

磁場閉じ込め核融合研究からのオーロラ乱流と粒子加速への  
理論的アプローチ

**Theoretical approaches from the magnetic fusion research to auroral turbulence  
and particle acceleration**

渡邊智彦

Tomo-Hiko WATANABE

名大院・理

Dep. Phys., Nagoya Univ.

磁化惑星の極域電離層において普遍的にみられるオーロラ現象は、電離圏プラズマと磁気圏プラズマの相互作用に関連している。プラズマ物理の視点から見ると、イオンのサイクロトロン運動より十分緩やかな時間・空間スケールをもつ現象については、磁気流体方程式による記述が基本となる。地球や木星のように十分強い磁場をもつ天体プラズマにおける磁気流体現象は、磁場閉じ込め核融合プラズマと多くの共通点を持ち、後方で確立されてきた多くの理論・数値手法を有効に活用できる。例えば、地球磁場に沿って伝搬する低周波のアルヴェン波（ULF波動）は、（電離層近傍の不均一性に起因する部分を除けば）フルート近似された簡約化磁気流体方程式でよく記述される。

オーロラ、特に地磁気静穏時に現れる弧（アーク）状オーロラの発達理論として、フィードバック不安定性理論がT. Sato (JGR, 1978)により考案された。これはアルヴェン波の伝播に伝送線理論を適用し、電離層の二流体方程式を結合させた理論である。このフィードバック不安定性を通じ、電離層上での密度・沿磁力線電流・電場の揺動成分が増幅され、オーロラとして発達すると考えられる。フィードバック不安定性の非線形発展を調べるために、Watanabe (GRL, 2010)は簡約化磁気流体方程式を用いて、フルート近似にしたがって非線形効果を適切に導入し、オーロラ発達の非線形発展において2次的不安定性の成長がアークの変形と渦構造の発達、さらに乱流遷移をもたらすことを数値シミュレーションと理論解析により明らかにした。電離層プラズマの密度変動と共に、様々なスケールの渦構造が発達し、磁気圏プラズマ乱流のエネルギー・スペクトルを見ると、磁気流体乱流理論に整合した $-5/3$ 乗の冪指数がみられた。これは、オーロラ上空で人工衛星により

観測される電磁場擾乱ともよく対応している。

一方、人工衛星による観測では、広帯域のアルヴェン波擾乱と同時に、降下電子のエネルギー流束の増大がみられ、アルヴェン・オーロラと呼ばれている。これは、磁場に平行方向の電場成分をともなう分散性または運動論的アルヴェン波による加速で説明され、オーロラ粒子加速機構とも関連して大きな注目を集めている。フィードバック不安定性に平行電場効果を導入するには、オーム則を拡張すればよく、従来からも流体モデルを用いた解析が行われてきた。しかし、粒子加速過程を自己無撞着に取り扱うには、粒子分布関数を用いた運動論が必要となる。

そこでWatanabe (GRL, 2014)は、磁場閉じ込め核融合プラズマの乱流輸送解析に用いられるジャイロ運動論を磁気圏プラズマに適用し、フィードバック不安定性の運動論的理論をはじめて定式化した。その結果、有限ジャイロ半径効果による高波数領域での安定化に加え、平行電場をともなった運動論的アルヴェン波の増幅を理論的に導いた。この理論のポイントは、フィードバック不安定性によりオーロラにともなう密度・沿磁力線電流・電場の揺動成分とともに運動論的アルヴェン波が増幅され、それと同時にランダウ減衰機構により磁気圏中での電子加速を説明できる点にある。すなわち、オーロラの成長・発達と運動論的アルヴェン波の増幅、さらにオーロラ電子の加速を統一的に説明できる。

さらに、圧力揺動を取り入れることでフィードバック不安定性とバルーニング不安定性との競合過程も議論され(Watanabe, GRL 2018)、オーロラビーズ構造への適用も行われるなど、磁場閉じ込め核融合理論との緊密な連携が新たな研究の展開をもたらしている。