

技術報告**イメージングスペクトルメータの光学系**

寺久保明久・安田 嘉純・江森 康文

千葉大学工学部情報工学科 〒260 千葉市弥生町 1-33

(1989年6月26日受理)

Optical Design of Airborne Imaging Spectrometer

Akihisa TERAKUBO, Yosizumi YASUDA and Yasufumi EMORI

Faculty of Engineering, Chiba University, 1-33, Yayoi-cho, Chiba 260

Optical design, mainly dispersion optics of airborne imaging spectrometer is described. In this paper, a new design of imaging spectrometer using lens system is compared to classical imaging spectrometer those were composed of all reflecting optical components. Advantage of using lens system is the flexibility of optical components design and possibility of reducing or correcting some kind of aberrations. Disadvantage of lens system—chromatic aberration—is reduced to be negligibly small by selecting glass materials. The purpose of the imaging spectrometer is to monitor conditions of vegetation fields by measuring spectral reflectance of foliage (chlorophyll) from high altitudes.

1. はじめに

植物の分光反射を連続的、非破壊的に得る目的には機動性があり、空間解像度、スペクトル解像度の高い装置が必要である。従来のイメージングスペクトルメータ (SISEX) では高高度から広い波長範囲を扱うため、色収差のない、狭画角の反射シュミット系が使われていた。今回、レンズ系を使っても十分小さな色収差が得られる光学ガラスを組み合わせることにより、小型軽量で航空機搭載可能なイメージングスペクトルメータを開発した。この装置は波長 $1\mu\text{m}$ までの植物の分光反射を測定することにより、その生育状況、植物へのストレスの状況を調査することを目的とする。この航空機イメージングスペクトルメータの光学系の特長について解説する。

2. 航空機イメージングスペクトルメータの必要条件

SISEX (シャトルイメージングスペクトルメータ) では高高度から狭画角で広スペクトル域、高速度でスキャンを行なうため、大口径、長焦点距離、全反射光学系が使われた。しかし、対象を植物に限定した場合、空間およびスペクトル解像力、画角の面で不十分である。航空

機イメージングスペクトルメータでは低高度、大画角、 $1\mu\text{m}$ までのスペクトル域、低速度でスキャンするための光学系が必要である。Table 1 に SISEX と今回試作の航空機イメージングスペクトルメータの各パラメータを示す。Fig. 1 に今回試作のイメージングスペクトルメータの概念図を示す。

システム自体の小型軽量化を図るために、本装置により得られた情報はオンボード A/D 変換され、SCSI 磁気ディスク上に記録される。また、光学系は反射鏡の代わりにレンズを多用している。レンズ系の問題点である色収差は、 $0.4\sim 1\mu\text{m}$ までの波長域において、実用上十分小さな色収差となる光学ガラスの組合せを選定した。スペクトルの分散にはプリズムを複合し、分散の波長依存の少ない組合せを探した。シュミット系と比較して劣る光学系の明るさは、2次元アレイセンサーをスロースキャンすることによって積分時間を稼ぐことなどにより解決した。上記の仕様を満たすために、 $320\text{カラム}\times 240\text{ライン}$ のアレイセンサー (Si, MOS) を使い、その Y 方向をスリット方向、X 方向をスペクトル方向のスキャンに用いている。

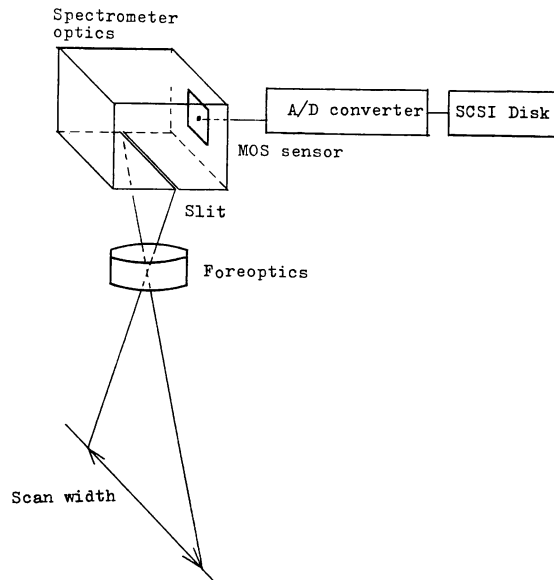


Fig. 1 Schematic diagram of airborne imaging spectrometer.

Table 1 Imaging spectrometer parameters.

Platform	Cf.(SISEX)	Aircraft
Swath (km)	12.1	0.24
GIFOV (m)	30	1
Field angle (deg)	2.7	22
WL width (μm)	0.4-2.5	0.4-1.0
$\Delta\lambda$ (nm)	10	3.75
Slit width (μm)	—	27
Sensor pitch (μm)	52	27
Altitude (km)	250	0.6
Quantitize (bits)	8	8
Raw data rat (MB/s)	155	5

Table 2 SISEX optical parameters.

Items	Foreoptics	Spectrometer
Focal length (mm)	416	400
Focal ratio	1.9	1.9
Effective aperture (mm)	220	210
Field of view (deg)	2.8	5.1
MTF (nyquist) (%)	>80	>80

3. 従来の光学系

SISEX の光学系を Fig. 2 に示す。光学系常数を Table 2 に示す。0.4~2.5 μm までの広いスペクトルレンジをカバーするために、対物光学系は色収差のない反射シュミット系を使っている。対物光学系の特長は、焦点距離が 400 mm と長く、F 値が 2 と明るいことである。これは IFOV 30 m を 250 km という高高度から達成するためであり、1 ラインをスキャンする時間が約 5 ms と短いために、明るい光学系が必要なのである。スペクトルメータ部も反射シュミット系を使っている。スリットによって 1 ライン分に切り取られた像はフィールドフラッターによって像面湾曲を補正され、シュミット系によってコリメートされ、プリズムアレーによ

てスペクトルに分解される。もう一度同じ経路をたどり、光路上のビームスプリッターによって VNIR (可視-近赤外) と SWIR (短波長赤外) が分離され、スリット近くのべつべつのセンサー上で結像する。

グレーティングを分散に使った場合には、高次の回折によって波長域が 1 オクターブに制限されるが、プリズムではそのようなことはなく、また輝線スペクトルの半値幅もグレーティングのほうがプリズムよりも広くなる。プリズムの唯一の欠点は波長と屈折角がノンリニアなことである。

4. レンズ系によるイメージング スペクトルメータ

本スペクトルメータ部の光学系を Fig. 3 に示す。対物光学系とスリットによって 1 ライン分に切り取られた像は、コリメータレンズを通して平行光にされ、プリズムアレーの 2 回通過でスペクトルに分解され、もう一度

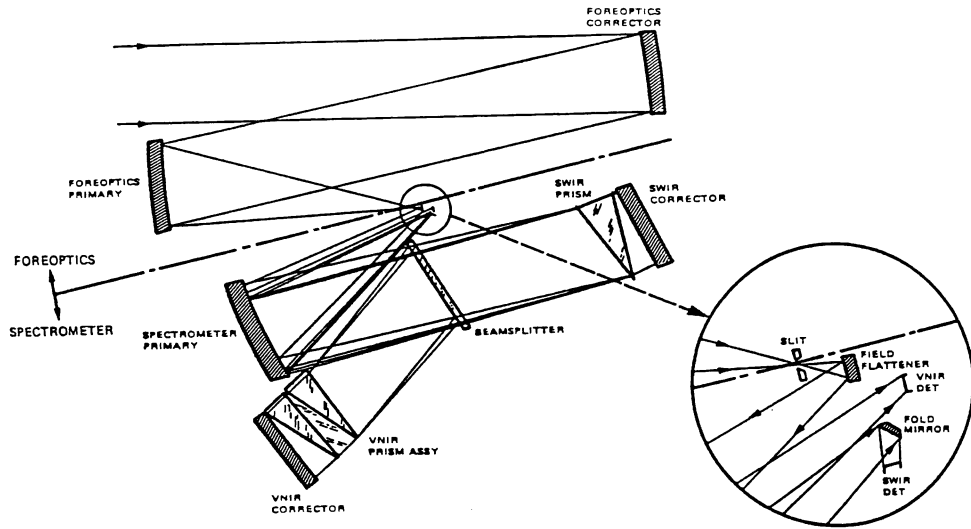


Fig. 2 Optical layout of SISEX.

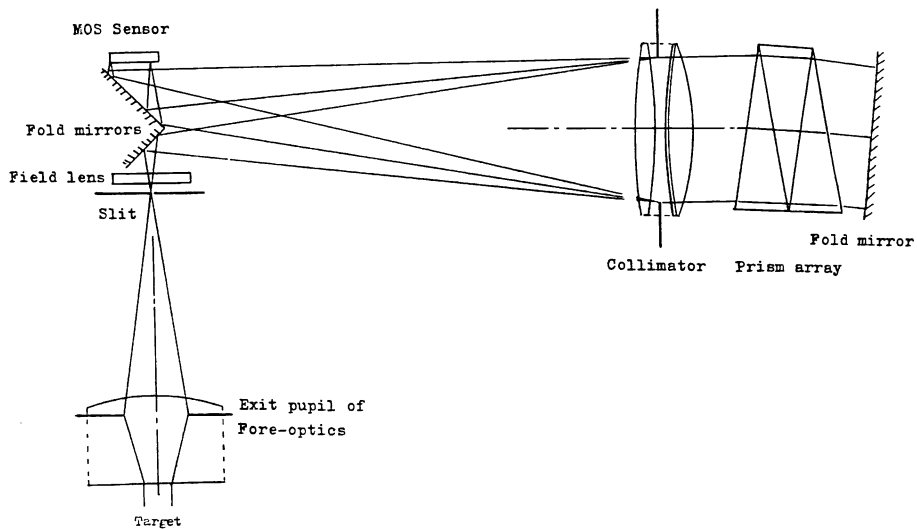


Fig. 3 Optical path of airborne imaging spectrometer.

Table 3 Optical parameters of airborne imaging spectrometer.

Items	Value
Foreoptics focal length	16 mm
Foreoptics focal ratio	4
Slit width	27 μ m
Slit length	8.8 mm
Dispersion of WL	400-1000 nm/6.6 mm
Collimator aperture	25 mm
Collimator focal length	100 mm
Focal ratio	4

コリメータレンズを通して集束され、スリット近くのセンサー上に結像する。光学定数を Table 3 に示す。

レンズ系スペクトルメータの特長は、多数のレンズを組み合わせることにより、諸収差の補正が可能なことである。反射シュミット系では、球面収差、コマ収差を除くのみであるが、屈折系では多数のレンズを使うことによって、その他の像面湾曲、歪曲などの補正も可能である。

4.1 コリメータレンズ

航空機搭載イメージングスペクトルメータのように、比較的大きな画角を扱う場合には、反射鏡を使用した光

学系よりも複数のレンズを使用したほうが諸収差の補正が容易になる。補正すべき収差は、色収差、球面収差、コマ収差の三つである。光学系は、対物光学系とスリット、スペクトルメータ部から構成される。このうち対物光学系は短い焦点距離、小さな NA をもつ写真用広角レンズの使用が考えられるが、スペクトルメータ部のコリメータレンズは従来のアクロマートレンズでは色収差が大きく、使用できない。コリメータレンズの設計方針は、(1) 残存色収差の小さなガラスの組合せを求める、(2) 球面収差、コマ収差を補正する、という順序である。今回は、143 種類のガラスのなかから2枚または3枚のガラスを選ぶ、すべての組合せについて色収差の少ない、また各面の曲率が比較的大きくできる組合せを探した。143 枚のガラスから2枚を選ぶ組合せは約2万、3枚の場合は約 48 万通りである。

残存色収差の評価は、 t, r, C, d, F, g, h, i の8本の波長についての焦点距離の標準偏差で行なった。焦点距離の標準値 F は 100 mm である。

いま、分散 ν を $\nu = (nd - 1)/(nF - nC)$ 、分散 θ を $\theta = (nd - 1)/(ng - nF)$ と置き、各ガラスの焦点距離を f_1, f_2, f_3 、合成焦点距離を F 、また各ガラスの分散を $\nu_1, \nu_2, \nu_3, \theta_1, \theta_2, \theta_3$ と置くと、2枚構成レンズの場合 F 線と C 線についての色消し条件は

$$\begin{bmatrix} 1/\nu_1 & 1/\nu_2 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1/f_1 \\ 1/f_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1/F \end{bmatrix} \quad (1)$$

3枚構成レンズの場合、 F 線と C 線、それに g 線につ

いての色消し条件は

$$\begin{bmatrix} 1/\nu_1 & 1/\nu_2 & 1/\nu_3 \\ 1/\theta_1 & 1/\theta_2 & 1/\theta_3 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1/f_1 \\ 1/f_2 \\ 1/f_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1/F \end{bmatrix} \quad (2)$$

合成焦点距離 F は

$$1/F = \sum_j (1/f_j) = C_j \sum_j (n_j - 1) \quad (3)$$

ただし j は各レンズの番号、 C_j はトータルカーバチユアである。7本の波長についての平均値は

$$F_m = (1/7) \sum_j F_j \quad (4)$$

残存色収差 (R_c) を次式で評価する。

Table 4 Combination of two glasses with small residual chromatic aberration.

Glass 1	Glass 2	σ (mm)	F_1 (mm)	F_2 (mm)
K 51	LaK 58	0.00759	10.10753	-11.24402
FKS 51	SK 5	0.00987	23.13572	-30.09944
FKS 51	SK 14	0.01010	23.56902	-30.83700
KFS 51	LaK 31	0.01014	28.93996	-40.72607
FKS 51	LaK 21	0.01052	24.39920	-32.27373
SK 7	LaK 71	0.01096	7.98195	-8.67433
LaK 6	LaK 14	0.01121	4.40950	-4.61291
LaK 11	LaK 57	0.01134	6.32534	-6.75245
BaF 52	LaSF 52	0.01137	10.07013	-11.19776
LaK 6	LaK 57	0.01159	7.66330	-8.29930

The best 10 couples are displayed.

Table 5 Combination of three glasses with small residual chromatic aberration.

Glass 1	Glass 2	Glass 3	σ (mm)	F_1 (mm)	F_2 (mm)	F_3 (mm)
CaF 2	BaSF 8	KzFS 54	0.00834	-364.69573	10.04912	-11.52483
CaF 2	LaF 52	LaF 60	0.01006	-317.93433	6.71513	-7.36528
CaF 2	LaF 55	LaF 62	0.01448	328.52741	7.97115	-8.43908
CaF 2	BaLF 3	LaF 21	0.01691	313.76362	12.45266	-13.60706
CaF 2	BaF 10	LaSF 52	0.01824	215.30327	11.77448	-12.56691
FKS 51	LaF 54	LaSF 52	0.00095	46.99196	29.18519	-21.95670
FKS 51	BaF 52	LaSF 58	0.00169	65.11447	19.68684	-17.80851
FKS 51	LaK 12	LaK 66	0.00173	25.17813	-16.44175	32.15045
FKS 51	KF 51	LaK 58	0.00215	35.87729	37.42016	-22.42336
FKS 51	BaF 10	LaF 59	0.00219	45.64145	23.92896	-18.62188
BK 7	SF 5	KzFS 54	0.00272	34.98491	9.88864	-8.35353
BK 7	K 51	LaK 68	0.00606	-35.15879	7.17686	-9.91136
BK 7	LaF 54	LaSF 15	0.00630	-156.34786	9.38230	-11.08798
BK 7	BaF 52	LaF 60	0.00674	142.87237	9.02044	-9.27140
BK 7	K 51	LaK 62	0.00683	-27.38229	8.11373	-13.03306

The first glass is fixed as CaF 2 (fluorite), FKS 51 and BK 7. The best five pairs are displayed.

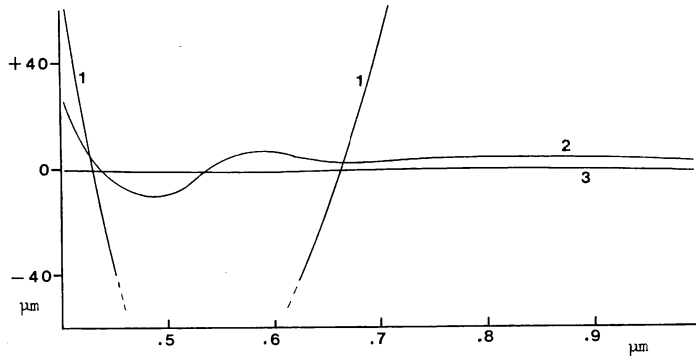


Fig. 4 Chromatic aberration characteristics. 1: BK 7-F 2 Achromat, 2: FKS 51-LaK 31 Apochromat, 3: FKS 51-LaF 54-LaSF 52 Apochromat.

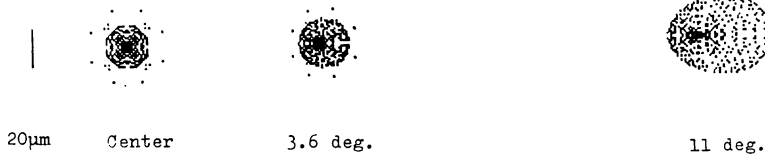


Fig. 5 Parallel ray spot diagram of collimator lens.

$$R_c = \sigma = \left\{ \frac{1}{7} \sum_j (F_i - F_m)^2 \right\}^{1/2} \quad (5)$$

この R_c 値は2枚または3枚のガラスの組合せの数だけ計算されるが、都合上、3枚構成の場合は、1枚をBK 7, CaF 2(蛍石) それに FKS 51 に固定した。Table 4, 5 に残存色収差の少ない順に組み合わせたガラス上位数種類を示す。表のうち、FKS 51 を使った2枚または3枚の組合せは、各レンズの焦点距離の絶対値が比較的長く、また $0.4 \sim 1.0 \mu\text{m}$ までの波長に対し焦点距離のばらつきが $10 \mu\text{m}$ 程度であり、スペクトルメータのコリメータレンズとして反射鏡よりも有用である。この色収差は球面収差よりも小さい。

Fig. 4 に BK 7-F 2, FKS 51-LaK 31, FKS 51-LaF 54-LaSF 52 の各組合せによる色収差曲線を示す。従来の代表的な BK 7-F 2 アクロマートはオーバースケールしているが、FKS 51-LaK 31 では $0.4 \sim 1 \mu\text{m}$ までの波長に対し $\pm 35 \mu\text{m}$, 3枚構成では $\pm 3 \mu\text{m}$ の範囲に入っており、色収差の面ではまったく問題のないコリメータが制作可能ながわかる。球面およびコマ収差は肉厚の薄いレンズのほうが少ないので、FKS 51-LaK 31 の組合せのうち、FKS 51 ガラスを二つに分離し、間に LaK 31 ガラスをはさむ方法で収差補正を行なった。レンズの第4, 第5面は接着とした。なおレンズのF値は4である。

Fig. 5 に 0, 10 および 30 mrad の平行なスキューレイに対するスポットダイヤグラムを示す。この角度は

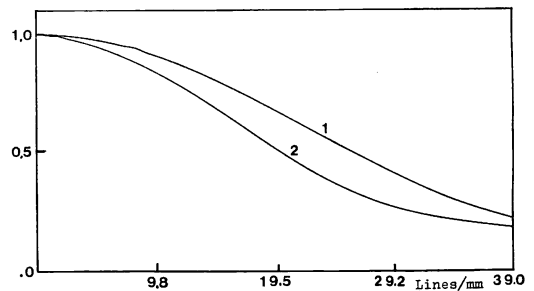


Fig. 6 MTF characteristic by spot diagram. 1: Spector (meridional) direction, 2: Line (sagittal) direction.

画角にしてそれぞれ 0, 3.6, 11° に相当する。Fig. 6 にコリメータに対してスキュー 20 mrad でのスポットダイヤグラムから求めた MTF を示す。この角度は視野中心から約 7° の方向である。スペクトル方向はレンズに対してサジタル方向、ライン方向はメリジナル方向で、ナイキスト周波数ではスペクトル方向の MTF は約 0.7 である。

4.2 分散光学系

スリット像のスペクトルへの分解には、グレーティングとプリズムが考えられる。グレーティングでは、スペクトル域が1オクターブしかとれないこと、分解能が $10 \sim 20 \text{ nm}$ よりもよくなることなどの理由のために、複合プリズムを使った。単一のプリズムでは、必要な分散が得られないこと、波長-分散が一意的に決まっ

Table 6 Exit ray angle of each spector by combination of glass materials.

<i>t</i>	<i>r</i>	<i>C</i>	<i>d</i>	<i>F</i>	<i>g</i>	<i>h</i>	<i>i</i>	deg. couples
13.00	13.04	13.04	13.05	13.06	13.07	13.07	13.07	0.07 PKS 1 LaK 68
13.25	13.30	13.31	13.32	13.34	13.35	13.35	13.36	0.10 PKS 1 LaK 66
12.69	12.72	12.73	12.74	12.75	12.76	12.76	12.77	0.08 BK 7 LaK 62
13.20	13.25	13.25	13.27	13.29	13.30	13.30	13.30	0.11 BK 7 LaF 52
13.47	13.52	13.53	13.55	13.57	13.58	13.59	13.59	0.12 BK 7 BaF 10
[more than 2.5 degree of dispersion]								
22.36	22.85	22.99	23.26	23.89	24.41	24.86	25.68	2.50 LaSF 65 FKS 51
22.98	23.49	23.63	23.90	24.56	25.11	25.58	26.43	2.60 LaSF 65 CaF 2
20.30	20.79	20.94	21.21	21.89	22.47	22.99	23.98	2.70 LaSF 64 FKS 51
20.08	20.53	20.67	20.93	21.57	22.12	22.61	23.54	2.53 LaSF 64 K 51
20.20	20.65	20.80	21.06	21.70	22.26	22.76	23.70	2.56 LaSF 64 K 7

Five most linear combinations are displayed.

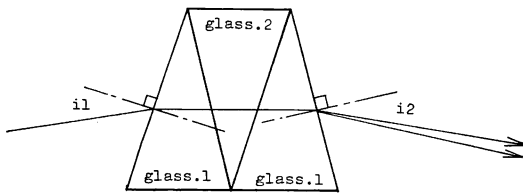


Fig. 7 Prism array structure.

てしまうことなどが複合プリズムを使う理由である。複合プリズムを構成する2種類のガラスを使った単プリズムは頂角 20°で、3個を複合した場合 0.4~1.0 μm までの波長範囲を 2.5°に分散させる能力をもたねばならない。ガラスは143種類あるので、143×142の約2万の組合せがあり、このうち分散が2.5°以上となる波長分散がリニアな組合せを **Table 6** に示す。また同時に分散の大小によらずリニアリティーのよい順も示した。**Fig. 7** に示すプリズムで、

$$i_2(\lambda) = f\{i_1, n_1(\lambda), n_2(\lambda)\} \quad (6)$$

$$\text{分散 } D(k) = \{i_2(k) - i_2(k+1)\} / \{\lambda(k) - \lambda(k+1)\} \quad (7)$$

$$D_m = (1/7) \sum_k D(k) \quad (8)$$

$$\sigma D = \{(1/7) \sum_k (D_k - D_m)^2\}^{1/2} \quad (9)$$

$$\text{リニアリティー} = \sigma D / D_m \quad (10)$$

Fig. 8 にリニアリティーのよい組合せ、分散が 2.5°以上になる組合せを示す。2.5°以上という条件をつければほとんどリニアな波長-屈折角を実現できることがわかる。逆に 2.5°以上という条件下ではリニアリティーについては単一のプリズムとほとんど差はない。

4.3 対物光学系

スペクトルメータ部のF値が4と比較的暗いこと、スリット長が8.8mmと長いこと、必要とされる画角が

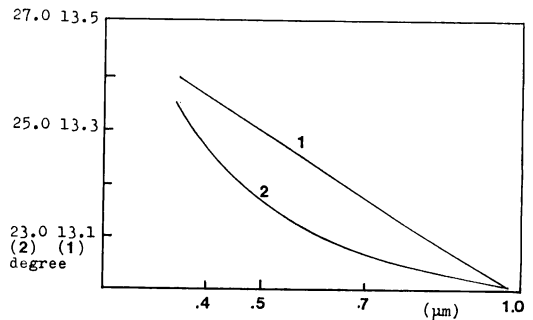


Fig. 8 Dispersion vs wavelength. 1: PKS 1-LaK 68, 2: LaSF 65-FKS 51.

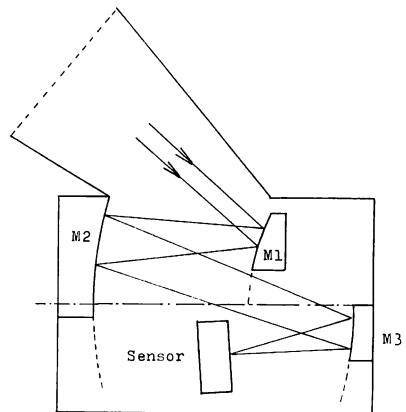


Fig. 9 Space patrol camera (NASA).

22°と広いことなどの理由により、今回は16mm F3.5の写真用広角レンズを使用した。色収差、明るさの点で少々不利である。

色収差がまったくなく、比較的大きな画角を扱えるものは従来、反射シュミット系のみとされていたが、22°

の広画角は扱えない。NASA のシャトル用宇宙パトリールカメラは Fig. 9 のような軸はずし 3 枚鏡系である (U.S. Pat. No. 4598981)。この系は 2 枚の球面鏡, 1 枚の非球面鏡を使用し, 縦 20° , 横 30° の画角がある。特許明細によれば, 焦点距離 36 mm, F 値 4 で, 口径食がなく, 平面像になるそうである。将来このような反射対物系の利用が有効であろうと考えられる。

5. ま と め

スペースシャトル搭載の SISEX は高高度から狭画角で地上をスキャンしていた。植物のモニタリングでは低高度, 大画角で高解像力でのスキャンが必要である。このような目的では従来の反射シュミット系では不都合で, 新たに光学系を設計する必要があった。今日では光学ガラスは数百種類もあり, それらのすべての組合せのなかから色収差の少ない 2 枚ないし 3 枚のガラスの組合せを探すという少々乱暴な方法により, 反射鏡に匹敵す

る色消しレンズを設計することができた。SISEX の MTF はナイキストで 80% あり, 今回のレンズではこれを少し下回った。しかし, 非球面を使わないレンズの組合せは制作が容易なこと, またさらに高性能な設計が可能なことなどのメリットがある。オーバーオールでの解像力, 必要な放射エネルギーなどについては別の機会に発表する。

文 献

- 1) A.F.H. Goets: "High spectral resolution remote sensing of the land," Proc. SPIE, **475** (1984) 56-67.
- 2) M. Herring and N.A. Page: "Development of the imaging spectrometer for shuttle and space platform applications," Proc. SPIE, **589** (1985) 9-24.
- 3) *Minolta Optical Glass* (ミノルタカメラ(株), 大阪, 1981).
- 4) 吉田正太郎: 望遠鏡光学・反射編 (誠文堂新光社, 東京, 1988).