

アストロメトリ衛星計画 (JASMINE 計画) における 長焦点広視野光学系の設計

矢野太平, 高遠徳尚, 小林行泰, 郷田直輝

(2003年9月30日受理)

Optics with a Large Focal Length and a Wide Focal Plane for Astrometry Satellite Mission (JASMINE Project)

Taihei YANO, Naruhisa TAKATO, Yukiyasu KOBAYASHI, and Naoteru GOUDA

Abstract

We have investigated the optical design for Japan astrometry satellite mission (JASMINE). JASMINE will measure parallaxes, positions and proper motions of stars in our Galaxy with the precision of 10 microarcsec in order to study the fundamental structure and evolution of the disk and the bulge components. In order to accomplish such measurements with high accuracy, the optics with a long focal length and a wide focal plane is requested. In 1977, Korsch proposed a three mirror system with a long focal length and a wide focal plane. Then Korsch system is one of the convincing models. However, the center of the field is totally vignetted because of the fold mirror. Therefore we consider the improved Korsch system in which the center of the field is not vignetted. Finally We obtain the diffraction limited optical design with small distortion.

1. はじめに

アストロメトリ観測では星の位置を正確に決定することが最重要課題である。従って、観測を行う光学系としては、位置決定精度を上げるために検出器上で、星像が数ピクセルにわたって焦点を結ばせる必要がある ($f\lambda/Dw = 2$: f 焦点距離, λ 波長, D 口径, w ピクセルサイズ) ので非常に長焦点であることが要求される。また、広いサーベイ領域で、出来るだけ多くの photon を溜めることが必要であるので広視野であることが望まれる。アストロメトリ観測用光学系はこの長焦点、広視野という二つの条件を満たす事が要求されるがそれは非常に困難である。さらに、位置天文観測においては大気揺らぎが大敵となるので、スペースでの観測が望まれる。実際、Hipparcos 衛星によるスペースでの位置天文観測の成功以来、星の位置決定精度は1ミリ秒角と飛躍的に上がった。それを契機に、ヨーロッパの ESA による GAIA 計画¹ をはじめとしてアメリカ NASA の SIM² など、位置天文衛星が次々に計画されている。こういったスペースでのアスト

ロメトリ観測を行うために出来るだけ大きな光学系を打ち上げ可能なサイズまでコンパクトに抑える必要がある。こういった条件を満たす光学系を設計する事は以下で述べるように容易ではない。この報告書では以上の条件を満たすような光学系の可能性を検討する。

光学系として現在最も一般的に用いられるのは2枚鏡である。2枚鏡では Ritchey-Chretien 系が非常に良く調べられている。Ritchey-Chretien 系は主鏡、副鏡ともに双曲面をもつ2枚鏡の系である。この光学系はシンプルでありながら、球面収差、コマ収差が同時に取り除かれるので、「すばる」をはじめとして HST など多くの光学系に採用されており、光学系の主流となっている。

もちろんアストロメトリ用の光学系としても有力な候補のひとつである。しかし、Ritchey-Chretien 系は像面湾曲が強くあらわれる事が知られている。特にここで考えているような長焦点では非常に強い像面湾曲が見られる。像面湾曲によく用いられる解決方法として補正レンズ系を入れる事が考えられるが、JASMINE 計画では非常に広視野を必要としているためこの像面湾曲を補正するのは相当困難である。また補正光学系のために発生する色収

¹<http://astro.estec.esa.nl//GAIA/>

²http://planetquest.jpl.nasa.gov/SIM/sim_index.html

差を取り除く事も、幅広い波長を用いる場合には困難をとまう。以上から、Ritchey-Chretien系で、長焦点、広視野のコンパクトな光学系を設計する事は非常に難しい。

以上の観点から、3枚鏡の光学系を考える。光学系はRitchey-Chretien系に比べて多少複雑になるが3枚光学系は2枚鏡に比べて自由度が増えるので球面収差、コマ収差に加えて像面湾曲も同時に補正できる可能性がある。さらに、補正レンズ系を用いずに補正が出来れば、色収差からも完全に解放される。そこで、我々は3枚鏡を基本にした光学設計を考えることにした。

3枚鏡の光学系として、Korschは1977年、モデルの一つ提案した。この光学系は比較的広視野で長焦点の光学系で、JASMINEの要求を満たす光学系の候補となり得る。実際、SNAPとよばれる衛星でもこれと同じ型のKorsch系の採用が予定されている。このKorsch系は2枚目と3枚目の鏡の間で一度焦点を結び、その後3枚目の鏡でもう一度焦点を結ぶ構造になっている。2枚目と3枚目の鏡の間で一度結ぶ焦点付近に光束を別の軸に出すための平面鏡が存在するために、このKorsch系の焦点面の中央で、像の欠落が存在する。Korsch系は広視野であるが、distortionなどの収差の小さい中心部が使えず、星の位置決定が重要なアストロメトリ観測には特に不利である。

以上で述べたKorsch系の長所、短所を踏まえて、我々は長焦点、広視野でかつ視野中心の欠落のない改良した光学系を見出した。

2. 光学系

2.1 JASMINE 光学系の仕様要求

まず、はじめに国立天文台で進められているJASMINE計画について簡単に述べておく。JASMINEとは、Japan Astrometry Satellite Mission for Infrared Explorationをあらわし、赤外線による高精度位置天文観測衛星の事である。この衛星はダストの影響を受けにくいz-band ($0.9\ \mu\text{m}$)の波長を用いて星の位置の観測を行いバルジを含む銀河面上の星をサーベイする計画である。この衛星で年周視差をはじめとし、位置、固有運動を $z = 15.5\ \text{mag}$ で $10\ \mu\text{as}$ の位置精度で決定することを目標としている。言い換えれば、銀河中心にあるバルジを含む10kpc以内の銀河の全域で10パーセント以下の誤差範囲で測定が可能である。これにより、銀河のディスクやバルジの力学構造や力学進化、更には恒星物理、星の形成と進化を明らかにするとともに、系外銀河観測による宇宙論への直接的リンク、惑星

系探査などのサイエンスも切り開く事ができる。

衛星の打ち上げロケットとしては、H-II Aを想定している。すなわち、H-II Aのフェアリングに入るサイズが要求される。また、 $10\ \mu\text{as}$ という高精度を出すために安定した熱環境が必要である。そこで、軌道としては太陽-地球のL2ポイントを考えている。この場所では、太陽と地球が同じ方向に存在し、熱的環境を安定に保つのに適している。またミッション期間は5年を計画している。

この報告書の本題である光学系に話をもどす。観測を行うための光学系の仕様要求を次に述べる。JASMINEとして考えている光学系は主鏡の口径2mである。焦点距離に関しては検出器上で星像サイズが2ピクセルにわたるよう設計する必要がある。具体的には、Point Spread Function (PSF)の典型的なサイズである λ/D が2ピクセルになるよう設計する。そのため、焦点距離は非常に長く、66.7mとなる。焦点面に関しては、アストロメトリ観測用として、1画素 $15\ \mu\text{m}$ で4K×2Kの検出器を162(9×18)個並べる。従って、焦点面サイズとしては $55.3\ \text{cm} \times 55.3\ \text{cm}$ となり実視野 $0.47^\circ \times 0.47^\circ$ となる。従って、以上の焦点面が十分に含まれる視直径0.75度の範囲において回折限界で決まる良像が得られるようにする。焦点面は検出器を多数並べる事を考えているので、できるだけフラットが望ましいが、より良い性能をよりコンパクトにする可能性を探るため若干の曲率を許すことにする。また、アストロメトリ観測では星の位置を正確に決めることが重要であるので、distortionはできるだけ小さいのが望ましい。またJASMINEの光学系のサイズとしてH-II Aフェアリングのうち比較的小さいもの(4m立方程度)に収まるように検討する。以上の要求を整理したものを表1にまとめておく。

表 1. 光学系要求一覧

口径	2 m
焦点距離	66.7 m
視野サイズ	$0.47^\circ \times 0.47^\circ$
焦点面	若干の曲率は許す
distortion	可能な限り小さく(1%以下)
光学系サイズ	H-II Aの比較的小さなフェアリングに入る程度

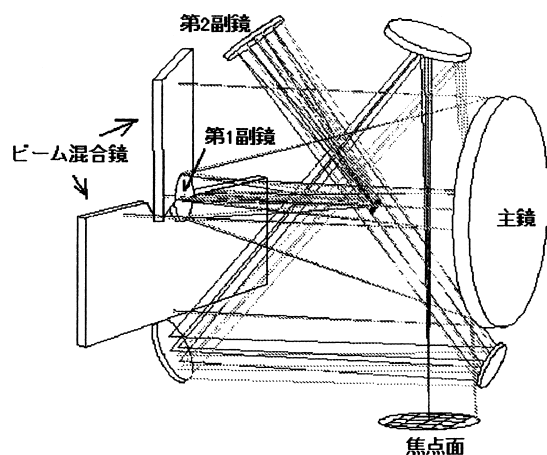


図 1. JASMINE 光学系の全体模式図.

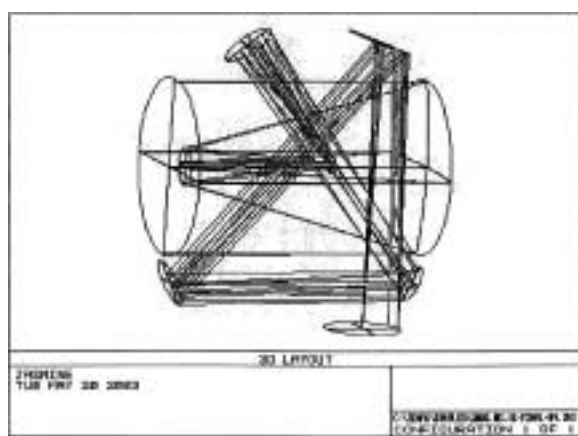


図 2. JASMINE 光学系 Layout (Korsch 系).

以上でのべた仕様要求を満たす光学系の可能性を検討した．その検討した光学系の全体図と個々の名称を示したものを図 1 で示す．

他の一般的な光学系と大きく異なる点は主鏡前方の第 1 副鏡あたりに二枚の交差する平面鏡があるが，これはビーム混合鏡とよばれるもので 2 つのフィールドを同一焦点面に取り込むものである．これは JASMINE 光学系特有のものであり，アストロメトリ観測に重要な役割を果たす．このビーム混合鏡で同時に 2 つのフィールドを観測しながらその 2 方向を含む大円上をサーベイする事により衛星の姿勢と星の位置を同時に決定する．この手法により星の高精度の位置決定が可能となる．その他の部分は一般的な光学系と同じであり非常に長焦点ながら，広視野である事が特徴である．長焦点，広視野光学系は JASMINE のみならず，様々な分野での需要が考えられる．そこでこの報告書ではビーム混合鏡を除く光学系部分に着目して議論を行う．

ビーム混合鏡を除いた光学系部分の Layout を図 2 に示し，その光学系の Surface Data を表 2 に示す．

この光学系は主に 2 m の主鏡と 43.1 cm，60.0 cm の 2 枚の副鏡の合計 3 枚の鏡より成る．主鏡は H-II A のフェアリングに入るよう焦点距離 3600 mm (F1.8) とし，副鏡により拡大し一度結像する．結像したところで平面鏡にて異なる軸へ光束をうつし，

表 2. SURFACE DATA SUMMARY

Surf	Type	Radius	Thickness	Glass	Diameter	Conic
OBJ	STANDARD	Infinity	Infinity		0	0
1	STANDARD	Infinity	3100		2040.579	0
STO	STANDARD	-7200	-2900	MIRROR	2000.91	-0.9861102
3	STANDARD	-2333.348	1750	MIRROR	430.6424	-5.174046
4	COORDBRK	—	0		—	—
5	STANDARD	Infinity	0	MIRROR	142.724	0
6	COORDBRK	—	-1800		—	—
7	STANDARD	3171.834	1800	MIRROR	600.1363	-0.7149477
8	STANDARD	Infinity	1700		402.7171	0
9	COORDBRK	—	0		—	—
10	STANDARD	Infinity	0	MIRROR	424.8411	0
11	COORDBRK	—	-2900		—	—
12	COORDBRK	—	0		—	—
13	STANDARD	Infinity	0	MIRROR	570.6581	0
14	COORDBRK	—	3633.333		—	—
15	COORDBRK	—	0		—	—
16	STANDARD	Infinity	0	MIRROR	758.6172	0
17	COORDBRK	—	-3300		—	—
IMA	STANDARD	-18670.66			872.8559	0

その像を第2副鏡(凹面鏡)にて拡大しつつ再度検出器上で結像させている。第2副鏡以降の光束はコンパクトにおさえるため、平面鏡にて3度折りたたんでいる。焦点面では若干の像面湾曲を許し、検出器を並べる時にある程度は吸収できるとする。像面の曲率半径は18.6mである。3枚の鏡に関してはすべて高次非球面を含まない単純な2次曲面で構成できている。第1の副鏡に関して Conic constant -5.17 と少し強い双曲面となっているが技術的問題

はないだろう。

図3に中心視野, 0.27° , 0.375° の3方向におけるスポット図を示す。スポットサイズとの比較のため, 2m鏡で波長 $0.9\mu\text{m}$ のエアリーディスクのサイズも同時に描かれてある。見ての通り, エアリーディスクのサイズに対して十分に小さくスポットが収まっており収差は非常に良好である事が読み取れる。

スポットサイズの定量的視野依存性を表したのが図4である。横軸は視野中心からの角度で測った距離, 縦軸はスポットサイズである。スポットサイズは典型的に見て $0.6\mu\text{m}$ である。JASMINE の設計ではエアリーディスクのサイズは検出器上でおよそ $60\mu\text{m}$ となり, それと比べて十分に小さい。1ピクセル $15\mu\text{m}$ と比べても十分に小さいサイズでありアストロメトリ観測に必要な精度が達成されていると考えられる。同様の内容を Wavefront error で示したのが, 図5である。横軸は同様に視野中心からの角度で測った距離で, 縦軸に RMS で示した Wavefront error を示している。Wavefront error を示した図5では回折限界の値も記してある。回折限界およそ 0.07 waves に対して error は視野全域にわたり, 0.001 wave 程度であり, この光学系は回折限界で決まる光学系であることが解る。

次に示す図6は, 視野の湾曲とディストーションをあらわす。図6の左は像面湾曲を示す図である。縦軸が視野中心から角度で表された距離で, 横軸に湾曲に関するずれが与えられており, これは 0.1 mm 以下に抑えられている。図6の右は像の歪みをあらわすディストーションが視野によってどの程度かを表している。視野中心から離れる程大きい最大でも 0.02% 程度であり, 十分に小さいと考えられる。グリッド上のそれぞれの場所でのディストーションによるずれの量を表したのも図7に示しておく。図上でのずれの量は実際の100

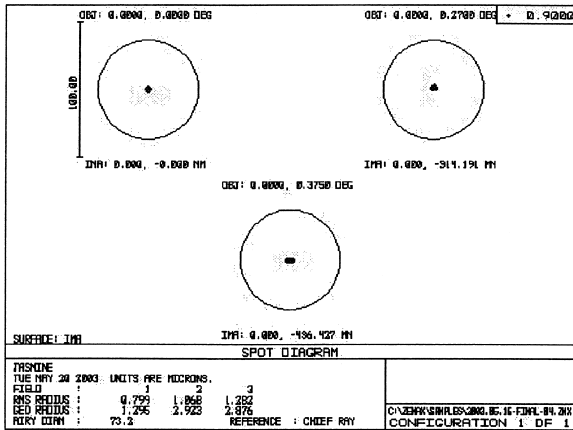


図3. JASMINE 光学系のスポットダイアグラム。

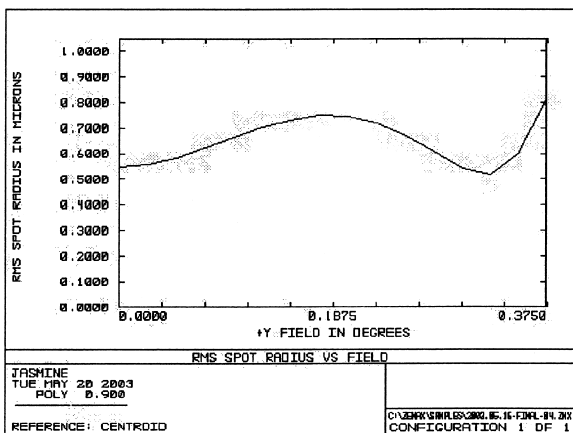


図4. スポットサイズの視野依存性。

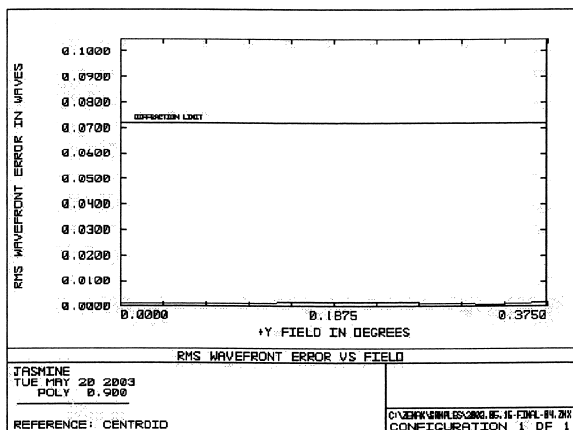


図5. RMS Wavefront error.

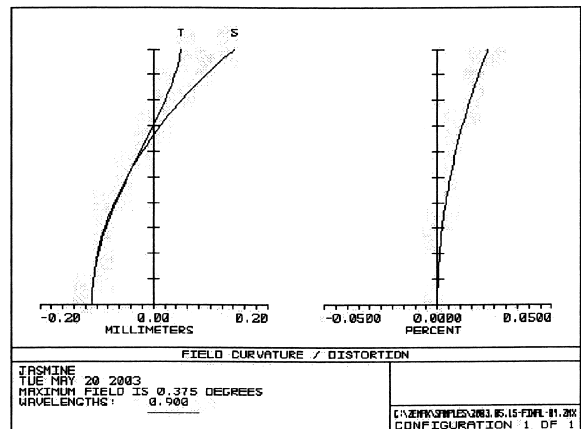


図6. Curvature と Distortion.

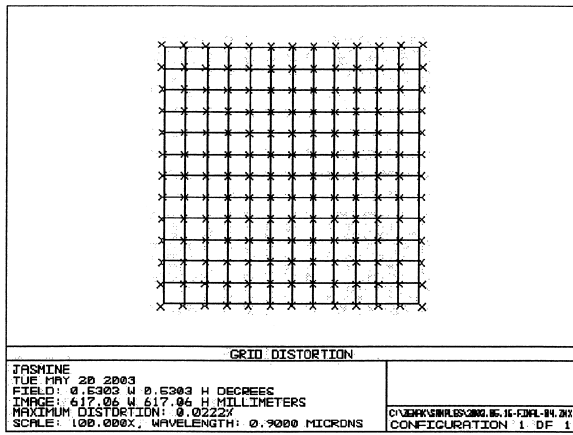


図 7. Grid Distortion.

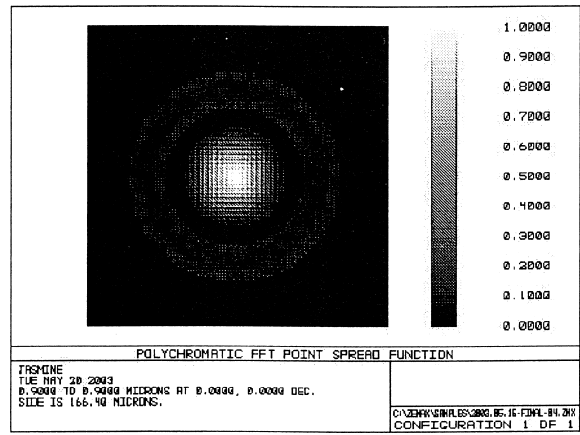


図 10. ビーム混合鏡を除いた光学系の PSF .

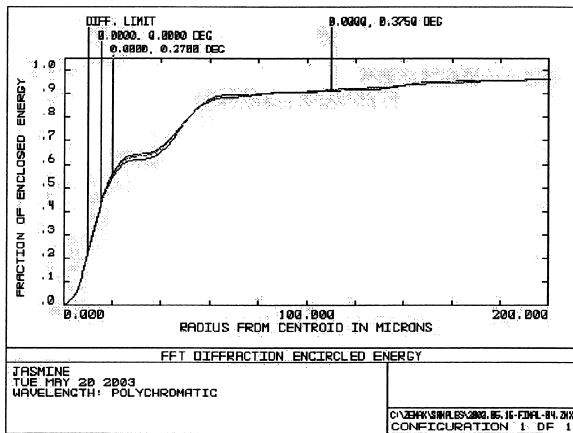


図 8. Encircled Energy.

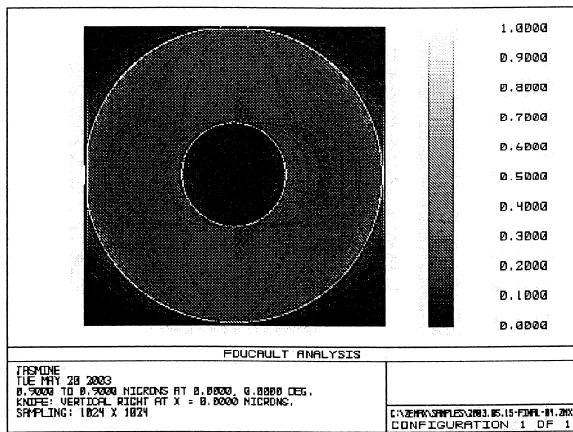


図 9. フーコーテストパターン .

倍に拡大している .

次に、PSF がどのような形状になっているかを見る . 中心からある半径内に占めるエネルギーの割合を示す Encircled Energy Fraction を図 8 に表す . 最初の Dark ring の場所、すなわち $30\ \mu\text{m}$ での Encircled Energy は 63% 程度となっている . 理想的な円開口での PSF では 84% 程度となるが、副鏡による中心遮蔽があると一般には最初の Dark ring での Encircled Energy は小さくなる . 開口形状は

次のフーコーテストパターンより読み取る事が出来、図 9 に表す . 既に述べたように、スポットサイズが十分に小さく設計されているので、フーコーパターンは非常に均質である . ここで示された中心の遮蔽は副鏡によるもので、この光学系の開口の形状を表している . 中心の遮蔽の割合は 35% 程度であり、エアリーディスク内での Encircled Energy が 63% 程度となっているが、これは多くの光学系と同程度である .

PSF に関しては図 10 のようになる . 中心遮蔽された開口形状であるため、エアリーディスク内での Encircled Energy が 63% 程度となる分、First ring の明るさが若干強まっている .

以上、検討した光学系の収差、性能評価などを見てきたが JASMINE で行われるアストロメトリ観測に必要な精度が得られており、最終的な候補のうちの一つとなり得る .

3. まとめ

長焦点、広視野の光学系は JASMINE 計画のみならず、非常に幅広い需要が考えられ、今後ますます、重要性が高まると考えられる . その長焦点、広視野の光学系として、Korsch 系を基にした 3 枚鏡系を検討した . JASMINE では、視直径 0.75 度の広視野が必要であるが、その視野全体にわたって回折限界を十分に下回る wave front error となる光学系の候補が得られた . 従って、高精度アストロメトリ観測に耐えうる 3 枚鏡系の可能性が得られた . 像の歪みであるディストーションに関しても最大値で 0.02% と十分に小さい視野が得られ、アストロメトリ観測に適した視野を得ることができた . 鏡のみでの設計なので、もちろん完全に色消しである . 2 軸 Korsch 系の場合、焦点近くに光束をさえぎる平面鏡が存在する事により視野の欠落が心配であるが、その欠落が起こらないように工夫した結

果,ケラレのない視野を得る事ができた。これにより収差の少ない視野中心部を有効に活用できる仕様になっている。焦点面はより良い視野を実現し,かつ光学系がコンパクトになるようにするため,若干の曲率を許して設計をしたが,曲率半径は 19m と大きく問題はないと思われる。最終的には,H-II A のフェアリングを想定したサイズに収まる範囲で JASMINE の要求を満たす光学系の設計が可能である。

謝 辞

光学系全般にわたり,ご指導いただいた大坪政司氏に感謝申し上げます。また,鹿島伸悟氏には多くの助言をいただきました。最後に,様々な議論をしていただいた JASMINE 関係者の皆様に感謝します。

参考文献

- 1) Korsch, D.: *Appl. Opt.*, 16, 2074 (1977).