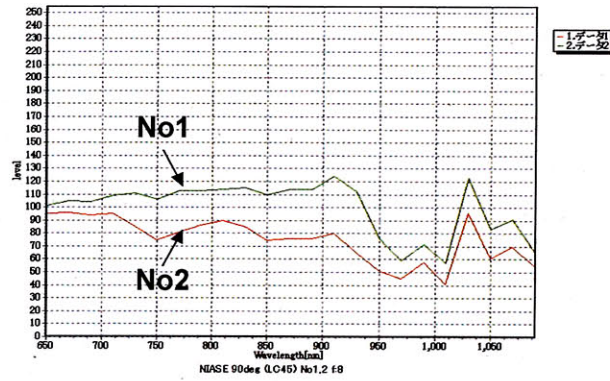
付図18 牧草地観測エリアのスペクトル画像



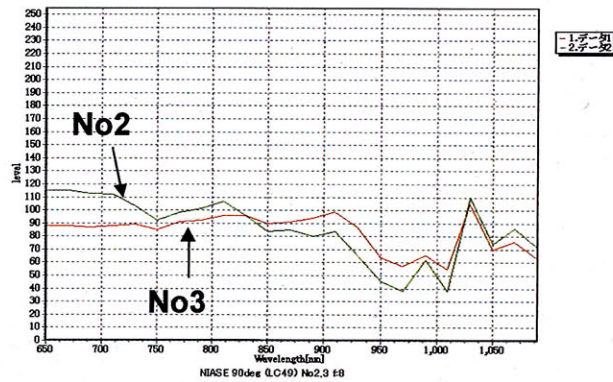
- (1) 高濃度沈澱促進薬使用  
 (2) 汚濁状態 (標準)  
 (3) 低濃度沈澱促進薬使用

付図19 観測対象代かきモデル





付図 20 濁水沈殿が十分な状態と標準状態との比較



付図 21 濁水沈殿が不十分な状態と標準状態との比較



宇宙航空研究開発機構研究開発報告 JAXA-RR-05-040

---

発行日 2006年3月10日  
編集・発行 宇宙航空研究開発機構  
〒182-8522 東京都調布市深大寺東町 7-44-1  
URL: <http://www.jaxa.jp/>  
印刷・製本 ケーティエス情報株式会社

---


本書及び内容についてのお問い合わせは、下記にお願いいたします。

宇宙航空研究開発機構 情報システム部 研究開発情報センター  
〒305-8505 茨城県つくば市千現 2-1-1  
TEL: 029-868-2079 FAX: 029-868-2956

---

© 2006 宇宙航空研究開発機構

※ 本書の一部または全部を無断複写・転載・電子媒体等加工することを禁じます。

 この用紙は地球環境・森林資源のため再生紙を使用しています。



