

機関番号：82645

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009～2010

課題番号：21740360

研究課題名（和文） 地球・惑星外圏発光の特性 X 線を多波長同時観測する反射鏡の開発研究

研究課題名（英文） Develop study of reflector mirror for characteristic X-rays emitted at the earth and planetary exospheres.

研究代表者

山崎 敦 (YAMAZAKI Atsushi)

独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・助教

研究者番号：00374893

研究成果の概要（和文）：

地球・惑星外圏プラズマの光学観測には、構成要素に対応する複数の輝線を同時に効率よく観測できる広視野の明るい光学系が必要である。本研究では、主要な構成要素である炭素イオンと酸素イオンの特性 X 線に対して同時に高い反射率を有する二重多層膜鏡の設計・試作を実施し、光学特性を取得、さらに真空デシケーター内で保管し経年変化を調査した。多層膜間の界面拡散は測定されず、反射率と膜構造は安定していることが判明した。

研究成果の概要（英文）：

The studies of the earth and planetary exospheres require unique optics for its optical observation, such as a bright optics, and a high sensitivity at several emission lines. In this study a two-tiered multi-layers coated mirror is designed for the simultaneous observation of the Carbon and Oxygen ions emissions, which are the main components of the planetary exospheres. The results of the X-ray structural analysis for the evaluation of the temporal degradation at one-year interval show that the mirror remains unchanged for the layer structure and predict to hold the reflectivity at the range of the wavelengths.

交付決定額：

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	2,500,000	750,000	3,250,000
2010 年度	900,000	270,000	1,170,000
総 計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・超高層物理学

キーワード：地球惑星電離圏, 特性 X 線

1. 研究開始当初の背景

数ある X 線観測衛星うち Chandra 衛星や XMM Newton 衛星が近年木星にその視野を向け、木星表面で最大数十レイリーの X 線オーロラ現象を発見した[図 1: Gladstone et al., 2002]。低緯度と高緯度各領域で異なる強度発光・異なる時間変動をすることが発見され、低緯度発光は時間変動が太陽 X 線の増光曲線に酷似していることから主に太陽反射光であること、高緯度での発光現象は X

線スペクトル観測から多価の酸素イオンや硫黄イオンの特性 X 線であることを判明している[Bhardwaj et al., 2005]。また、中性の惑星外圏大気と太陽風起原プラズマが直接衝突し特性 X 線を発光していることも観測されている。すざく衛星の X 線分光観測で明らかとなった地球ジオコロナと太陽風プラズマの電荷交換に起因する発光現象がその一例である[Fujimoto et al., 2007]。こうした惑星外圏での X 線発光は、高エネルギー

一の太陽風プラズマあるいは磁気圏プラズマと外圏中性粒子の相互作用が引き起こす現象であり、惑星大気が散逸する現場の発光現象といえる。したがって、X線撮像観測を実現できれば、惑星大気進化の現場を捉える画期的な観測方法を習得することとなる。しかしながら、X線による惑星観測は歴史が浅く上述した狭視野の観測例に限られている。木星以外の惑星のX線撮像観測はまだなく、リモートセンシング観測の最大の利点である大局的な空間分布の観測は未だ行われていない。

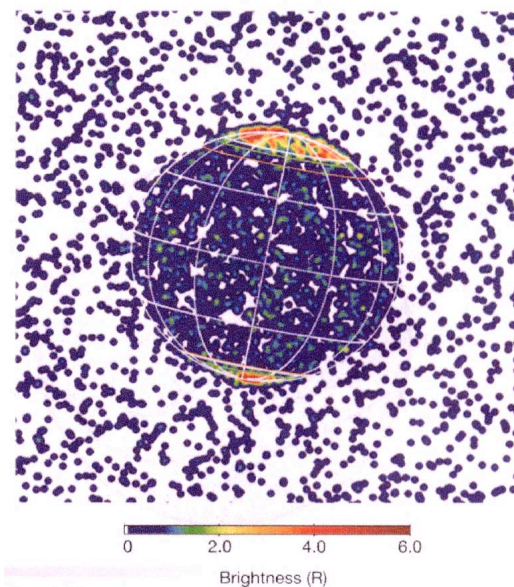


図1 Chandra 衛星によって観測された木星 X 線オーロラ [Gladstone et al., 2002]

木星 X 線オーロラにおいても、プラズマ総合観測との同時 X 線観測は未実施のため、スペクトル観測から存在が予想されている多価イオンの起源、紫外オーロラ発光との領域や増光の応答関係、太陽活動度依存性など磁気圏物理に関わる多くの課題は議論が始まった段階にすぎない。より理解を深めるためには、高空間分解能観測が必須であり、発光現象に十分に接近する必要がある。近距離からの撮像観測が要求されることから、広視野の明るい光学系が必要となる。さらに観測対象となる惑星外圏・電離圏で発光している軟 X 線はその場に存在するプラズマの 1keV 以下の低エネルギー特性 X 線であり、存在する複数の輝線を同時に効率よく観測するよう設計する必要がある。つまり、地球・惑星外圏観測用軟 X 線撮像機器には、広視野かつ複数輝線の同時に観測することが要求され

る。これら要求項目は私がこれまで関わってきた地球・惑星電離圏プラズマを可視化する極端紫外光望遠鏡開発と同じ課題であり、直入射直焦点光学系が有効である [Yamazaki et al., 2003]。一枚の多層膜反射鏡の焦点面に二次元位置分解可能な検出器を置き、反射鏡と検出器の中間に配置したバンドパスフィルターにて分光する撮像観測器である。X 線撮像器には、検出器でエネルギー分解し分光撮像観測できるので、本研究では鍵となる光学素子である直入射型多層膜反射鏡の開発に主眼をおく。惑星超高層大気的主要な構成要素であり、宇宙空間とのやりとりが惑星大気進化そのものである酸素・炭素イオンの特性 X 線に着目し、この 2 種の特性 X 線を同時に効率よく反射する二重多層膜鏡の開発研究を行う。1keV 以下の軟 X 線領域で直入射光に対し、Sc と Cr および W と B₄C からなる多層膜コーティングが高反射率を有する [Eriksson et al., 2003]。炭素イオンの特性 X 線より高いエネルギーを持つ酸素イオン特性 X 線のほうが物質を透過しやすいことを利用し、炭素イオン特性 X 線用多層膜の下に酸素イオン特性 X 線用多層膜をさらに重ねることにより、同時に 2 種の特性 X 線を効率よく反射できるとの着想に至り、その実現可能性を調査した。

本研究にて地球・惑星 X 線観測器の根幹光学素子となる二重多層膜反射鏡の開発に成功した場合、これまで観測がなされていない太陽風-惑星圏間のプラズマ・中性大気相互作用の可視化に向けて大きな一歩を踏み出すこととなる。プラズマ・中性大気相互作用は、惑星大気進化研究において最重要なパラメータである大気散逸量の推定に必須の研究対象である。探査機からの地球・惑星 X 線撮像観測は、太陽活動度依存性、季節変化など、惑星大気進化を紐解く決定的な手段となるに違いない。

2. 研究の目的

宇宙科学における X 線観測はブラックホールの発見、超新星残骸や宇宙線加速現場の観測など天文学分野で大きな成果を挙げている。一方で地球惑星科学のプラズマ物理学分野の X 線観測は歴史が浅く、Chandra 衛星や XMM Newton 衛星による木星 X 線オーロラや、すざく衛星による地球ジオコロナと太陽風プラズマの電荷交換反応による特性 X 線発光が近年確認されたところである。これら地球・惑星外圏・電離圏での X 線発光が太陽風プラズマとの相互作用の結果であることを考慮すると、X 線発光分布は現在の地

球・惑星大気の散逸過程の結果を反映しているといえる。上述の観測例は狭視野望遠鏡による観測であり大局的な空間分布の取得やその時間変動観測には至っておらず、地球・惑星大気進化解明には十分な観測結果は得られていない。今後の観測では、1keV以下の低いエネルギー帯に点在する複数粒子種の特性X線の空間変化・時間変化の分離が必須となる。つまり複数輝線の発光空間分布を同時に観測ができることが必要である。広視野条件を考慮すると適合する観測器光学系は直入射光学系であり、多波長で同時に高反射率をもつ多層膜反射鏡、エネルギー分解能を有する検出器、およびバンドパスフィルターが必須の光学要素となる。このうち軟X線直入射型多層膜反射鏡に開発要素が残っており、複数特性X線の反射率を同時に高めることを本研究の目的とする。具体的には、酸素・炭素イオンの特性X線の反射率を同時に高める多層膜を設計し、試作した反射鏡の反射率の光学特性を取得することが目的である。さらに、多層膜コーティングの層間拡散による反射率経年変化を計測することを目的とする。

3. 研究の方法

開発項目は、観測対象となる炭素イオンと酸素イオンの特性X線に適した多層膜をそれぞれに設計し、2種類の多層膜を重ね2波長を同時に高い反射率を有する二重多層膜鏡の設計・試作を行うことである。試作後にX線構造解析と反射率測定を実施し、想定通りの二重多層膜が成膜されていることを確認する。また、1年間をかけて経年変化を取得し、多層膜間の界面拡散が発生せず反射率と膜面構造は安定して存在することを確認する。

炭素イオンと酸素イオンの特性X線に適した多層膜の材質は、Sc/CrとW/B₄Cと多層膜コーティングが有効であることが知られている。各コーティング金属の光学定数の文献値[edited by Plaik, E. D., 1985, 1991]を使用して、各多層膜の膜厚や層数の最適値を設計する。2種類の多層膜コーティングを重ね、計算機シミュレーションから両輝線の反射率を高める条件を求め、製作が現実的である二重多層膜設計を行う。製作はメーカーに依頼する。試作完了直後にX線構造解析と反射率測定を実施し、想定通りの二重多層膜が成膜されていること、二重の多層膜鏡が酸素イオン、炭素イオンの特性X線にて高反射率を得ることが出来ること確認する。

その後、反射鏡の光学特性の経年変化を

測定する。湿度が高いと層間拡散の発生が早まり、二重多層膜の光学特性劣化が早く進むと考えられるため、保管環境は真空デシケータによる真空条件とする。反射率測定を定期的に1年間かけて実施し、経年変化率や実用期間を確認し、実用化へ向けた検討データとする。さらに、1年後にX線構造解析を実施し、二重多層膜の各層の界面状態を確認する。

ただし、想定通りに光学特性に製作前の計算値と測定値に不一致がみられる場合には、取得した光学特性から本反射鏡に蒸着された金属層の光学定数の推測を行い、次回が多層膜設計に有意義なデータを蓄積することを想定する。

4. 研究成果

炭素イオンと酸素イオンの特性X線の波長は、それぞれ4nm、2nmである。各派長用多層膜の層厚最適値は、使用する金属の光学定数からそれぞれCr(0.92nm)/Sc(1.09nm)、W(0.41nm)/B₄C(0.59nm)と求められる。この2種類の多層膜を重ね二重多層膜とした。それぞれの多層膜層数をパラメータとした計算機シミュレーション結果から、50層と100層の多層膜を重ねた二重多層膜が有効であることが判明した。反射率計算値を図2示す。炭素イオンと酸素イオンの特性X線の波長で反射率ピークを有していることが見てとれる。同時に高次の共鳴線である波長1nmにも反射率ピークが存在することが判明した。この波長帯に地球・惑星外圏で発光する特性X線が存在すればさらに他輝線の発光観測も可能であることを示唆しているが、最適解の導出は本研究の範囲外である。

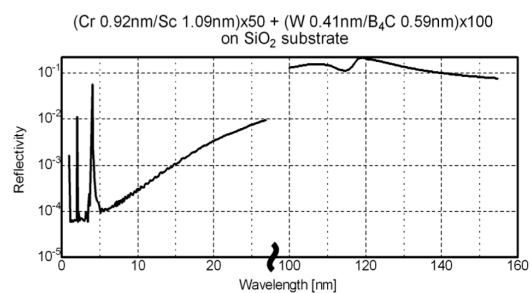


図2 最適設計の二重多層膜の反射率計算値。横軸は波長、縦軸は反射率を示す。

最適設計値で二重多層膜を試作し、保管期間前後でCu-K α の特性X線を用いてX線構造解析を実施した。その測定結果を図3に示す。結果は、保管前後で成膜構造は変わっていないことを示しており、危惧していた多層膜間の界面拡散は測定されず、反射率と膜

面構造は安定していることが判明した。また、反射率測定からも膜構造は安定しているという結果が得られている。

学研究所・助教

研究者番号：00374893

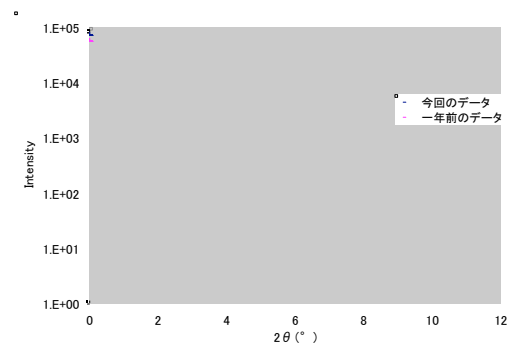


図3 保管前後での二重多層膜のX線構造解析結果。青色が保管前、赤色が保管後の結果である。

以上の結果から、本研究で設計・試作した二重多層膜鏡は、炭素・酸素イオンの特性X線の反射率を同時に高めることに成功し、真空条件で保管することによる経年変化も抑えられることが判明した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計0件)

〔学会発表〕(計2件)

1. Yamazaki, A., Designs of two-tiered multi-layers coated mirrors for remote sensing of planetary ionospheres, 地球惑星科学関連学会2011年合同大会, 2011/5/26, 幕張メッセ.

2. 山崎敦, 木星X線オーロラ観測に向けた反射鏡の開発、第11回惑星圏研究会、2010/3/15、東北大学。

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究代表者

山崎 敦 (YAMAZAKI Atsushi)

独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科