

## 論文内容の要旨

論文題目 **On the current-voltage relationship**

**in the upward field-aligned acceleration region at high latitudes**

(高緯度オーロラ粒子加速領域における

沿磁力線電流電圧特性に関する研究)

氏名

諸岡 倫子

ディスクリートオーロラを発生させる電子は地球電離層上空に存在する上向きの沿磁力線電場によって加速されるが、この沿磁力線電場の発生は同じ領域に流れる沿磁力線電流が深く関係していると考えられている。また、地球磁気圏と電離層をつなぐこの電流は地球磁気圏－電離圏結合問題においては非常に重要な一面を担っている。この為、オーロラ粒子加速領域の **current-voltage relation** は重要な問題である。沿磁力線電流と電場の関係は **Knight relation** と呼ばれる関係式で表せると考えられている。この関係式は、

- 電流の **carrier** は磁気圏起源の電子のみである。
- 電子は定常的に存在する電場によって **adiabatic** な加速を受ける。

という仮定の上で成り立つ関係である。しかし実際のオーロラは時間空間的にも変化に富んだ現象であることを考えると、本当にこの関係式が成り立つかは疑問で、長い間議論されてきた問題の一つであり、本研究の大きな **motivation** もまたそこにある。このモデルの検証はこれまで多くの衛星観測によって行われている。加速領域を横切る軌道を持つ **Akebono** 衛星ではこのモデルの関係は成り立たず、実際の電流の方がモデルの値よりも多いことが分かっている。しかし一方で、低高度衛星による観測では、モデルは良く合うという報告が多い。本研究では、なぜこのような違いが起こるか、**Akebono** 衛星で得られたデータによる統計解析の結果をもとに考えることで議論が進められる。本研究では、沿磁力線電流密度を 3 通りの方法で導出し比較することにより、加速領域内での電流の **carrier** の違いからモデルを検証した。図 1 はこれら推定した電流の意味の違いを示している。

はじめに、高度約 9000km の加速域中で得られた観測結果ではやはり、磁場データにより推定した電流 ( $J_{total}$  とする) は、モデル電流 ( $J_{model}$  とする) よりずっと大きな値を示すものが多かった。一方、モデル電流と粒子データの **peak energy** 以上のエネルギー電子の積分による電流 ( $J_{high}$  とする) はほぼ一致していた。このことは、加速過程は **adiabatic** であることと矛盾しない。一方、**peak energy** 以下の電子も加えて積分計算した電流 ( $J_{low+high}$ ) は、 $J_{high}$  よりも大きく、値は  $J_{total}$  に近づく。従って、モデル電流では実際の電流には足りない分の電流は、**peak energy** 以下のエネルギーの低い電子が担っているのである。

同じ解析を低高度で観測されたデータでも行ったところ、低高度では **peak energy** 以下の電子による電

流の寄与は少なく、**peak energy** 以上の加速された電子による電流のみで電流は説明できる結果を得た。この結果は、他の低高度衛星での観測と **consistent** であるといえる。

図2は、**peak energy** 以下の電子が電流に寄与する領域の季節・高度・緯度・地方時毎に統計解析した結果を表した図である。図は、加速領域(電子の加速があったイベントの中で)で  $J_{low+high}$  と  $J_{high}$  の比が2以上になったイベントのある割合を色で表している。赤色は40%以上の割合で  $(J_{low+high}/J_{high}) > 2$  であったことを示している。この結果から、**peak energy** 以下の電子が電流を担うイベントは特に冬半球の高高度の真夜中付近で多く、その比率は低高度になるにつれ低くなる傾向がある事が解かる。従って、これまで **Akebono** 衛星が観測した様な高高度では **peak energy** 以下の低いエネルギー電子の電流への寄与が重要であるが、それは高度と共に低くなる。従って低高度では **peak energy** 以上の加速された電子だけで電流は説明でき、モデルと良く合う結果が得られる。またこの傾向は夏冬関わらずに見られるが、冬半球では6000km以下の低高度でもイベントは多いが、夏半球ではイベントの多い領域は8000km以上の高度でしかない。このような季節変化は、最近注目されているオーロラ現象の季節変化に関連があると考えられる。

我々は更に、この様な領域が加速電場存在領域に対しどのような領域にあるのか調べるため、**electron acceleration**, **UFI** の発生率を調べ、電流の分布図との比較も行った。この結果、**electron acceleration** は夏半球では高高度から低高度まで比較的同じ確率で観測されているのに対し、冬半球では6000km以下の低高度で特に高い発生率が観測された。この結果は、夏半球では8000km以上の高高度に分布するのに対し、冬半球では6000km以下の低高度にある事が多いことを示している。**UFI** の発生率の分布もまた、**electron acceleration** の発生と **consistent** な結果を示していた。この様に、オーロラ粒子加速領域の高度に季節変化が生じるのは、地球近傍のプラズマ密度に季節変化がある為であると予想している。**UFI** の分布関数を **fitting** することによって推定される加速領域下端の **ion** 密度が、**total potential difference** に対し反相関にはあるが季節によりその傾向が変わらない。この事と、地球近傍の密度が高度が上がるにつれ低くなる傾向をもつことを考え合わせると、加速電場が発生するべき密度となる高度は全体として密度の低い冬半球で低高度になるであろう。

これまでの加速領域の高度分布と、沿磁力線電流 **carrier** の高度分布構造を比較して考えると、**peak energy** 以下の電子が電流に寄与する領域は加速領域ではまだ **potential difference** が更に低高度にも存在していると予想される領域にある事、また加速領域自体の季節による高度変化の為にその領域の高度分布にも季節変化が生じる事がわかる。具体的には、加速領域が高高度に存在する夏半球では **peak energy** 以下の電子が電流に寄与する領域は高高度にしか存在しないが、加速領域が低い冬側では、夏に比べ低高度でも **peak energy** 以下の電子の電流への寄与が観測されるのである。

高高度の加速領域中での電子はしばしば、これまでの定常電場領域モデルでは説明できない分布を示している。これは、定常モデルにおいては磁気圏起源電子も電離層起源の電子も存在し得ない禁止領域に多く電子の分布が見られるものである。これらの電子の存在は、加速領域が時間空間的に変化していると考えられる。この事は、粒子加速領域はモデルの仮定の様に必ずしも定常的でなく、従来考えられていたよりも時間空間的に激しく変化している事を示唆する。

観測点の上の **potential difference** が小さいときに **peak energy** 以下の電子が電流に寄与する事と、高い高度で **peak energy** 以下の電子が電流に寄与する確率が高いという観測事実から考えると、観測点の下の **potential difference** が時間空間的に発達しており、この為に **loss cone** が急激に広がることによって磁気ミラ一点と電場との間に補足されていた低エネルギー電子が電流に寄与できると考えられる。

加速領域が時間変化する提案はこれまでも幾つかあり、主に3通りのモデルが提唱されている。

我々は更に **test particle simulation** を用い、どの様な加速領域時間変化モデルが、実際の電流をどの程度説明できるか検討した。この考察の結果、低エネルギー電子が電流を担うためには、観測点の上下にそれぞれ加速領域が存在して、高高度の加速領域は補足電子を地球近傍の磁力線上に溜める働きを持ち、低高度の大きな電位差を持つ加速領域で補足電子を電離層に降下させるメカニズムが必要であると考えられる。もし観測点の下の **potential difference** が時間空間的に変化していると考えれば、電流を担う **peak energy** 以下の電子は変化している下の **potential difference** によって更に加速されるため、低高度で観測さ

れる場合は peak energy 以上に含まれると考えられる。

結論として本研究の結果では、オーロラ粒子加速領域の時間空間的な変化が current-voltage relation に影響することを示唆した。また、季節による加速領域の存在高度の違いも見いだされた。

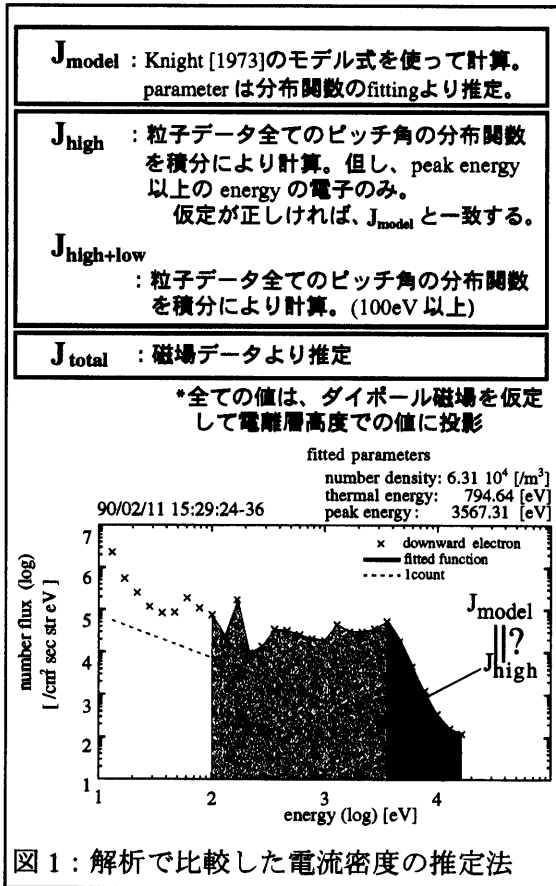


図 1 : 解析で比較した電流密度の推定法

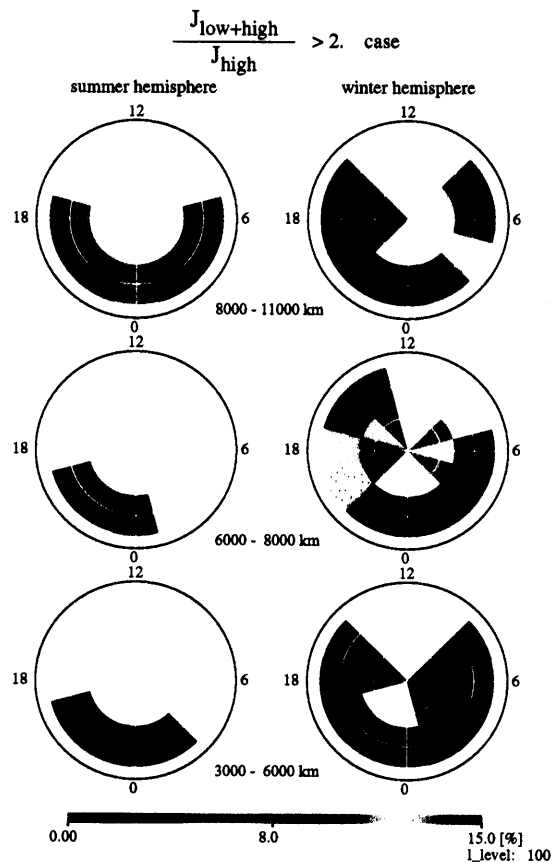


図 2 : peak energy 以下の電子が電流に寄与する領域