

修士論文

広視野偏光分光観測に基づく
オーロラ発光の偏光特性の解明

Characteristics of polarization in auroral emissions
based on wide-field polarization spectroscopic observation

東北大学大学院理学研究科
地球物理学専攻

高崎 慎平

論文審査委員

坂野井 健 准教授(指導教員・主査)

小原 隆博 教授

笠羽 康正 教授

加藤 雄人 准教授

鍵谷 将人 助教

平成 26 年

要旨

近年の直線偏光子とフォトメータを組み合わせた極冠域(磁気緯度 75 度)ポーラーレイ
ン降下電子による酸素原子 630nm のオーロラ発光の観測結果から磁力線平行方向に 2-
7%程度の直線偏光が生じていることが示唆された(Lilensten et al., 2013)。しかしながら、
この研究は高緯度地域の十数例の限られた観測である。一方、理論的にも降下電子エネル
ギーやピッチ角分布に対応し、630nm 発光が最大で 17%偏光する可能性が示唆されてい
る(Bommier et al., 2011)。

本研究では、酸素原子 630nm のオーロラに加えて、これまで行われていなかった 557.7nm
オーロラの直線偏光を同時に測定し、磁気子午線に沿った偏光の仰角分布を長期間にわ
たって捉えることを目的とし、広視野偏光分光器と、大気散乱による偏光を定量的に校
正可能な変光望遠鏡を新たに開発した。

この広視野偏光分光器は、魚眼レンズ、回転するステージに装着したワイヤーグリッド
型直線偏光子、VPH 透過型回折格子ならびに EMCCD 検出器から成り、450nm から
710nm の波長範囲で波長分解能 2.0nm、視野角 130 度を有する。偏光子を 45 度ずつ回転
させたときに EMCCD カメラで検出される強度変化から入射光の偏光状態を測定するこ
とができる。偏光計測データには、オーロラ発光の偏光に加え、大気散乱による偏光や、
光学系を格納する観測箱のアクリルドームや魚眼レンズ、回折格子など（以下器械偏光と
呼ぶ）の影響をうける。したがって、これらのオーロラ偏光以外の効果を定量的に校正す
ることが本研究の鍵となる。本研究では、器械偏光の校正のために、既知の偏光状態を持
つ光を入射し、偏光子を回転させながら強度変化を測定する装置と解析方法を開発し、130
度の視野角において偏光計測を実現する校正手法を確立した。

広視野偏光分光器をもちいて、2013 年 12 月から 2014 年 3 月、および 2014 年の 11 月
から 12 月にかけてアラスカ州ポーカーフラット観測所においてオーロラの連続観測を
行った。2013 年に行った観測では、偏光校正に 0 度、45 度、90 度、135 度の計 4 方向の
直線偏光光源のみをもちいたこと、光源の光量が校正データ測定の時間内で安定しなかつ
たこと、視野の全域において校正データが得られなかったことにより、信頼に足る器械偏
光特性の校正を行うことができなかつた。それらの問題点を踏まえ、2014 年の観測では、
上記 4 方向の直線偏光に加え 2 種類（右回り、左回り）の完全円偏光を含めた校正光源を

準備し、校正光源の偏光状態を素早く安定して作り出すことのできる校正システムを新たに導入した。そして 2014 年 11-12 月のアラスカ滞在観測時に、この校正システムを用いて広視野偏光分光器の器械偏光特性の校正を視野 130 度に対して 3 度間隔でおこなった結果、偏光度の計測誤差として 0.2%程度の十分な精度での校正を達成した。校正データの取得は-5°Cから-20°Cの異なる外気温下で合計 4 日間行ったが、全てのデータにおいて装置の偏光特性を示すミューラー行列の値が視野角に対して同様の傾向を示した。このことから-5°Cから-20°Cの外気温温度環境による器械偏光の偏光計測に及ぼす影響はそれほど大きくないとみなせる。以上から、2013 年観測の課題であった広視野偏光分光器の偏光校正データの高度精度取得は、2014 年度観測では解決された。

2014 年冬期の観測において、一晩を通じてオーロラの活動が活発だった 2014 年 11 月 20 日晩の解析結果から、630nm オーロラの直線偏光度は磁気子午線に沿った磁北側の低仰角（～10 度）で 8%と大きい値を取り、仰角が上がるにつれて仰角～80 度で 1%程度まで減少し、磁気天頂付近から磁南側の低仰角側で再度偏光度が上昇していくといった仰角依存性が確認された。その傾向は 11 月 28 日と 12 月 24 日晩ならびに他の観測日でも確認された。また、オーロラが磁南側に移動していく際に、オーロラの発光領域の移動に対応して直線偏光度が変動する領域（～数%）がともに移動した。特にオーロラ明暗境界付近で偏光度が大きくなる（最大 10%）といった傾向がみられた。このような特徴は、先行研究では報告されていない。

一方で理論的に偏光していないとされる 557.7nm オーロラについても、オーロラ活動が活発な場合では平均的に 10%以上の直線偏光を示す観測結果が得られた。この観測事実は 557.7nm の酸素原子発光が電気四重極子遷移であるために偏光しないという理論と矛盾しており、この結果を解釈するためにも今後、理論的な理解を深めることが重要である。

これらのオーロラの直線偏光度の傾向に対して、オーロラの発光強度に伴い偏光度が変化する可能性を考え、2014 年の 10 日間の観測データから強度変化に対する直線偏光度の変化を調べた。その結果、オーロラ強度が上昇することによって S/N 比が大きくなり、直線偏光度のばらつきは小さくなったが、値はオーロラ強度に関わらずほぼ一定の値となった。また、直線偏光度の地磁気地方時依存は確認できなかった。

一方で、降り込み電子の平均エネルギーに対する直線偏光度の対応を捉えるために、磁気天頂付近における 557.7nm と 630nm の発光強度比と直線偏光度の関係性を調べた。その結果、630nm オーロラの直線偏光度は 630nm 発光強度の割合が大きくなるにつれて、

つまり低エネルギーの降り込み電子の割合大きくなるにつれて、1%程度大きくなることが確認できた。この傾向については、これまでの先行研究で得られていなかった大きな成果であるといえる。しかし、この関係性にはばらつきが大きく、降下電子エネルギー以外の他の要因（ピッチ各分布等）を今後の研究では考慮する必要がある。2014年に新たに開発した変光望遠鏡によるアラスカにおける無偏光標準星の観測データから、偏光標準星の仰角や方位角によらず、常に直線偏光度は $4 \pm 0.5\%$ を示した。これは無偏光の光源を入射することによる校正が不十分であったためで、器械偏光が十分に校正されなかった結果であると解釈される。導出された偏光度は天頂方向と20度程度の低仰角に存在する異なる標準星を観測したときの変化が小さかったことから、大気が偏光観測に与える影響は0.5%以下と、広視野偏光分光器で測定されたオーロラ偏光度に比べて十分に小さかったと結論された。