

2024年度 05) 奨励共同研究 目次詳細

4 件

*所属・学年は2025年3月現在

*Affiliation and Year of graduate school displayed are current as of March 2025.

| 研究代表者 Principal Investigator | 所属機関* Affiliation | 所属部局* Department | 学年* Year of graduate school | 研究課題名 Project Title | 頁 Page | 備考 Remarks |
|---------------------------------|----------------------|---------------------|--------------------------------|------------------------------------|-----------|---------------|
| 寺田雄亮 | 東京大学 | 理学系研究科 地球惑星科学専攻 | 博士後期課程3年 | エネルギーフラックス解析の海洋大循環モデルへの適用 | 189 | |
| 北島慎之典 | 防衛大学校 | 理工学研究科 | 博士後期課程2年 | 太陽フレア放射による地球電離圏への影響評価と地球大気電離モデルの構築 | 191 | |
| 大窪遼介 | 防衛大学校 | 理工学研究科 | 博士前期課程2年 | 太陽におけるライマン線放射の特徴とその地球電離圏への影響 | 193 | |
| 溝手雅也 | 甲南大学 | 理工学部 | 博士後期課程2年 | 半導体検出器SiPMに搭載する集光器の開発 | 195 | |

エネルギーフラックス解析の海洋大循環モデルへの適用
Application of Seamless Energy Flux Analysis to Ocean General Circulation Model

寺田雄亮、東京大学理学系研究科地球惑星科学専攻、博士後期課程3年
升本順夫、東京大学理学系研究科地球惑星科学専攻、教授

研究目的

赤道海洋の中層(深さ約500-2000m)ではEquatorial Deep Jets (EDJs)と呼ばれる東向きと西向きの流れが縦に積み重なった特徴的な流速場の構造が知られている。EDJsは数年から十数年の周期でゆっくりと変動しており、赤道上を東西に伝搬する波動として解釈されている[1]。しかしながら海面や海底から離れている海洋中層にはこのような波動を直接励起できるエネルギー源は存在しないため、EDJsの形成を考えるためには離れた場所からのエネルギー供給プロセスを考慮する必要がある。近年、東赤道太平洋において海面付近で励起された数ヶ月周期の波動が下向きにエネルギーを輸送していることが報告され[2]、EDJsの主要なエネルギー源である可能性が示唆された。そこで本研究では数値シミュレーションを用いてEDJsと表層起源の数ヶ月周期波動を再現し、両者の関係を定量的に評価する。

実施内容

太平洋赤道域におけるEDJsおよび表層起源の数ヶ月周期波動を再現するため、MITgcm [3]を用いて理想化海洋モデルを構築した。計算領域は太平洋の20°Sから20°Nとし、海岸線を側面境界として与えた。海面に貿易風を強制として与えた数値実験の結果、海面付近で励起された数ヶ月周期波動による、下向き・東向きのエネルギー輸送が海盆東部で再現された(図1)。加えて赤道中層では東向きと西向きのジェットが数百メートルごとに縦に積み重なった構造が現れ、EDJsの特徴が再現された(図2)。また再現されたEDJsの周期は約15年であり、観測から推定された周期[1]と矛盾しないものであった。

次に数ヶ月周期波動とEDJsの関係を評価するため、計算結果に対して75日の時間フィルターを用いて両者を分離し、EDJsのエネルギー収支を評価した(図3)。EDJsの主要なエネルギー源は数ヶ月波動との相互作用項($-\bar{u}\partial(\bar{u}^*v^*)/\partial y$)であり、これは大西洋に注目した先行研究で提案された、数ヶ月周期波動によるEDJsの維持メカニズム[5]が赤道太平洋東部でも有効であることを示唆している。ただ、EDJsへのエネルギー供給は東部に局在しているのに対して、EDJsの振幅は西岸から東岸までほぼ一定であり(図2)、表層起源の波動からのエネルギー供給のみではEDJsの構造を説明することができな

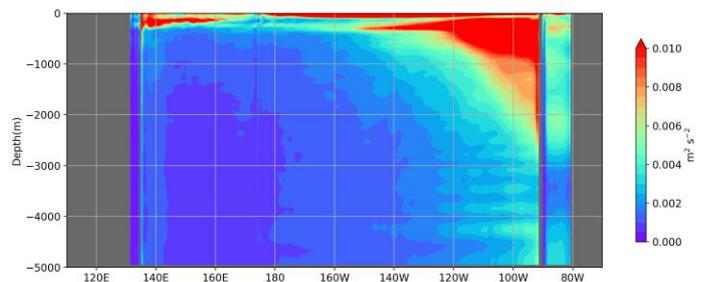


図1 積分開始後 50-100 年目の赤道上、深さ-経度断面における数ヶ月周期波動のエネルギー分布。

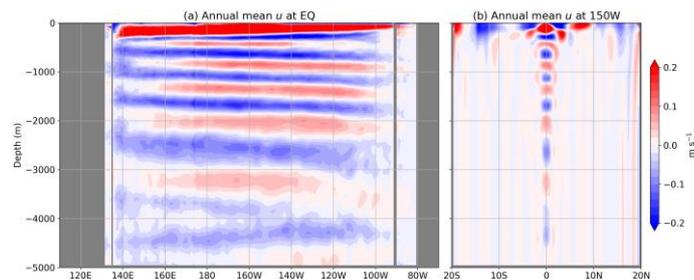


図2 積分開始後 61 年目の(a)赤道および(b)150°W における東西流速の年平均値。

い。ここでEDJsは十数年周期の波動であると解釈することができるため[1]、EDJs自身がエネルギーを東西方向へ再分配している可能性がある。

この仮説を検証するため、名古屋大学宇宙地球環境研究所の相木秀則教授が提案したエネルギーフラックスの定式化[3]を用いてEDJsを構成する波動のエネルギーフラックスを評価した。この仮説を検証するため、名古屋大学宇宙地球環境研究所の相木秀則教授が提案したエネルギーフラックスの定式化[3]を用いてEDJsを構成する波動のエネルギーフラックスを評価した。計算結果はEDJsがエネルギーを東西方向に輸送していることを示し、特に西向きエネルギー輸送は140°W以西で顕著であった(図4)。この経度帯は表層起源の数ヶ月周期波動が形成するエネルギーのビーム(図1)の西側に対応し、海盆東部で数ヶ月周期波動からEDJsに供給されたエネルギーが西側に分配されていることを示唆している。また、エネルギーフラックスポテンシャルもEDJsの正味のエネルギー源が140°W付近にあることを示しており、140°Wから東西にエネルギーが再分配されていることがわかる(図5)。

以上の結果から、表層起源の数ヶ月波動が太平洋東部においてEDJsにエネルギーが供給し、その後EDJs自身により西岸から東岸まで海盆全域にエネルギーが分配される、という一連のエネルギーサイクルが示唆された。各実験結果の解釈については相木教授と議論を行い、得られた成果について2024年12月に開催された2024年度名古屋大学宇宙地球環境研究所共同利用集会インド洋/太平洋域における海洋循環/環境応用に関する研究集会で口頭発表を実施した。

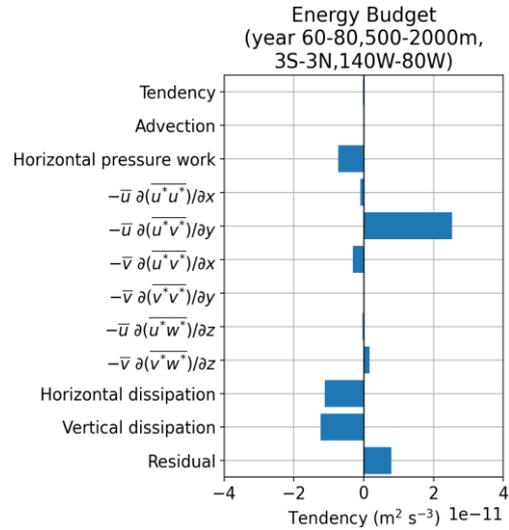


図3 積分開始後60-80年目の海盆東側で評価されたEDJsのエネルギー方程式の各項の寄与。正の値がEDJsへのエネルギー供給を示す。

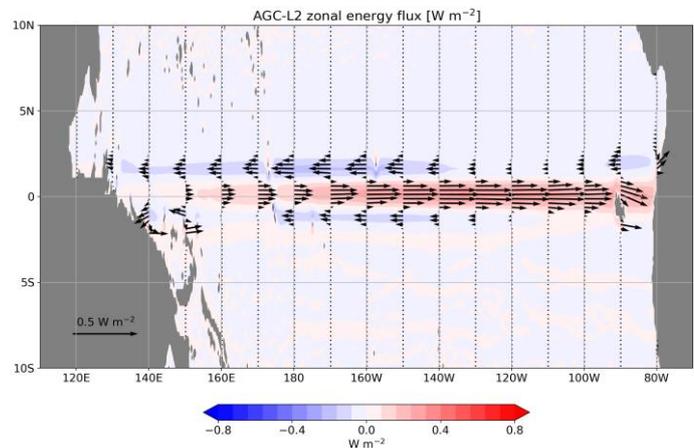


図4 深さ1000mにおけるEDJsのエネルギーフラックスベクトル(矢印)と東西成分(色)。

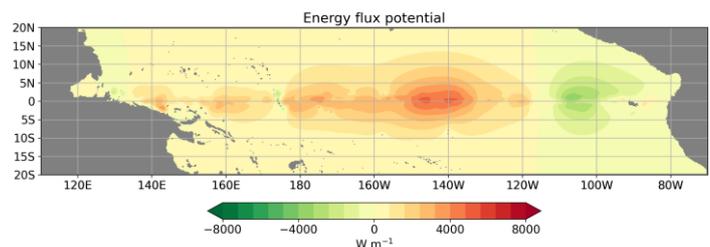


図5 深さ1000mにおけるEDJsのエネルギーフラックスポテンシャル。

引用文献

[1] Youngs & Johnson (2015), *Journal of Physical Oceanography*, 45, 2134-2148.
 [2] Terada & Masumoto (in preparation). Source of the intra-seasonal current variability and its interannual modulation at 1000 m depth in the eastern equatorial Pacific Ocean.
 [3] Marshall et al. (1997), *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 102(C3), 5753-5766.
 [4] Aiki et al. (2017), *Progress in Earth and Planetary Science*, 4(1), 1-18.
 [5] Greatbatch et al. (2018), *Geophysical Research Letters*, 45, 1923-1929.

太陽フレア放射による地球電離圏への影響評価と地球大気電離モデルの構築
The evaluation of the response in the Earth's ionosphere during the solar flares
and development of a model of Earth's atmospheric ionization

北島慎之典、防衛大学校・理工学研究科・後期課程2年
指導教員：渡邊恭子、防衛大学校・理工学研究科・教授

研究目的

宇宙領域を利用した現在のインフラシステム社会において、安全かつ安定した通信環境は必要不可欠である。航空機無線や船舶無線は短波を使用しているため、太陽フレア放射、その中でも電離圏下部の電離に大きく影響を与える X 線放射が原因と言われている短波通信障害 (SWF; Short-wave fadeout) の影響がある。しかし、現在開発されている世界各国の全地球大気シミュレーションモデル (e.g. WAM-IPA, WACCM, IRI) には、通信障害に関係している太陽フレア中の電離圏下部の電離を計算するモデルが含まれていない。これは、本研究で用いている大気圏・電離圏結合モデル GAIA⁽¹⁾についても同様である。そこで、高エネルギーの放射や粒子の地球大気内の伝播を計算できる PHITS⁽²⁾を導入することで、太陽フレア放射による電離圏下部の電離について計算可能なモデルの構築を行う。

研究方法

本研究では、GAIA によるシミュレーション結果と PHITS による電子密度を用いてイオノゾンドのパラメーターを再現し、PHITS が電離圏下部の電子密度をどの程度評価できるかを評価した。PHITS では、GOES/XRS から得られる X 線のエネルギースペクトルを入力として地球大気中の電離率を計算し、それに基づき再結合係数を用いて再現した。まず、2010 年以降に EISCAT が観測したフレア時の電子密度と PHITS で導出した再結合係数 (α_{eff}) を Gledhill (1986) ⁽³⁾ と比較した。次に、2010 年から 2014 年にかけて発生した M3 クラス以上の太陽フレアおよび 2024 年 5 月に発生した X クラスフレアの際に観測されたイオノゾンドの f_{min} 値を再現し、観測値との比較を行った。

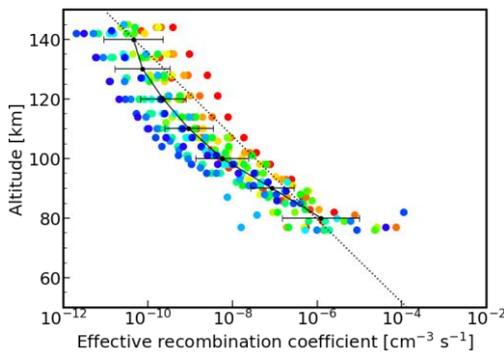


図 1 EISCAT の電子密度と PHITS による電離率から導出した α_{eff} の高度分布。実線は、PHITS による α_{eff} の平均値と標準偏差。点線は、Gledhill (1986) による α_{eff} の値。

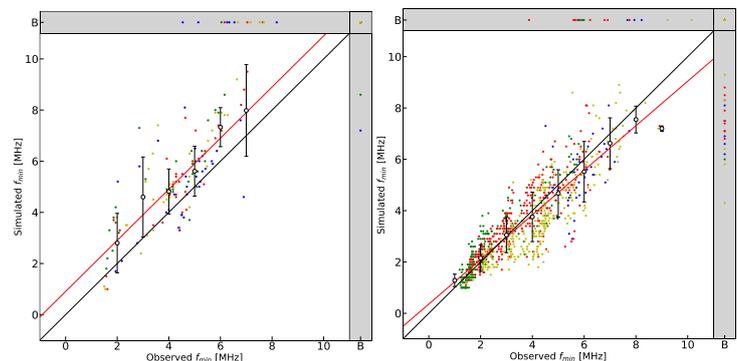


図 2 f_{min} 値の予測値と実測値の比較。赤実線は最小二乗法による近似直線。図中の“B”はブラックアウトを示す。左図は、2024 年 5 月、右図は 2010-2014 年の f_{min} 値

研究結果

PHITS と EISCAT により得られたフレアピーク時の α_{eff} を Gledhill (1986) と比較した (図 1)。PHITS による α_{eff} は Gledhill (1986) とほぼ一致した。PHITS で算出した電離圏下部の電子密度は、80 km 付近で最大 30%、90 km 付近で最小 18%の範囲で再現した。PHITS は、GAIA の計算範囲外となる 100 km 以下の電子密度を再現できることがわかった。次に、PHITS と GAIA の電子密度を用いてイオノゾンドの f_{min} 値を再現し、比較検証した (図 2)。線形回帰分析の結果、2024 年 5 月の相関係数は 0.78 であり、2010 年から 2014 年では 0.88 の精度で f_{min} 値を再現でき、2 値分類を用いたブラックアウトの TSS は 2024 年 5 月では 0.75、2010 年から 2014 年では 0.70 の精度でブラックアウトを再現できた。これらの結果より、PHITS はフレア発生時の電離圏下部の電子密度変動を再現でき、モデルへの適応が可能であることがわかった。

引用文献

- (1) Jin, H., Miyoshi, Y., Fujiwara, H., et al., 2011, JGR, 116, A01316
- (2) Sato, T., Iwamoto, Y., Hashimoto, S., et al., 2024, J. Nucl. Sci. Technol. 61, 127-135
- (3) Gledhill, J. A., 1986, Radio Science, 21, 3, 399-408

成果発表

成果論文

1. Kitajima, S., K. Watanabe, H. Jin, C. Tao and M. Nishioka, Estimation of the impact of solar flare spectra on the Earth's ionosphere using the GAIA model, J. Space Weather Space Clim., <https://doi.org/10.1051/swsc/2025008>, 2025

学会発表

1. Kitajima, S., et al., Validation of electron density in the ionospheric D- and lower E-region during solar flares using PHITS and GAIA models, JpGU Meeting 2024, 幕張メッセ, R6.5.28.
2. Kitajima, S., et al., Reproduction of Electron Density in the Ionospheric D Region During Solar Flares Using PHITS and GAIA Models, AOGS2024, 平昌, 韓国, R6.6.24.
3. Kitajima, S., et al., Reproduction of electron density in the lower ionosphere during solar flares using PHITS models, Space Climate 9 Symposium, 名古屋大学, R6.10.3-4.
4. Kitajima, S., et al., Evaluation of electron density variation using PHITS and GAIA models during solar flares in May 2024, 第 154 回 SGEPS 総会および講演会, 国立極地研究所, R6.11.24.
5. Kitajima, S., et al., Reproduction of electron density in the lower ionosphere during solar flares by PHITS code, 第 154 回 SGEPS 総会および講演会, 国立極地研究所, R6.11.27.
6. Kitajima, S., et al., Reproduction of electron density variation in the lower ionosphere due to flare X-ray emission using PHITS, AGU24, Washington D.C., USA, R6.5.28.
7. Kitajima, S., et al., Evaluation of electron density variation using PHITS and GAIA models during solar flares in May 2024, , Washington D.C., USA, R6.5.28.
8. 北島慎之典他, PHITS を用いた太陽フレア時の電離圏下部の電子密度の再現・評価, 2024 年度太陽圏連シンポジウム, 国立天文台, R7.2.17-19.
9. Kitajima, S., et al., Electron density in the lower ionosphere during solar flares using PHITS, 7th ISEE Symposium, 名古屋大学, R7.3.6-7.

太陽におけるライマン線放射の特徴とその地球電離圏への影響

Characteristics of Lyman-series emission in the Sun and its effect to the Earth's ionosphere

大窪遼介、防衛大学校・理工学研究科・前期課程2年
指導教員：渡邊恭子、防衛大学校・理工学研究科・教授

研究目的

太陽からの極端紫外線(EUV)放射は地球電離圏に作用し、通信障害や地磁気変動を引き起こすことが知られている。中でも、ライマン α 線(Ly α , 121.6 nm)は太陽大気から放射される水素線の中でも最も強いため、地球高層大気の電離に影響していると考えられており、宇宙天気の見点からも多くの観測衛星によって監視されている。しかし、Ly α 線は地球大気中に豊富に存在している酸素や窒素分子をイオン化するのに十分なエネルギーを持っておらず、地球電離圏の下層に少量存在しているNOしか電離できない。一方、ライマン β 線(Ly β , 102.6 nm)はLy α 線より波長が短いため、地球大気中に豊富に存在している酸素分子をイオン化するエネルギーを持っている。このことより、実際に地球高層大気の電離に影響しているのはLy β であることが示唆される。

一方、Milligan et al. (2020)⁽¹⁾は、太陽フレア時において観測された地球電離圏E領域の変動がフレアのX線放射に先行してみられていたことから、X線に先行して放射が見られたLy α 線放射が地球電離圏E領域に影響を与えている可能性を示した。また、Lemaire et al. (2012)⁽²⁾は第23太陽活動周期におけるLy α / β 比を調べ、太陽活動極小期よりも極大期の方がLy α / β 比が小さくなり、Ly α よりもLy β の方が増加率が大きいことを示していた。本研究はこれらの先行研究を元に、第24太陽活動周期と太陽フレア時におけるLy α とLy β の振る舞いを調べた。また、フレア時における電離圏E領域の電子密度変動をもたらしているEUV放射を同定するために、フレア時のライマン線やその他のEUV放射の時間変動を調べ、地球電離圏のシミュレーションモデルであるGAIAモデル⁽³⁾を用いて検証を行った。

以上より、本研究では宇宙天気への影響が考えられるLy α とLy β の関係を明らかにし、これらのライマン線が地球電離圏に与える影響を評価した。

研究方法

ライマン線の太陽活動周期変動については、Lemaire et al. (2012)⁽²⁾と同様にThermosphere, Ionosphere, Mesosphere Energetics and Dynamics (TIMED) 衛星に搭載されているEUV Grating Spectrograph (EGS) - Solar EUV Experiment (SEE) の日次データを用いた。フレア時のLy α のデータはGeostationary Operational Environmental Satellite (GOES) 衛星に搭載されているExtreme Ultraviolet Sensors (EUVS) のEチャンネルを用い、Ly β はSolar Dynamics Observatory (SDO)に搭載されているExtreme ultraviolet Variability Experiment (EVE) のデータを用いた。太陽フレア放射の地球電離圏への影響については、柿岡磁力計⁽⁴⁾の地磁気データを観測値として用い、影響を見積もるための数値計算モデルとしてはGAIAモデル⁽³⁾を用いた。また、太陽フレアイベントを同定するために、CIDASシステムのひのでフレアカタログを用いた。

研究結果

まず第24太陽活動周期におけるLy α / β 比の変動を調べたところ、第23太陽活動周期のLy α / β 比の変動と大きく変わらなかった。このことから、異なる太陽活動周期であってもLy α / β 比の変動パターンは変わらず、太陽活動極小期よりも極大期の方がLy α / β 比が小さくなり、Ly α よりもLy β の方が増加率が大きいことが分かった。太陽フレアにおいては、Ly β の放射照度増加率がLy α の増加率に比べて平均して2.5倍高く、Ly α 放射照度増加に伴うLy α / β 比減少の割合も太陽活動周期変動によるものよりも大きかった。これらの放射が地球電離圏に与える影響についてGAIAモデルと柿岡磁力計のデータを用いて調べたところ、Ly α ではなくLy β が電離圏E領域下部(高度100-110 km)のO₂イオンの生成に寄与しているために電離圏の電子密度変動が引き起こされている可能性が示唆された。

引用文献

- (1) Milligan et al., 2020, *Space Weather*, 18(8).
- (2) Lemaire et al., 2012, *A&A*, 542, L25.
- (3) Jin, H., Miyoshi, Y., Fujiwara, H., et al., 2011, *JGR*, 116, A01316
- (4) Kakioka Magnetic Observatory. (2013)., Kakioka Magnetic Observatory Digital Data Service

成果発表

1. Ryosuke Okubo, Kyoko Watanabe, Shinnosuke Kitajima, Satoshi Masuda, Akimasa Ieda, Hidekatsu Jin, Chihiro Tao, Michi Nishioka, “Characters of Lyman lines and their influences on the Earth’ s ionosphere” , JpGU Meeting 2024, 幕張メッセ, 2024 年 5 月 27 日
2. Ryosuke Okubo, Kyoko Watanabe, Shinnosuke Kitajima, Satoshi Masuda, Akimasa Ieda, Hidekatsu Jin, Chihiro Tao, Michi Nishioka, “Characteristics of Lyman Lines in Solar Cycles and Their Influences on the Earth's Ionosphere” , AOGS2024, 平昌, 2024 年 6 月 24 日
3. 大窪遼介、渡邊恭子、北島慎之典、増田智、家田章正、陣英克、埜千尋、西岡未知、“太陽における水素ライマン線の放射変動とその地球電離圏への影響”、日本天文学会 2024 年秋季年会、関西学院大学、2024 年 9 月 15 日
4. Ryosuke Okubo, Kyoko Watanabe, Shinnosuke Kitajima, Satoshi Masuda, Akimasa Ieda, Hidekatsu Jin, Chihiro Tao, Michi Nishioka, “Solar hydrogen Lyman lines and its effect on the Earth's ionosphere” , 9th Space Climate Symposium, 名古屋大学, 2024 年 10 月 1-2 日
5. 大窪遼介、渡邊恭子、北島慎之典、増田智、家田章正、陣英克、埜千尋、西岡未知、“太陽フレアにおける太陽水素ライマン線放射とその地球への影響”、第 156 回 SGEPPSS 総会および講演会、国立極地研究所、2024 年 11 月 27 日
6. Ryosuke Okubo, Kyoko Watanabe, Shinnosuke Kitajima, Satoshi Masuda, Akimasa Ieda, Hidekatsu Jin, Chihiro Tao, Michi Nishioka, “Solar hydrogen Lyman lines and their influences on the Earth's ionosphere” , AGU24, Washington D.C., 2024 年 12 月 9-13 日
7. 大窪遼介、渡邊恭子、北島慎之典、増田智、家田章正、陣英克、埜千尋、西岡未知、“太陽放射の変動における水素ライマン線放射の特徴とその地球電離圏への影響”、2024 年度太陽研連シンポジウム、JAXA 宇宙科学研究所、2025 年 2 月 17-19 日
8. Ryosuke Okubo, Kyoko Watanabe, Shinnosuke Kitajima, Satoshi Masuda, Akimasa Ieda, Hidekatsu Jin, Chihiro Tao, Michi Nishioka, “Evaluation of the effect of solar flare emission on the Earth's ionosphere using the Kakioka magnetometer ” , 7th ISEE Symposium, 名古屋大学, 2025 年 3 月 5-7 日

半導体検出器SiPMに搭載する集光器の開発
Development of a light guide for the SiPM

溝手雅也、甲南大学・自然科学研究科・博士2年

【作成要領】

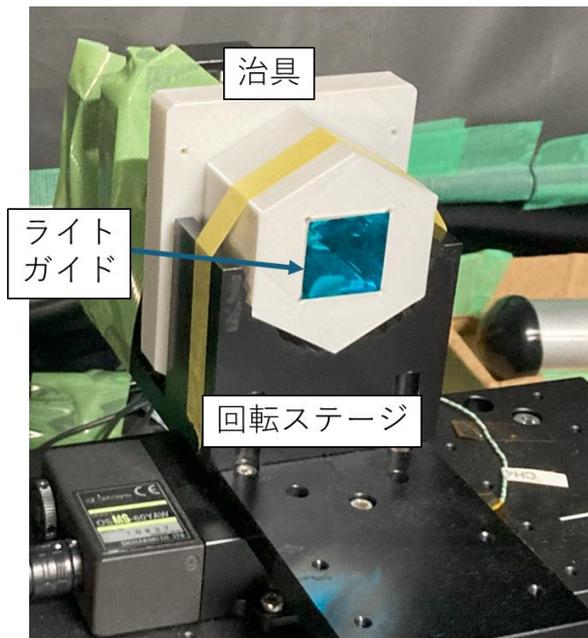
1. 研究目的

次世代高エネルギーガンマ線観測計画CTAでは、大口径望遠鏡の焦点面検出器に光電子増倍管を使用している。この望遠鏡の感度の向上を目指し、この望遠鏡に半導体検出器SiPMを導入することを検討している。画素数を4倍に増やし空間分解能を向上させると同時に光検出効率を上げ望遠鏡の感度を飛躍的に上げることを期待している。SiPMには集光鏡を取り付け、主鏡から届く光のみを検出するように設計している。本計画ではこの新しい検出器の開発と性能評価を行った。

2. 研究結果

CTAの望遠鏡は高エネルギーガンマ線が大気中で生成した空気シャワーから放出されるチェレンコフ光を検出している。チェレンコフ光は紫外線領域で明るく、赤外線領域は大気中の酸素の輝線などのノイズが主な成分になる。SiPMは光電子増倍管とくらべ赤外線領域の感度が高い。このためそのままではノイズが増えてしまい、微弱なチェレンコフ光の検出を妨げることが考えられる。そこで集光鏡に赤外線反射を低減させたコールドミラーを使うことを検討している。

コールドミラーは名古屋大と東海光学(株)が共同で開発した鏡で、反射面に多層膜のコーティングをしている。多層膜で増反射すると同時に、膜の間にやく3 nm程度の薄いアルミ層を導入することにより赤外線の反射を軽減している。この鏡によりチェレンコフ光を効率よく検出しながら赤外線を除去する検出器の開発を目指している。



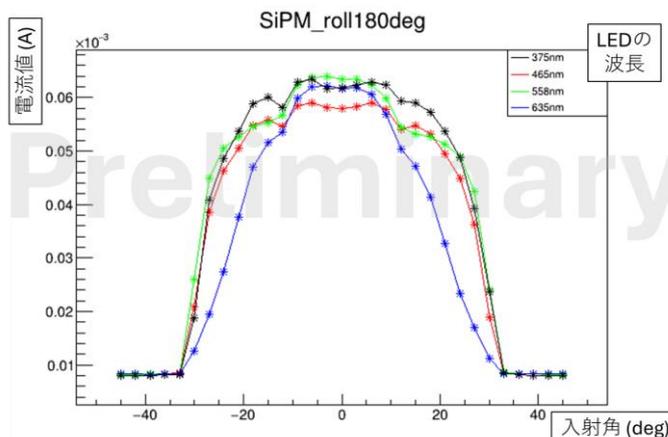
集光器の本体は、3Dプリンターで試作し開発コストを抑えた。樹脂製の複数のパーツを組み合わせてコーンの形を作り、コールドミラーをその内側に張り付け、SiPM用の集光器を製作した。本計画によりこの集光器を性能を評価している。左図に示すように、集光器を測定装置に固定し、LEDで単波長の光を照射する。集光器にはSiPMを装着しており、オシロスコープで信号を測定している。この測定はISEEの設備である大型暗室を利用した。検出器の角度を変えることにより集光効率を入射角の関数で測ることができ、光源のLEDを変えることにより波長も変えることができる。

下図は入射角度-45～45度における、検出効率の相対値を示している。望遠鏡のカメラから主鏡を見たとき入射角は27度程度になるため、27度以上の光は除去する設計になっている。また長波長ほど検出効率下がっていることも確認できる。

3. 考察

本年度はSiPMに集光器を取りつけた検出器を試作し、その信号を測定することができるところまで進んだ。入射角度を一定の大きさに制限できていることや長波長の入射光がある程度軽減できることが確認できた。

今後、コールドミラーの膜厚最適化、集光器改良などを行い集光効率の高い検出器の開発を進める予定である。



4. まとめ

- CTAチェレンコフ望遠鏡に搭載する検出器について、高分解能化のためにSiPMの採用を検討している
- 赤外線を低減するためにコールドミラーを開発し、集光器を試作した
- この集光器の波長特性を測定するために分光器を使ったキャリブレーションシステムを開発している。