

氏名・(本籍)	さかのい かず よ 坂野井 和 代
学位の種類	博士(理学)
学位記番号	理博第1932号
学位授与年月日	平成14年3月25日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
研究科, 専攻	東北大学大学院理学研究科(博士課程)地球物理学専攻
学位論文題目	Studies on the Generation Mechanisms of Flickering Auroras Using High-speed Imaging Photometer Observations (高速イメージングフォトメータ観測によるフリッカリングオーロラ発生機構の研究)
論文審査委員	(主査) 教授 福西 浩 教授 森岡 昭, 岡野 章一, 小野 高幸 講師 高橋 幸弘

## 論 文 目 次

Acknowledgements

Abstract

### 1. General introduction

1.1 Auroras and the auroral acceleration region	1
1.2 Field-aligned electron bursts	5
1.3 Microscale structures of auroras and dispersive Alfvén waves	7
1.4 Flickering auroras	11
1.5 Auroral emissions	17
1.6 Purpose of this thesis	18

### 2. Instrumentation

2.1 Overview of the observation system	19
2.2 High-speed imaging photometer system	22
2.2.1 Multi-anode photomultiplier tubes	24
2.2.2 Cooler and pre-amplifier units of photomultiplier tubes	28
2.2.3 Lens and interference filters	30
2.3 ICCD camera	30
2.4 Gimbals and optical dome	33
2.5 Data acquisition system	35
2.6 Calibration	35
2.6.1 Calibration for nonuniformity in photometer sensitivity	35

2.6.2	Calibration for the field-of-view of photometer	36
3.	Observations and data analyses	
3.1	Observation site and operation	43
3.2	Data Analyses	44
3.2.1	Spectral analysis of temporal evolution	45
3.2.2	Imaging analysis of spatial evolution	46
3.2.3	ICCD and all-sky camera images	48
3.2.4	Noise analysis	48
4.	Characteristics of flickering auroras	
4.1	Occurrence conditions of flickering auroras	53
4.2	Event selection and spectral analysis of flickering auroras	55
4.3	Spatial structures and evolution of flickering auroras	61
4.4	Summary and discussion	74
5.	Relationship between flickering auroras and dispersive Alfvén waves in the auroral acceleration region	
5.1	Introduction	79
5.1.1	Theory of dispersive Alfvén waves	79
5.1.2	Previous studies on dispersive Alfvén waves	83
5.2	Wave parameters estimated from observations	85
5.2.1	Identification of wave mode	85
5.2.2	Resonant electrons	87
5.2.3	Interactions between two dispersive Alfvén waves	91
5.3	Summary and discussion	96
6.	Conclusions	105
	References	107

#### Appendix A :

Derivation of the dispersion relation of electromagnetic ion cyclotron waves

## 論文内容要旨

太陽-地球系における大規模な電磁エネルギーの輸送・変換過程の中で、磁気圏-電離圏結合系は地球側における終端領域を形成し、この領域における物理過程の解明のために過去数十年にわたり、多面的に膨大な数の研究がなされてきた。磁気圏-電離圏結合系における多様な物理過程を研究する上で、オーロラは、その発生機構を通してこれら物理過程の性質を視覚的に表現する唯一の現象である。このため、基本的かつ重要な研究手法の1つとして、地上・ロケット・衛星からのオーロラ光学観測が行われ、数々のオーロラの性質が明らかとなり、磁気圏-電離圏結合系の研究の発展に大きく貢献してきた。しかしながら、オーロラはその発生機構を反映した様々な空間・時間スケールを示し、空間スケールが

小さく、時間スケールも短い現象に関しては、いまだ未知の部分が数多く残されている。近年、観測技術の飛躍的な発展により、オーロラとそれに関連する荷電粒子・電磁場などの高時間・高空間分解の観測が可能となり、未解明のマイクロスケールのオーロラ物理過程に関心が集まっている。

本論文の研究対象であるフリッカリングオーロラは、大規模なオーロラアーク中に内包される、直径数kmのコラム状（底面はスポット状）構造の現象であり、数Hzの発光強度変動を示す。これらの空間・時間スケールはオーロラ現象の中では、微細かつ高速なものであり、加えてフリッカリングオーロラを内包するオーロラアークそれ自体が、活発な時間変動を示すために、この現象の性質を光学観測によって捉えることは非常に困難である。これまで、フリッカリングオーロラの空間・時間変動を詳細に調べた光学観測は数例しか報告されていない。一方で、地上TVカメラとロケットとの同時観測により、フリッカリングオーロラの発光強度変動は、電離圏に降り込んでくる電子フラックスの変動（沿磁力線電子バーストと呼ばれる）によって引き起こされることがわかっており、その発生機構として高度1,000～10,000 kmに存在するオーロラ粒子加速領域における波動粒子相互作用が提案されている。この相互作用を起こす波動の有力候補として、沿磁力線方向に電場成分を持つ分散性アルヴェン波動（Dispersive Alfvén wave）が考えられている。しかしながら、上述の光学観測の困難さが障壁となり、フリッカリングオーロラの性質とその発生機構に関してはあまり研究が進んでおらず、未解明の点が数多く残されている。

本研究の目的は、オーロラ粒子加速領域のマイクロスケール物理過程を直接反映する現象として最も興味深い研究対象であるフリッカリングオーロラの詳細な性質を捉えるため、高時間・高空間分解能の光学観測機器を開発すること、並びにこの観測機器を使用して得たデータからフリッカリングオーロラの空間・時間構造を知り、その発生機構を明らかにすることである。機器開発は1997年に東北大学において行い、完成した観測システム「高速イメージングフォトメータシステム」は、南極昭和基地（69.00° S, 39.58° E, -66.2° MLAT, MLT=UT+5分）に設置し、1998年4月24日～1998年9月26日の期間中、65晩観測を行った。このシステムは2セットのイメージングフォトメータ、狭視野の高感度CCDカメラ、遠隔操作可能な方向可変の架台、並びに高速サンプリングのためのデータ取得系から構成されている。2セットのイメージングフォトメータは、異なった波長特性を持つ光電子増倍管と干渉フィルタを用い、オーロラ発光中の窒素分子イオン・ファーストネガティブバンド（427.8 nm）と、窒素分子・ファーストポジティブバンド（660 nm付近）を同時に観測することが可能である。これら2波長を選択することにより、励起寿命の長いオーロラ発光の影響を取り除き、フリッカリングオーロラの空間・時間構造を明確に捉えることが可能である。またこのフォトメータは全視野14度内がメッシュ状の52チャンネルに分けられ、各チャンネルの空間分解能は1.75度（オーロラ発光高度100 kmで約3～6 km）である。データ取得のサンプリング周波数は100 Hzの連続モードと1000 Hzスナップショットモードをオーロラの状況に応じて使い分けることが可能である。

65晩の観測データから、35イベントのフリッカリングオーロラが確認された。ほとんどがオーロラブレイクアップ後の明るいオーロラアーク又はサージ中で観測された。例外は3イベントのみで、2イベントはブレイクアップの30～40分前に明るいオーロラアーク中で観測され、1イベントはブレイクアップを伴わないアークの発光強度増加中に観測された。このうち空間構造と時間発展が明確に確認できる3イベントについて、詳細な解析を行った。解析方法は主に2つのプロセスに分けられる。始めに、全52チャンネルの信号に対して、MEM法を用いてダイナミックスペクトルを計算し、フリッカリングオーロラの特異周波数を検出した。次に全チャンネルの信号に対して狭帯域周波数フィルタ（約3～4 Hz）を適用し、特異周波数成分のみを取り出し、その強度変動をイメージデータとして合成・描画した。これらの解析から得られた主要な結果を以下に示す。

狭帯域周波数フィルタによって信号を抽出する解析手法により、フリッカリングスポットやコラムの明確な空間構造とその時間発展を、世界で初めてイメージデータとして示した。フリッカリングオーロラの典型的な時間・空間スケールは以下の通りである。フリッカリング周波数：3–18 Hz，フリッカリングスポットの直径：~3.4–12 km，フリッカリングコラムの長さ：10–28 km以上，隣り合ったスポット（コラム）の間隔：3.4–14 km，個々のスポット（コラム）の継続時間：~0.5–1 sec。これらの値は過去の観測から推定された値と一致している。さらに、フリッカリングオーロラの空間構造と時間発展について、新しい重要な結果が見出された。その性質は下記の通りである。隣り合ったフリッカリングスポット（コラム）は、明暗の対を構成し強度変動がほぼ逆位相の周期性を示す。一方で、独立した周期変動を示す単独のフリッカリングスポット（コラム）も観測された。これらいずれのフリッカリングスポット（コラム）もその継続時間内には、ほぼ固定された場所で観測され、発光強度が明から暗、暗から明に移り変わる際に、その空間構造がボケる、つまり水平方向に伝搬しないという性質を示した。

これらの性質からフリッカリングオーロラの発生機構について考察を行った。まず始めに、上記の時間・空間スケールと分散性アルヴェン波の線形理論から導かれる波の時間・空間スケールを比較した。この結果、フリッカリングオーロラの時間・空間スケールは、高度2,000–5,000 kmのオーロラ粒子加速域における分散性アルヴェン波のスケールと整合的であった。また、フリッカリングを引き起こす電子フラックス変動の発生機構として、分散性アルヴェン波の沿磁力線電場と降下電子のランダウ共鳴を仮定すると、共鳴条件から導かれる共鳴電子のエネルギー範囲は、ロケットによりフリッカリングオーロラの上で観測されている沿磁力線電子バーストのエネルギー範囲と整合的である。これら2つの結果は、観測されたフリッカリングオーロラが、高度2,000–5,000 kmのオーロラ粒子加速域において、分散性アルヴェン波と降下電子が相互作用することにより発生することを示すものである。

また、フリッカリングオーロラの空間構造と時間発展を作り出す物理機構として、以下のようなモデルが考えられる。分散性アルヴェン波の理論から、波の励起源が小さい場合には、これらの波は磁力線に沿った非常に狭い領域（共鳴円錐）内を伝搬する性質が導かれる。また、昭和基地上空における波動伝搬モデルの計算結果も同様の性質を示し、特に高度2,000 km以上では、ほぼ磁力線に沿って伝搬する様子が確認された。これらの性質から、波の励起源が磁力線垂直方向に局所的な構造を持っている場合、分散性アルヴェン波は磁力線に沿った非常に狭い領域内に捕捉されることがわかる。そこで、高度2,000–5,000 kmのオーロラ粒子加速域における、2つの分散性アルヴェン波の合成波のモデル計算を行った。その結果、磁力線垂直方向の伝搬ベクトルが2つの波動間で逆向きの場合、波動粒子共鳴領域における合成波の空間構造や時間発展の性質は観測されたフリッカリングオーロラの性質と良い一致を示した。また近年オーロラ粒子加速域の衛星観測や実験室プラズマ内での分散性アルヴェン波動の実験から、電離層アルヴェン共鳴円錐構造や2つの共鳴円錐の相互作用により、磁力線垂直方向に微細な構造が作り出されることが示されている。

以上すべての結果から、観測されたフリッカリングスポットやコラムの空間構造と時間発展は、複数の分散性アルヴェン波動による共鳴円錐内での相互作用によって作り出されたと考えられる。

（なお、分散性アルヴェン波は、kinetic Alfvén wave (KAW) と、inertial Alfvén wave (IAW) という2つのタイプに分けられるが、本論文では後者のIAWと、それと同じ性質を持ち周波数帯だけが異なる電磁イオンサイクロトロン波 (EMIC) を含めて、「分散性アルヴェン波」という言葉を用いている)

## 論文審査の結果の要旨

最近の地上・ロケット・衛星観測技術の飛躍的な発展により、これまで研究されてこなかったマイクロスケールのオーロラ物理過程に関心が集まっている。本論文の研究対象であるフリッカリングオーロラは、直径数 km、長さ数10 kmのコラム状構造が数 Hz で明滅する現象で、オーロラ粒子加速領域での波動粒子相互作用を直接反映する現象として注目されている。しかしフリッカリングオーロラ自体が激しく明滅するだけでなく、このオーロラを内包する大規模なオーロラアークも同時に激しく発光強度を変化させるために、空間構造と時間構造を分離して観測することが困難であり、フリッカリングオーロラの性質とその発生機構に関しては未解明の点が数多く残されている。

本研究の目的は、フリッカリングオーロラの空間・時間構造を分離して観測し、オーロラ粒子加速領域で起こっているマイクロスケールの波動粒子相互作用の機構を解明することである。そのために、新たに2次元マルチアノード型光電子増倍管を用いた単色高速イメージングフォトメータシステムを開発し、南極昭和基地でこのシステムを用いたオーロラ観測を1998年4~9月の期間65晩実施し、35イベントのフリッカリングオーロラを観測した。得られたデータの解析手法に関しても独創的な手法を開発し、フリッカリングコラムの空間構造とその時間変動に関して発生機構に結びつく重要な性質を発見した。すなわち、隣り合うコラムは明暗の対を構成し逆位相で明滅し、ほぼ固定された場所に留まり水平方向には伝搬しない。しかも発光強度が明から暗、暗から明に移り変わる際に空間構造がボケる性質があることが明らかとなった。この性質をうまく説明する機構として、磁力線方向に電場成分をもつ分散性アルヴェン波が狭い共鳴円錐内を伝搬しつつ干渉し、その干渉波によって電子が磁力線方向に加速と減速を交互に繰り返すモデルが提案された。

本研究によって初めてフリッカリングオーロラの微細な空間構造とその時間発展の様子が明らかとなり、フリッカリングオーロラの発生機構に関して新しいモデルが確立した。これは著者が自立して研究活動を行うのに必要な高度な研究能力と学識を有することを示している。よって、坂野井和代提出の博士論文は博士（理学）の学位論文として合格と認める。