

氏 名 辛 準 鎬

学位(専攻分野) 博士(理学)

学位記番号 総研大甲第317号

学位授与の日付 平成10年3月24日

学位授与の要件 数物科学研究科 天文科学専攻

学位規則第4条第1項該当

学位論文題目 Interpretations on the Physical Quantities  
of the Solar Coronal Plasma Obtained from  
the Restored Images of Yohkoh Soft X-Ray  
Telescope

論文審査委員 主査教授 小杉 健郎  
教授 櫻井 隆  
教授 唐牛 宏  
教授 小川原 嘉明(宇宙科学研究所)  
助教授 馬場 直志(北海道大学)

## 論文内容の要旨

The Soft X-Ray Telescope (SXT) aboard Yohkoh has allowed us to study the details of three dimensional structures of coronal magnetic loops since it was launched in 1991. However, according to the finite width of the point spread function (PSF) of the SXT mirror, it is expected that a certain amount of blurring effect, together with noise in the data, is inherent in the observed images. Thus it is necessary to subtract these components from the observed images for using those images for both morphological and photometric purposes.

Nevertheless, due to the effect of undersampling by a large pixel size of CCD, the application of the general algorithms for the image restoration to the SXT images has always shown unreasonable structures. Therefore, without increasing the sampling density of the observed images it is impossible to restore the images in a reasonable way. But a simple adoption of smoothing kernel in increasing the sampling density must be dangerous because it changes the whole intensity distribution of the observed images in an uncontrolled fashion. Especially, for a photometric purpose, the photon flux inside each pixel of the CCD should be conserved during the enhancement of the sampling density. For this reason, we have developed a new method for increasing the sampling density for Yohkoh SXT images. A concept of variance optimization in/between pixels has been applied to a two dimensional discrete distribution of intensity data. The results from the simulations have proved that our method of sampling density enhancement is successful and applicable to the reconstruction of the undersampled images. Also, for the successful performance of the deconvolution of the densely-sampled SXT images, it is necessary that the PSF measured from the ground experiments should also be corrected for the undersampling effect. We have acquired the best-fit of the PSF to the ground experimental data under the consideration of undersampling effect. It is revealed from our results that the core of the Moffat function which models the PSF is smoothly connected to the scattering wing at the distance of about 6 pixels from the peak.

The studies introduced above have made it possible to restore the observed Yohkoh SXT images satisfactorily. Several well-known algorithms have been applied to the deconvolution of the observed images for finding out a reasonable

solution. Compared to the observed images, the contrast of the restored images become much improved by the subtraction of the blurred component. Thus the results of the restoration show more clearly features of the coronal loops which were seldom shown previously from the observed images. However, some clumpy structures found in the restored images imply that the noises inherent in the observed images should be suppressed more. Because the actual size of the noise peaks is often larger than the full width at half maximum of the PSF, only a normal consideration of regularization of the noises would not be enough for the case of Yohkoh SXT images. Therefore, it is needed to adopt a certain method of suppressing the noise peaks whose size is similar to that of the PSF.

Using the restored images of SXT, several physical quantities have been calculated as case studies. It is revealed in our study that the blurring effect makes systematic differences in the two dimensional distribution of physical quantities. Also noisy components inherent in the dark area have produced unrealistic structures in the temperature map. Sometimes the degree is so severe that it misleads us in the interpretation on the situation of the solar corona. There is no doubt that, without performing the restoration of the observed images, it is hard to avoid a systematic artefact in the interpretation of various physical quantities. It is our conclusion that the correct information on the solar coronal plasma can be obtained from the observation of Yohkoh SXT, only after the blurred components and the noises are subtracted from the observed images.

## 論文の審査結果の要旨

辛準鎬君の学位論文は、(1)「ようこう」軟X線望遠鏡の画像改良法の開発と提唱、(2)これを用いた太陽コロナのプラズマ物理量推定、のふたつで構成されている。

太陽観測衛星「ようこう」搭載の軟X線望遠鏡は、斜入射反射鏡にCCD検出器を組み合わせた撮像装置であり、異なるフィルターを通して得られる画像を比較することで、X線を放射する太陽コロナ・プラズマの温度（及び密度）診断ができる。幾何光学的に決まる反射鏡の分解能は太陽全面にわたって2.5秒角（半値幅）ほどであるが、CCDの画素サイズにも、望遠鏡筒の長さ、広い視野の実現、CCDの製作などの諸条件の妥協点として、2.5秒角が採用されている。つまり、分解能の半値幅の中に最低2画素程度は入るべきとする、通常のサンプリング条件は満たされていない。また、鏡面の荒さに起因するX線散乱も極力小さく抑えられているが、無視できるほどには小さくない。このような条件下で観測対象の温度等の物理量を精密測定するためには、望遠鏡の実効分解能（光学系としての分解能と有限画素サイズとで決まる）と散乱X線成分とによる像のわずかな「ぼやけ」をも補正する必要がある。

斜入射反射鏡の点源応答関数（Point Spread Function; PSF）は、幾何光学的に決まるコア成分と、散乱成分であるハロー成分とに大別される。前者に関しては、打ち上げ前の地上実験から、上記の2.5秒角の画素で平均化した、およその形状が決められていた。また、後者についても、ほぼ点源と見なせる太陽フレアの露出超過撮像結果を用いて、一定の推定値が得られていた。辛君は、これらの先行する仕事を再解析し、これまでの仕事では画素が有限な大きさを持つことが適切に取り扱われていなかったために、様々な問題が起こっていたことを指摘し、さらにPSFについて簡単な関数形を仮定することで、その最良推定値を得ることに成功した。辛君は、最良PSFの推定にあたって、波長依存性を持つハロー成分については、理論的なモデルを導入し、実測の不足を補っている。すなわち、「ようこう」軟X線望遠鏡の反射鏡の散乱特性（散乱強度が距離の $-2$ 乗で減少）はそれ以前のX線望遠鏡（ $-3$ 乗くらいで減少する例が多い）とは異なっているので、鏡面の荒さのパワースペクトルとして新しい形を導入し、「ようこう」のX線散乱の特性を再現できるようにした。導入したモデルの妥当性については、最終的に評価できるだけのデータがまだ揃っていないが、現時点で最も精密なモデルであることは間違いない。

PSFが正しく決定できれば、観測画像から望遠鏡による「ぼやけ」を除去して、観測対象自身の輝度分布を推定することができる。この「デコンボリューション」問題の解法は一意的ではないが、辛君は、(1)有限サイズの画素によって観測されたX線の検出光子数が保存されるという条件を満たしつつ、解の“滑らかさ”を基準として、一画素を $4 \times 4$ 程度に細分する実用的な方法を開発、(2)これを用いて観測画像を細分化し、(3)細分化された画像に最大エントロピー法や Lucy-Richardson Algorithm等の広く使われている

「デコンボリューション」問題の解法を適用して、「ようこう」衛星の軟X線望遠鏡の撮像データに関して良好な結果が得られることを示した。すなわち、「デコンボリューション」補正後の画像は、観測画像に比べてX線強度の最大値が30%程度増加し、構造はシャープになり、暗い部分はさらに暗くなるなどの効果がみられ、コロナのループ構造が鮮明に再現できるようになった。

太陽コロナのプラズマ物理量の推定の部分では、まだ幾つかのフレアについて、解析が始められたところである。辛君は、上記の「デコンボリューション」を2種類のフィルターでの画像に適用し、補正された画像の強度の比からフレアの温度分布を求めた。その結果は、X線強度の高い部分では補正前の画像から得られた温度分布を追認するものであったが、X線強度の低い部分では「デコンボリューション」の効果で温度推定に無視できない差を生じている。今後、さらに多数のフレアの解析を進め、比較的暗い領域の温度分布など、これまで研究されてない領域での研究が進むことを期待させるものであった。

以上をまとめると、本論文は、「ようこう」の軟X線望遠鏡の点源応答関数を徹底的に解析して決めたこと、画素サイズが望遠鏡の分解能程度という不十分なサンプリング条件のもとでも「デコンボリューション」がある程度までは可能であることを示し、その手法を開発したこと、など、主としてデータ解析手法の面でオリジナリティを認めることができる。実際の観測例への応用はまだ少数であり、太陽物理学としての成果につなげるには、さらに今後の研究の継続が必要であるが、手法の確立と解析の第一歩を達成していることは評価でき、審査委員全員一致で、学位論文として合格と判定した。