

多チャンネル分光型画像カメラの開発

横田 俊昭*・佐々木 進・河島 信樹
星 雅之**・堤井 信力**

(1986年9月10日受理)

Development of Spectroscopic Multi-Channel Image Camera for Space Experiment.

By

T. YOKOTA, S. SASAKI, N. KAWASHIMA
M. HOSHI and S. TEI

Abstract: Spectroscopic observation is one of the powerful tools to study the atmospheric compositions of the planets, the roles of the atom and ion in the aurora, and to sense the circumstances of the earth. If two dimensional and multi-channel spectroscopically resolved images are obtained at the same time, the determination of the physical parameters will become much more useful.

Spectroscopically resolved multi-channel image camera, proposed in this report, has been planned as following aims; (1) real time data acquisition of the object such as the aurora, airglow, planets and earth by observing the spatially resolved multi-channel spectra at the same time, (2) easy to handle and to change the wave length even after launching.

The performances of the prototype which consists of the transmitting grating monochrometer and CCD area sensor have been tested. All controls of the system as well as the data processing

* 愛媛大学・教養部

** 武蔵工業大学工学部

have been performed by using the micro-computer. This spectroscopically resolved multi-channel image camera has the following characteristics; (a) the view angle is about 30° and 23° for horizontal and vertical direction, respectively, (b) the spectral sensitivity is in the range from 4000 to 7000 Å with spectral resolution of 32 Å, (c) four maximum spectral images are taken at the same time, and (d) the optical dynamic range is greater than 30 dB at 6328 Å.

序 論

分光学的な観測手段はプラズマのパラメータとか惑星大気の組成を調べるとか資源探査、海洋、大気の汚染など環境調査をするリモートセンシングには有力な手段の一つである。従来から用いられているモノクロメーターは、入射スリット上の画像の一次元方向しか情報は得られない。観測するスペクトルの波長を自由に変更する手段の一つの手段として、従来のフィルターを交換する代わりに、音響光学素子を利用し、電気信号によって連続的に任意の波長に設定できる分光器を試作した[1]。しかし、搭載機器による観測では、対象の二次元のスペクトルを必要とし、空間的な種々のパラメータを必要とすることがしばしばある。更には、二ないし三以上のスペクトルを時間的なずれなしに収集し、時間分解できることが望ましい。

そこで、私達は、空間的にも時間的にもスペクトルが分解できる分光画像カメラを開発して、温度とか物質の分布などのパラメータを二次元像として、直接表示できる装置の開発を目指して、実験を続けてきた[2]。この分光画像カメラは次に述べるような場面で使用し、科学データを収集することを目的として設計している。

(1) オーロラ、夜光、惑星などの観測、資源探査などリモートセンシングに使用できるよう、ロケット・衛星等飛しょう体に搭載できる構造とする。

(2) 少なくとも2波長以上のスペクトルを同時に収集できるだけでなく、自由にその波長を打ち上げ後でもプログラムで変更できるようにする。

(3) 分光画像データの強度比を計算するなど、処理を行うプロセッシング・ルーチンを持たせて、物理量の分布を画像にして表示させる。

以上が、私達が開発している分光画像カメラ(Spectroscopically resolved Multi-channel Image Camera)である。一般に、スペクトル分解された二次元画像を得ようとする場合、通常型のテレビ・カメラにフィルターを取付けた装置を使用することが多い。この方式では、予め設定し、必要とする数だけフィルターを準備しなければならない。使用する波長を変えるためには、ターレット方式にするなどの機械的な機構を必要とし重量も増してくる欠点がある。更に、時間的なずれのない状態で複数の分光画像を収集しようとするれば二台以上のカメラが必要になり、体積・重量ともに増してくる。

この報告では通常型カメラを使用するよりも情報が多く、かつ、小型・軽量で汎用性に富んだ扱い易い分光画像カメラを開発し試験を行った結果について報告する。

分光画像カメラ装置

I. 分光画像カメラの原理

分光画像を得るカメラの基本部分は Stigmatic Monochromater である。モノクロメーターのフォトマルチプライアーなど受光装置を取付ける位置に、CCD エリアセンサーが取付けられ、CCD の縦一行が出口スリットに対応する様になっている。このため、信号を読み出す行を電気的に変えるだけで、スペクトルの波長を変えることが出来るし、複数の行を同時に読み出せば容易に多チャンネルの画像データを得ることができる[3]。

分光器の入射スリットの前部には、対象物体の一次画像をスリット上に結像させるための対物レンズを取付ける。多チャンネル分光画像カメラの全体構成は Fig.1 のようになっている。分光器の入射スリットで切取られ縦一行の CCD で取出せる分光画像信号は一次元であるが、カメラ全体を回転させるか、カメラの前に鏡を置いてそれを回転させればスリットが一次画像を掃引するので二次元画像が得られる。この方式は同時に複数の波長で時間的なずれなしに分光画像が得られるという特徴がある。

II. 分光画像収集試験用装置

プリズムを分散素子とし、CCD ラインセンサーを画像受光素子にした試験装置を組立てて基礎データを収集した。分光器部のレンズの焦点距離は $f=50\text{ mm}$, F2 のニッコールレンズを使用した。分光器の焦点面に置いた CCD は松下製の MEL-512 K で、エレメント数が 512 個のチップである。プリズムは SF2 ガラスでできた頂角 60 度（五島光学製）のもので、最小偏角は Hg 5461 Å に対して 51.4 度となっている。この試験用装置では、分光器部のコリメーターと入射スリット、第一次結像用対物レンズを兼ねたスタレ型コリメー

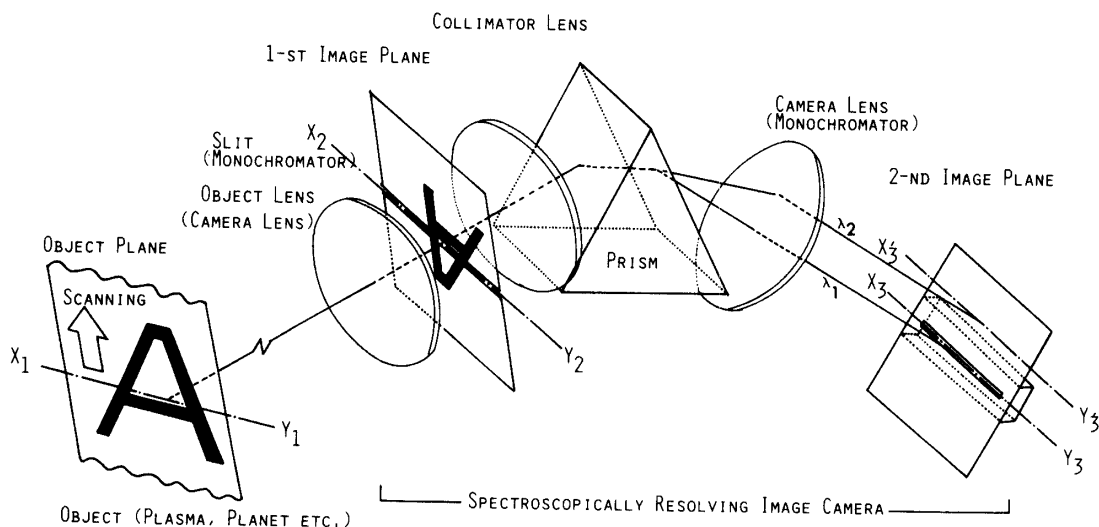


Fig. 1 多チャンネル分光画像カメラの構成と多チャンネルで分光画像が得られる原理。分散素子にプリズムを使用した場合を示す。

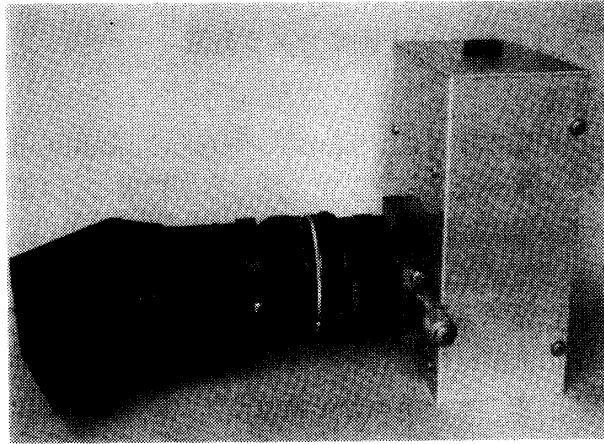


Fig. 2 分光画像収集試験用カメラの外観。モノクロメーターのコリメーターと入射スリット，第1次再像結像用レンズをスダレ型コリメーターで置き換えた小型軽量の試験用カメラ

ターを取付けた。これは，長さ7 cm，幅5 cmの薄いジェラルミン板を間隔0.5 mmで束ねたものである。この試験装置の外観はFig.2の写真に示したように非常に小型である。

分光器の焦点面で，最小偏角からのずれの角 θ と分光器のレンズの焦点距離 f との間に，最小偏角の位置からの距離を l とすると， $l=f \tan(\theta/2)$ で与えられる。そこで，この l で与えられる位置にCCDを置けば任意のスペクトルの波長に設定できる。この試験装置ではマイクロメーターを使用してCCDの位置を変えた。CCDエレメントの幅は28ミクロンなので，上に述べた式で見積ればスペクトルの分解能は表1に掲げたような値になる。しかし，この装置ではスペクトル分解能の全てはコリメーターの能力で支配されていて，コリメーター光の平行光からのずれは最大0.8度になっている。このため，Hg 5461 Aでの分解能はほぼ350 Aであった。これは一般的な干渉フィルターの性能とほぼ等しい。これらの試験装置で得られたデータに基づいて，次に述べる搭載試験用の多チャンネル分光画像カメラの設計をした[4]。

III. 搭載試験用分光画像カメラ

搭載試験用分光画像カメラでは分散素子として300 lines/mmの透過型グレーティングを採用した。モノクロメーター部のカメラレンズの焦点距離は $f=55$ mm，開口比F 1.2，コリメーターレンズのそれは $f=110$ mm，F 4のものを使用し，入射スリットの幅は100ミクロンとした。受光素子のCCDはエレメント数が378 H×485 Vのもので，NEC製のTI-22 A型CCDカメラである。これをモノクロメーターの焦点面に取り付けた。

入射スリット面に像を結ばせる対物レンズは $f=28$ mm，F 4の一眼レフカメラのレンズを使用している。この多チャンネル分光型画像カメラの構成と出来あがりの外観はFig. 3, Fig.4の図と写真で示した様になっている。

(A) 制御システム

CCDカメラ，多チャンネル分光型画像カメラ全体を回転するステップモーターならびに

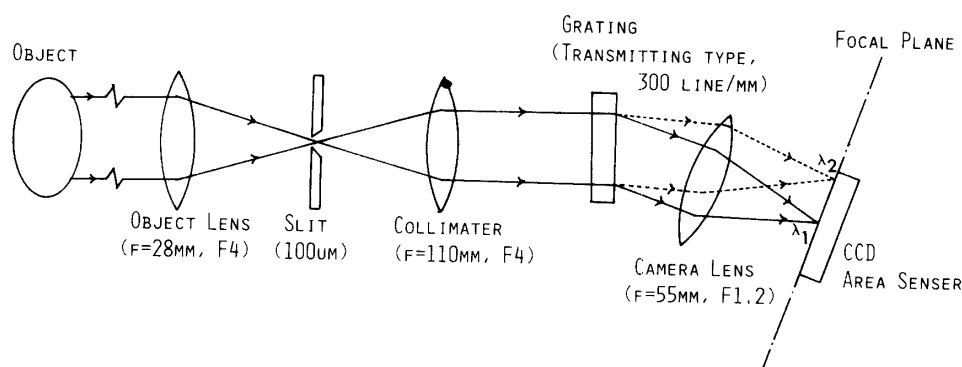


Fig. 3 搭載試験用分光画像カメラの光学系の構成。透過型グレーティングと CCD エリアセンサーを使用している。

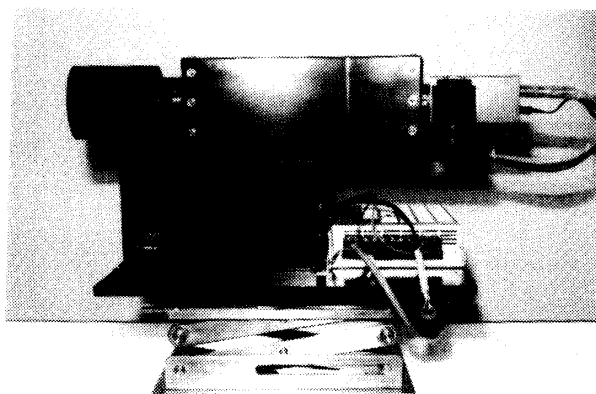


Fig. 4 搭載試験用分光画像カメラシステムの外観。分光画像カメラ本体部と実験室で画像収集試験を行うための回転駆動部を示す。

画像データの取込みなどの制御はマイクロコンピュータ (NEC PC-9801 E) を使用している。取込んだデータの蓄積と処理のために、512 KB のメモリーボードと 1 MB の RAM ボードを増設している。Fig.5 に掲げたブロックダイアグラムのように、分光画像データを保存するために 8 インチ (1 MB) のフロッピーディスクを使用し、CCD からの直接画像 (1 次元スペクトル) を見るモニターテレビと、CPU で処理した 2 次元分光画像を写すディスプレイが接続されている。制御用コンピュータには、分光画像を得るために次のような制御を行なわせる。

- (1) CPU からのコマンドによって画像カメラを同期して回転させるステップモーターの駆動信号を送り出す。
- (2) CPU からのコマンドによって 1 画面分のデータを A/D 変換しコンピュータのメモリーに蓄える。
- (3) CPU からの転送コマンドによって 1 画面分のデータの中から、設定した波長に対応する行、列のデータを CPU に送って処理し分光画像としてメモリーに蓄え、ディスプレイ

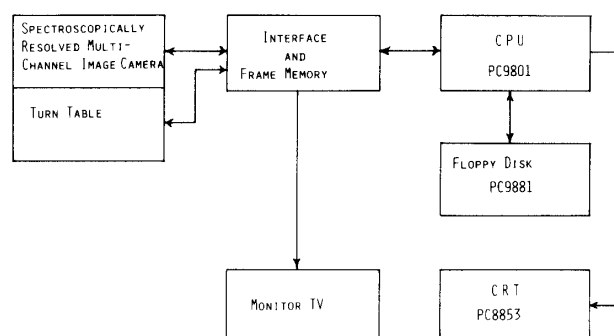


Fig. 5 分光画像カメラシステムを制御する回路のブロックダイアグラム。全体の制御は、PC-9801で行った。CCD エリアセンサーの信号を直接見るモニターテレビと分光画像を写し出す CRT が接続されている。

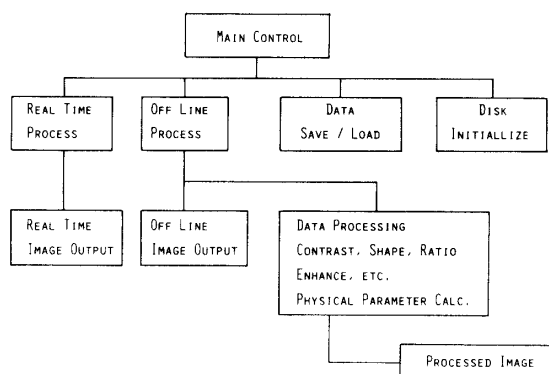


Fig. 6 CPU から制御されるプログラムの流れと構成を示すブロックダイアグラム。

イに表示する。

(B) 処 理 プ ロ グ ラ ム

現在の分光画像処理プログラムの概要は次の様になっている。プログラムを実行すると処理プログラムの選択メニューが表示され入力待ちになる。ここで、選択番号を入力すると次に述べる処理が実行できる。

- (1) リアルタイム処理のための初期値入力、リアルタイム処理・画像出力
- (2) オフライン処理のための初期値入力、濃度変換等の再処理・画像出力
- (3) 収集画像データをディスクへ保存する。
- (4) ディスクに保存されている画像データを再処理して出力する。
- (5) ディスクの初期化

以上のプログラムの構成を Fig.6 に示す。それぞれのプログラムの内容を次に述べる。

(a) リアルタイム処理

このプロセスを実行するために必要な初期値は次の 5 項目である。即ち、(1)波長最小

表 1. 分光画像カメラの試験用装置の分解能

波 長 域	分解能 (理論)	実 測 値
7000 A	33 A	600 A
5500	26	350
4400	11	150
3900	7	100

値 λ_1 , (2)波長分解間隔 $\Delta\lambda$, (3)波長最大値 λ_2 , (4)垂直空間分解能 ΔV , (5)水平空間分解能 ΔH の 5 項目を入力する. これらのパラメータは CCD の画素の水平方向と垂直方向の並びに対応している. 水平方向が波長, 垂直方向が画像の垂直方向の空間分解能に対応し, 画像の水平方向の空間分解能はステップモーターの最小回転角に依存している. 即ち, CCD の縦方向の行は分光器で分光された 1 つのスペクトルの波長に対応していて, 横方向の列がスペクトルの分散方向に対応している. CCD の行番号 $N1$ と波長最小値 λ_1 との間には

$$N1 = \text{INT}((\lambda_1 - 3885)/7.9 + 1)$$

の関係がある. 波長分解間隔 $\Delta\lambda$ と CCD の行番号 ΔN の間には,

$$\Delta N = \text{INT}(\Delta\lambda/7.9)$$

の関係が成り立っていて, 分光画像として取り出せるスペクトルの波長間隔 $\Delta\lambda$ が CCD の行番号に換算すると $\Delta N - 1$ 行おきに対応していることを意味している. 波長最大値 λ_2 と CCD の行番号 $N2$ の間には,

$$N2 = \text{INT}((\lambda_2 - 3885)/7.9 + 1)$$

の関係が成り立っている. ΔV は CCD の画素から縦方向に $\Delta V - 1$ 個おきにデータを読み出すことに対応している. 水平空間分解能 ΔH はステップモーターのステップ角 0.05 度の $\Delta H - 1$ ステップおきに画像信号を取り出すことに対応している. 分光画像カメラの 1 回の掃引で, 同時に読み出さるスペクトルの波長の数は,

$$\text{INT}((N2 - N1)/\Delta H + 1)$$

で自動的に決定される様なプログラムに現在なっている. これら初期値は CCD の行・列の数, 光のレンズなどに対する透過率, ステップモーターの性能などで物理的に制限がある. それらを示すと以下のようである.

$$3885 \text{ A} \leq \lambda_1 \leq 7710 \text{ A}$$

$$8 \text{ A} \leq \Delta\lambda \leq 3700 \text{ A}$$

$$3885 \text{ A} \leq \lambda_2 \leq 7710 \text{ A}$$

$$1 \leq \Delta V \leq 375$$

$$1 \leq \Delta H \leq 600$$

$$\lambda_1 \leq \lambda_2$$

$$\lambda_2 - \lambda_1 \geq \Delta \lambda$$

また、メモリーとフロッピーディスクの容量による制限で、同時に取得出来るスペクトルの数は4本に制限されている。

次に、メモリーに取得格納した画像データの処理について述べる。データをディスプレイに画像として描く時、モノクロディスプレイの階調表現能力を考慮して、8階調で表示する。元のデータは8ビット(256ステップ)なので、これをカラーディスプレイに写し出すことを考慮し、モノクロディスプレイでも自然な濃淡をもった階調となるように、色の配置を選んで、

0- 4	: 黒
5- 31	: 青
32- 56	: 赤
57- 81	: 紫
82-112	: 緑
113-140	: 水色
141-170	: 黄色
171-255	: 白

のように256ステップをふり分けた。現在では、輪郭抽出、強調等の演算処理のためのプログラムは組込まれていない。処理された画像はディスプレイの640×400ドットのグラフィック・エリア内の600×400ドットを使用し、残り40×400ドットはメニュー画面とし、Real Time/Off Line、最小波長、最大波長、波長分解間隔、水平、垂直空間分解能などのパラメータを表示する領域に使用している。

(b) オフライン処理

このプロセスでは、リアルタイムでメモリーに取り込んだ画像データを再処理する時と既にフロッピーディスクに記録したデータを再度メモリーに戻して再処理する時に使用するルーティンである。このルーティンは画像処理のための演算処理用プログラムが活躍する部分であるが、大部分のプログラムは未だ未開発なので空白となっている。

(c) 性能試験

低圧水銀放電管の発光部を10×5 mm²に被いで制限した光源を用い、Hg 4047, 4358,

表 2. 波長と行番号の関係

真の波長 (Å)	表示される波長 (Å)	CCD の行番号
4047	4043.0	21
4358	4359.0	61
5461	5457.1	200
6328	6326.1	310

表 3. 分光画像カメラの視野角と空間分解能

方 向	視野角(度)	分解能 (度)	
水 平	29.69	0.049	0.055
垂 直	22.95	0.086	0.086

(注：分解能の左側の項は視野角を画素数で割った計算値)

表 4. 波長分解能

波長 (Å)	波長分解能 $\delta\lambda$ (Å)
4047	36
4358	31
5461	34
6328	25

5461, 5770, 5791 Å のスペクトル線で、モノクロメーター部のレンズの焦点調節, 光軸, CCD の面素の行・列の傾きを調整した。さらに, 水銀スペクトルに He-Ne レーザーを光源に加え, CCD の行がプログラムに書かれている波長と一致するよう調整した。調整後の波長と CCD の行番号との関係は表 2 のようである。

調整後の CCD の行番号 N と波長との対応は, $N=1$ に対して $\lambda=3885$ Å, $N=485$ に対して $\lambda=7708.6$ Å となるが, 有効に使用できる範囲は, $N=7$ から $N=485$ 迄, 即ち, 3932.4 Å から 7708.6 Å 迄となった。現在の光学系には, 対物レンズ, モノクロメーターのカメラレンズ, コリメーターレンズも共にガラスレンズを使用している。ガラスレンズの光の透過率は, 3900 Å 付近から急激に低下するので, 本システムでは 3900 Å 以下に相当する $N=1$ から 6 迄の行では分光画像が得られなかったものと考えられる。

次に, レーザー・スポットをカメラ前方 $L=78.3$ cm に置いたスクリーンにあてて, スポットを上下に動かして上下方向の視野角を, スポットを止めてカメラを左右に動かして左右方向の視野角を測定した。また, 垂直・水平方向にスクリーン上でのスポットの移動量とディスプレイ上のスポットの像の移動量の関係を測定して空間分解能を得た。これらの結果を表 3 に掲げる。

(D) 波 長 分 解 能

多チャンネル分光画像カメラの光学系, 入射スリットの幅, CCD の 1 つの画素の幅など物理的要素で総合的にきまるスペクトルの波長分解能を低圧水銀放電電管と He-Ne レーザーを光源として調べた。それは, 光源の各スペクトルをリアルタイム・ルーティンでメモリーに取込み, 各スペクトルに対応する CCD の行と, それに隣合う CCD の行から読み出された光の強さを用いてスペクトルの形を描きその半値幅を求めた。このようにして得られた波長分解能 $\delta\lambda$ を表 4 にのせる。

分散素子として回折格子を使用しているので, スペクトルの分散はリニアであり, その

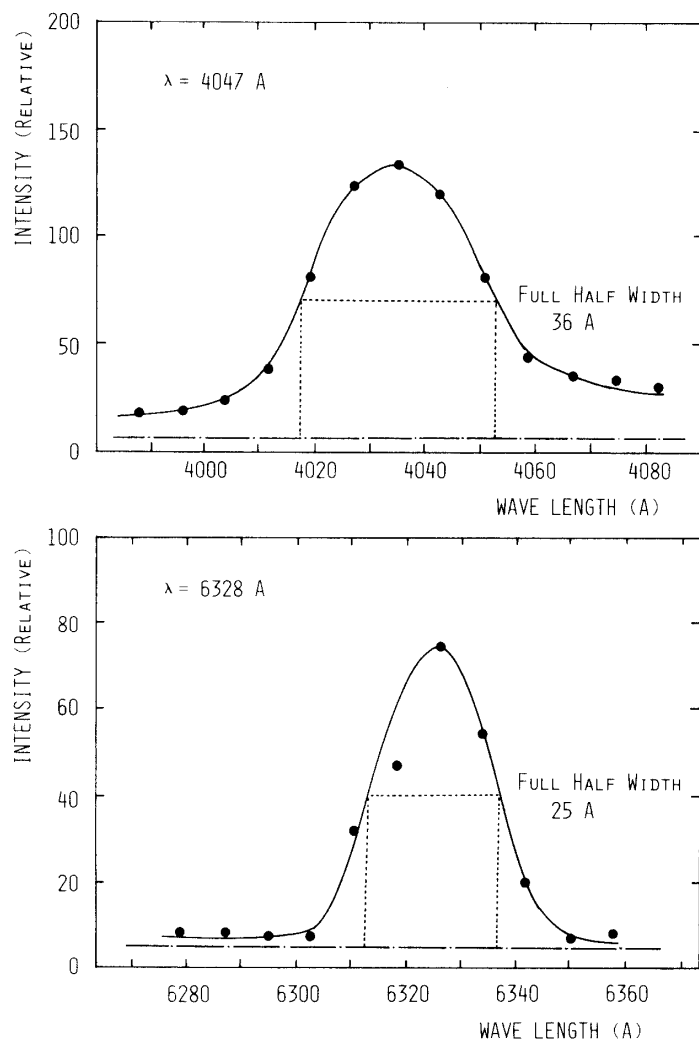


Fig. 7 分光画像の波長分解能を試験したデータの一例.
 $\lambda=4047 \text{ \AA}$ と, $\lambda=6328 \text{ \AA}$ に於けるスペクトルの幅.

波長分解能は波長によらずほぼ一定である. Hg 4358 Å と He-Ne レーザー光 6328 Å で得られたプロファイルの例を Fig.7 で示す. 表 4 から, 波長分解能の平均値は 32 Å となる.

さて, 回折格子に於て, 溝の間隔を a , 回折角を β , 回折光の次数を m とすれば,

$$a \sin \beta = m\lambda \quad (1)$$

を満足する方向に明線があらわれる. (1)式から, $m=1$ の時, 波長の変化に対する分散角の変化は,

$$d\beta/d\lambda = 1/a \cos \beta = n/\cos \beta \quad (2)$$

となる. ここで, $n=1/a$ で, 1 mm あたりの溝の数である. モノクロメーターのコリメーター・レンズの焦点距離を f とすれば,

表 5. スペクトルの純度 (計算値)

波長 λ (Å)	回折角 β (度)	$d\lambda/dl$ (Å/mm)	純度 (Å)
4047	6.97	601.6	30.08
4358	7.51	600.9	30.05
5461	9.43	597.9	29.90
6328	10.94	595.0	29.75
		平均	29.94

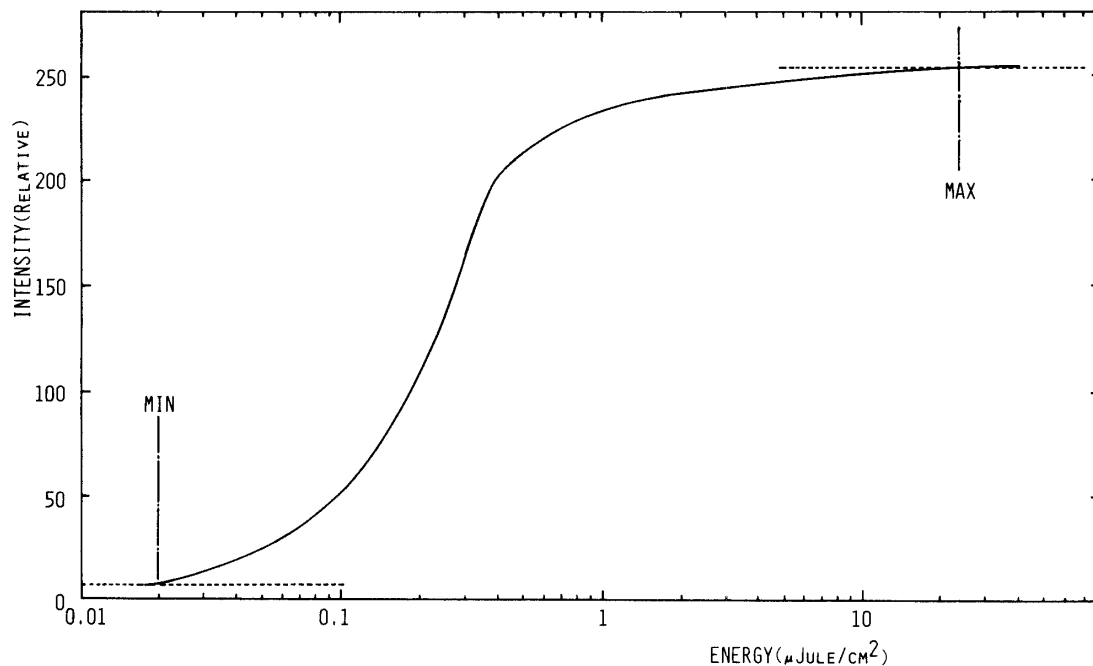


Fig. 8 分光画像カメラの感度特性。λ=6328 Å に於ける感度特性で、レンズの紋りは一定にして測定している。従って、対物レンズの紋りを変えると更に大きなダイナミックレンジが得られる。

$$dl/d\lambda = f \cdot d\beta/d\lambda = f \cdot n / \cos \beta \quad (3)$$

という式で線分散度はあらわされる[5]。ここで、モノクロメーターのカメラ・レンズ、コリメーター・レンズの焦点距離はそれぞれ、110 mm, 55 mmであることを考慮すると、4047 Åの波長に対しては、 $d\lambda/dl = 601.6$ Å/mm, CCD上でのスリットの像は50 μmであるから、予想されるスペクトルの純度は30.08 Åとなっており、測定によって得られた値に極めて近くなる。(3)式で計算した数値を表5に掲げる。このようにして得られた分解能(純度)は29.9 Åで、実測値の32 Åより小さい。

これは、CCDの画素の幅を考慮していないことと、レンズの収差によって理論値より悪くなっていると考えられる。

表6. 処理時間

信号待時間	33 msec×600 line
描画 時間	45 sec/400×610 pixel=176 μ sec/pixel 400×600 pixel~42.3 sec
データ転送 速度 (ブロッ ク転送)	1 word(2 byte): 2 μ sec 400 byte×4×600 line×2×7.36 μ sec =15 sec

(E) 感度測定

分光画像カメラの総合感度を、出力2 mWのHe-Neレーザー光をビームスプリッターで2本の光束に分け、一方が画像カメラへ、他方をフォトディテクターへ導いた。レーザー光で照射されているCCDの画素数と、カメラに入射しているレーザー光の強さ、CCDの画素1つの大きさから感度を知ることができる。このようにして得られたカメラの感度の範囲は $\lambda=6328$ Aで、 $0.02\sim 22.0$ μ jule/cm²であり、感度特性をFig.8に示す。

ダイナミックレンジにすると30 dBとなるが、画像カメラの対物レンズの絞りを変えれば更に大きなダイナミックレンジで使用できる。対物レンズによって多少の違いはあるが、絞りを併用すると全体のダイナミックレンジは300~500 dBとなる。

(F) 画像処理時間

分光画像カメラを使用して、1画面をディスプレイ上に画像を表示し終るまでに必要とする時間は、リアルタイム処理の場合で約90秒であった。個々のプロセスで必要とする時間は表6のようであった。

現在では、処理速度はある程度プログラムに依存している面があるので、改良すれば少し早くなることが期待できる。更に、データの転送方法・方式を変更すれば、さらに早くなることが可能であろう。

(G) 性能のまとめ

飛しょう体に搭載するための性能試験用チャンネル分光画像カメラで得られた性能の一覧を表7にまとめておく。

(H) 画像収集試験

試作した多チャンネル分光画像カメラの総合性能試験を行う目的で、いくつかの物体を対象に、分光画像を収集した。対象物体は、風景、蛍光灯、Naの炎色反応、および色が塗り分けられた缶である。

(1) 蛍光灯の観測

管面に「ISAS」という文字を黒色で書き、水銀原子のスペクトルが存在するHg 5461 Aと、水銀原子のスペクトルが存在しない $\lambda=5426, 5481$ Aの3波長で分光画像を撮影した。

表 7. 多チャンネル分光画像カメラの総合性能

波長帯域	3930～7700 Å
波長分解能 (半値幅)	32 Å
視野角	水平：30°
(f=28 mm レンズ使用)	垂直：23°
最大空間分解能	水平：0.049°
(f=28 mm レンズ使用)	垂直：0.086°
感度	0.02～22.0 $\mu\text{jule}/\text{cm}^2$

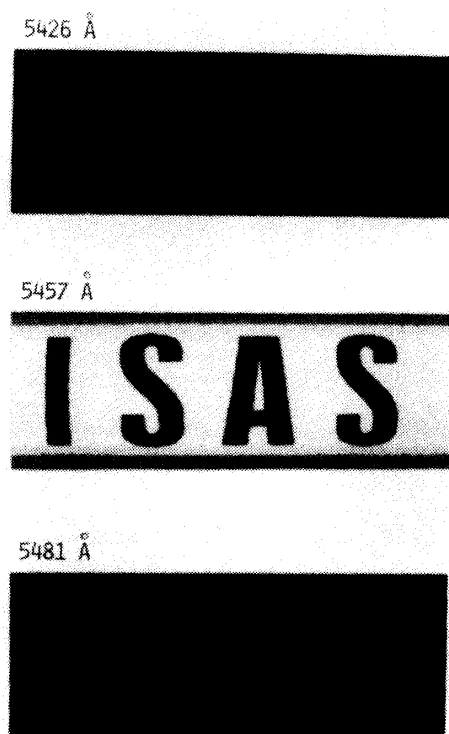


Fig. 9 蛍光灯の観測。管面に「ISAS」と黒色で文字を書き、水銀のスペクトル線が存在する波長と、存在しない波長で画像を比較している。

蛍光塗料は可視域全体にわたって連続光を放射しているが、水銀原子の線スペクトルの強さは、それらよりはるかに強いので、 $\lambda=5461 \text{ Å}$ に近い 5457 Å では、「ISAS」の文字が鮮明に読み取れる。ところが、水銀のスペクトルが存在しない波長では、光の強度が弱いので、文字は管面の暗さに隠れてはっきりしなくなっている。この画像の様子は Fig.9 に示した。



Fig.10 分光画像収集試験に使用した風景。ポラロイドカメラによる一般写真

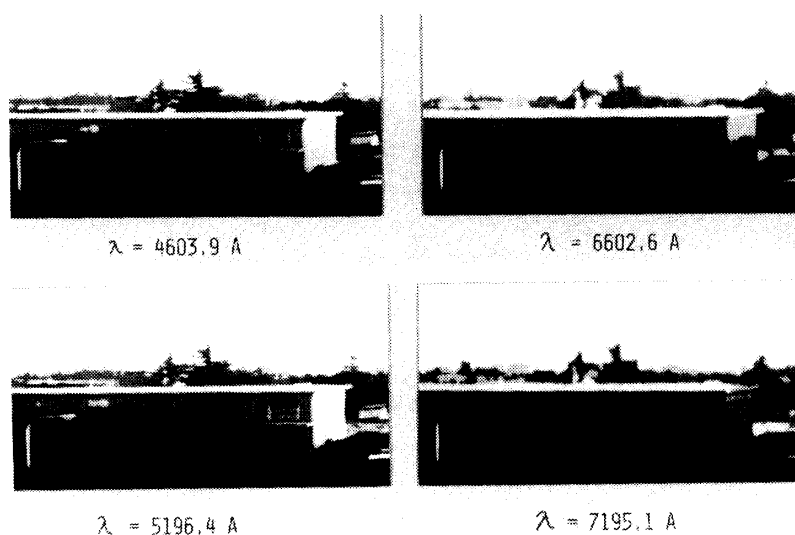


Fig.11 赤, 緑, 青色の3色のスペクトルで得られた, 風景の分光画像.

(2) 風景の観測

Fig.10 で示されている風景を $\lambda=4603.9, 5196.4, 6602.6, 7195.1 \text{ \AA}$ の等間隔な4波長で分光画像を撮影した。Fig.11 に掲げられているように, $\lambda=4603.9 \text{ \AA}$ (青色) の時には手前にある木々の緑は暗く写っているが, $\lambda=5196.4 \text{ \AA}$ (緑色) では明るく写っているし, 建物右側の芝生も明るくなっている。また, $\lambda=6602.6 \text{ \AA}$ では, 建物のドアが写っているが, $\lambda=7195.1 \text{ \AA}$ では暗くなって写っていない。

(3) 炎色反応の観測

手軽な線スペクトル光源として, バーナーの炎に NaCl を入れて分光画像を撮影した。Na の炎色反応が炎全体に行き渡るように調節して, ほぼ Na の D 線に合わせた $\lambda=5884 \text{ \AA}$ と Na のスペクトルの無い $\lambda=5844 \text{ \AA}$ での画像を Fig.12 に示す。D 線を出す炎の形が

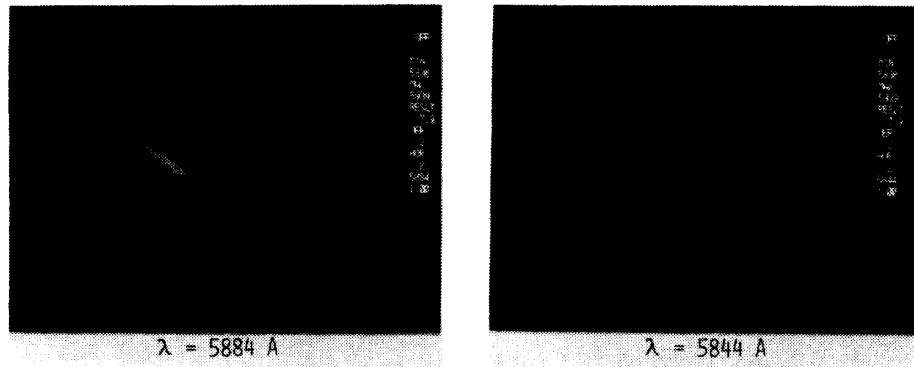


Fig.12 NaCl の炎色反応の分光画像。

Na の D 線に波長を合わせると炎の形がはっきりとえられる。

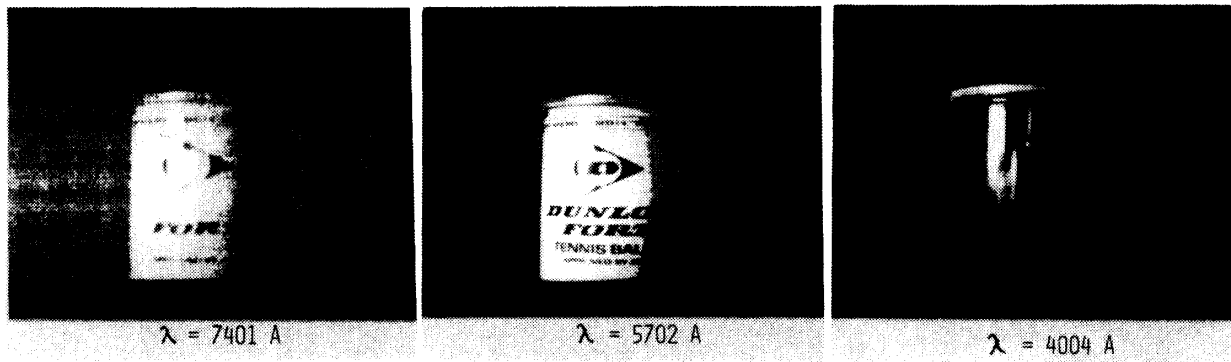


Fig.13 テニスボールの缶を、赤、緑、青色のスペクトルで撮影した画像。ペイントの色に対応した光が反射されて、缶に描かれた文字が浮き出たり、消えたりするのが分かる。

鮮やかに見えるのがわかるであろう。

(4) 缶の観測

黄色の下地に、濃紺色、赤色、黒色で文字とマークが描かれたテニスボールの缶を 3 波長で撮影した。λ=7401 Å, 5702 Å, 4004 Å の場合を Fig.13 に示す。赤色のスペクトルで撮影された画像には、赤色で描かれた文字は写っていないが、オレンジ色のスペクトルで撮影した画像では、黄色のバックは明るく、黒、濃紺、赤の文字は黒く写っている。紫のスペクトルで撮影した画像では、太陽光が特に強く当たっている部分のみ白くなっていて、他の部分は黒くなっている。これは、文字などの色は、その色に対応する波長を持ったスペクトルのみが乱反射される、と言うことで説明できる。

議 論

今回試作した搭載試験用多チャンネル分光画像カメラの性能は、表 6 に示されたような性能を持っている。分光出来るスペクトルの分解能が 32 Å という値は、従来から用いられ

ている干渉フィルターの性能から見れば、かなり高性能の品に相当する。又、モノクロメーターの設計しだいで更に分解能の高いカメラとすることができる。これは、この方式が有利となる特徴の第1である。

従来の惑星間ミッションでは、フィルターが使用されてきた。たとえば、ハレーすい星探査用のベガの狭視野カメラには8枚、広視野カメラでは1枚のフィルターが使用され、ジオットでも10枚のフィルターであった。本システムでは、現在の分解能32 Åですら可視域全体をカバーしようとするれば約120枚に相当する。従来の方式ではこの様に多数のフィルターを搭載することは困難であるばかりでなく、打ち上げ後は、予め積み込んだフィルターのスペクトル領域しか観測できない。ところが、本システムでは、電気的な信号でスペクトルの波長を変えることができるので、打ち上げ後でもコマンド信号でそれが可能である。これは、従来の方式にない大きな特徴の第2番目である。

波長を変更するには、従来の方式では、ターレット機構などの機械的な機構が必要であり、重量が増すという欠点があったが、本システムは電気信号のみで変更できる。しかも、1台のカメラで複数のスペクトルに分解された画像を時間的なズレなしに得る事ができる。これが第3番目の特徴である。

さて、今回のシステムは使用できる波長領域は3939~7700 Åと可視域であるが、これは、モノクロメーターの光学系はガラスレンズを使用しているし、第1次画像用にもガラスレンズを使用し、グレーティングも透過型を使用しているためである。反射型グレーティングに取り替え、光学系を全て凹面鏡にすれば、宇宙空間では真空なので、千オンプストローム程度の紫外域までは、像の収差もさほど大きくはならない多チャンネル分光画像カメラが設計できる。CCD素子の分光感度は2000~11000 Åの範囲にあり、感度のピークは9000 Å位の近赤外にある。したがって、近年紫外域での感度を向上させた素子が開発されつつあるので、これを使用するか、サルチル酸ソーダ等の蛍光物質を塗布すれば、紫外域でも画像を得ることは可能となるので、紫外、可視、赤外領域で使用する多チャンネル分光画像カメラを製作できる。我々のグループとは全く独立に、CCD素子を使用した走査用の、惑星探査用可視・近赤外用画像カメラを神戸大学のグループが試作し、報告している[6]。カメラの制御方法などで、かなりの違いがあるが、実用機を製作する時点で出くわすいくつかの共通の問題点が見られる。

今回のシステムの $\lambda=6328$ Åに於ける感度 $0.02\sim22.0\text{ }\mu\text{jule/cm}^2$ では、地球のリモートセンシングには充分と考えられるが、惑星探査ミッション、オーロラ観測など、対象物が暗い場合には、感度が不足することが考えられる。そのためには、感度の高いCCD素子を使用するのも1つの方法であるが、次の方法を併用することも考えられる。即ち、

- (1) 本システムで使用している20 msecの積分時間よりも長くする。
- (2) イメージインテンシファイアーをCCDの前面に取り付ける。
- (3) CCD素子を冷却してS/N比を上げる。

が考慮されている。

次に、実際に探査機に搭載した場合には、データ量がテレメーターの能力との関係で問題となってくる。この多チャンネル分光画像カメラで得られる情報は科学的に価値の高い

物が多いけれども、データ量も多い。仮に、10 Kbps で本システムの 1 回分のデータを送るためには 128 sec かかる。ところが、宇宙科学研究所のハレーミッションでは、64 bps であった。そのため、データ圧縮を行わなければならない。その方法としては次のいくつかが考えられる。即ち、

- (1) 信号レベルの低いフレームは送らない。
- (2) 信号量の低い画素は、そのステータスの 1 ビットのみを送る。
- (3) とりの画素との差分のみをデータとして送る。
- (4) 対数圧縮する。

などの対策をする必要がある。これらの項目について開発・試験を行うことが今後の問題点となる。

結 論

この多チャンネル分光画像カメラは、惑星探査、宇宙空間での能動実験の観測、南極ロケットによるオーロラの構造解析、リモートセンシングによる資源探査・環境汚染の調査など、衛星に搭載する観測機器として多くの応用が考えられる。今回のシステムは、回折格子を分散素子とした分光器と CCD 撮像素子で構成されており、2 次元画像を得るには、システム全体を空間掃引する方式になっている。これは、探査機などのペイロードとして使用することを当初から考えていた結果の表れである。実験室で行われるプラズマ実験に使用したい時には、空間掃引する必要がある。こへ場合には本システムの前面に鏡を置き、それを回転させるのが良いと思う。

この方式による多チャンネル分光画像カメラによって、分光画像を得る方式は、従来のフィルター駆動方式に比べ、可動部がないこと、時間的ズレのない複数の画像が得られること、いつでも画像を得る波長が変えられるなど、電気的操作によって画像を収集できるので、宇宙環境に於ける信頼性は高い。これは惑星間ミッションに使用する装置としては最適である。

今後に残された改良・開発課題としては、

- (1) 感度を向上し、S/N 比を良くする。
- (2) 解像度を向上する。
- (3) 惑星間ミッションでの使用に耐える様データ圧縮などを行う。

などがある。これらの点が改良されれば、惑星探査用、資源探査用、環境調査用テレビカメラとして十分な性能に達することが期待できる。

謝 辞

この多チャンネル分光画像カメラは、S-520-2 号機に SBE というペイロード名でデザイワイアーの伸展状況などを観察するために開発したカメラが、きっかけとなっている。開発にあたっては、宇宙科学研究所と愛媛大学の共同研究の下で進められた。また、基礎開発と性能試験に、宇宙科学研究所からの「基礎開発費」を使わせていただいた。この紙面を借りて感謝の意を表したい。

基礎データを得るための CCD は、松下電気製であるが、この段階で、三谷氏から貴重な資料のいくつかを頂いた。また、搭載試験用カメラの分光器部は、我々のグループの設計の下に三鷹光器で製作し、データ処理部は(株)CCD に製作を依頼した。

参 考 文 献

- [1] T. Yokota, O. Kaneko, S. Okamura and N. Kawashima : Monochromator with Acoustooptic Tunable Filter for Plasma Observation
- [2] a. T. Yokota, S. Sasaki, N. Kawashima, K. Oyama and Y. Nakai : Observation of Doughter Payload and Tether Wire by CCD Camera onboard S-520-2 Rocket
ISAS Research Note RN-209 (1983)
b. S. Sanaki, K. Oyama, K. Tsuruda and T. Yokota : Standard solid State TV Camera for Sounding Rockets
ISAS Research Note RN-172 (1982)
- [3] 横田俊昭, 佐々木進, 河島信樹 : 多チャンネル分光画像カメラの開発と応用
スペースプラズマ研究会報告書 宇宙科学研究所 (1984)
- [4] 佐々木進, 横田俊昭, 河島信樹 : 惑星ミッションのための連続分光テレビカメラの開発
宇宙観測シンポジウム報告書 宇宙科学研究所 (1985)
- [5] Ralph A. Sawyer : Experimental Spectroscopy (3-ed Edition) Dover Publication Inc. New York (1963)
- [6] 藤井直之, 東 博美, 伊東敬祐, 斎藤正徳, 宮本正造 : 惑星探査用可視・近赤外反射スペクトル装置の開発
地球惑星基礎開発報告書 宇宙科学研究所 (1985)