

## チュートリアル: 構造形成、エネルギー解放、領域間相互作用 実験室から太陽系、天体プラズマまで

### Structure formation, energy release, and inter-region interactions in plasma

# 田中 雅慶 [1]; 河野 英昭 [2]; 横山 央明 [3]

# Masayoshi Tanaka[1]; Hideaki Kawano[2]; Takaaki Yokoyama[3]

[1] 九大総理工; [2] 九大・理・地球惑星; [3] 東京大学・理

[1] Kyushu Univ.; [2] Earth and Planetary Sci., Kyushu Univ.; [3] School of Science, Univ.Tokyo

実験室プラズマの分野では、「構造形成」というキーワードは1970年代から現在に至るまで一貫して主要な研究テーマの一つである。シース、電気二重層、ソリトン、ホール、衝撃波、渦など、様々な実空間および位相空間の構造が興味を集めてきた。局在構造の発生には言うまでもなく非線形性が本質的な役割を果たしているが、プラズマにおいて非線形現象が注目されたのは、イオン音波ソリトンの実験に端を発する。ほぼ同じ時期に、トカマクに代表されるプラズマ閉じこめ研究が隆盛を迎え、輸送現象を支配する重要な機構として対流胞の形成が注目を浴びた。以来、非線形現象の理解はプラズマ物理の主要課題となっている。

磁気圏との関連で重要な研究は位相空間の構造である。電子（またはイオン）ホールといわれる位相空間の穴（渦）は、実験室ではじめに確認された。イオンの反射によって減衰するイオン音波ソリトンに比べ、減衰しないホールは宇宙空間では豊富に存在すると予想され、事実、広帯域ノイズと思われた BEN (Broadband Electrostatic Noise) は実空間波形を観測したところ電子ホールであることが確認された。

最近の研究のトピックスは渦研究である。なかでも、純電子プラズマは流体としてはオイラー流体と等価な系でありながら、過度分布が直接可視化できるという特徴を有している。そこでは渦糸の励起や渦糸集団のダイナミクスなどが調べられている。さらに、プラズマの閉じこめに関する話題としては、乱流からゾーナル流が生成され、プラズマ輸送が自己抑制されるという現象が注目を集めている。実験でもゾーナル流の発生が観測されている。

地球近傍の宇宙プラズマは、人工衛星等により直接測定する事が可能であり、リモートセンシング測定とも組み合わせ、プラズマ物理諸過程についての有用な情報を得る事が出来る。

地球近傍のプラズマは、その物理パラメタ（プラズマ密度・温度、磁場強度）の異なる多くの領域が互いに接する構造を持っている。即ち、大きく分けると太陽風領域、マグネトシース、磁気圏、電離圏からなり、磁気圏は更にローブ領域、プラズマシート、放射線帯、プラズマ圏からなっている。そして、その領域間の相互作用が、地球近傍のプラズマのダイナミクスに大きな影響を与えている。また、領域間の境界面では、相互作用（リコネクション、KH不安定性等）の結果として構造形成も行われる。

そのダイナミクスのうちでも宇宙嵐とサブストームは、その解放エネルギーの大きさから、重要な研究課題である。宇宙嵐（磁気嵐）とは、太陽面爆発などによる太陽風擾乱が地球近傍へ到達し、磁気圏 - 電離圏系を数日間擾乱させる一連の現象である。太陽風から継続的に磁気圏に注入・蓄積されるエネルギーが磁気圏内のプラズマ対流を強め、同時に粒子を加速する。その結果リングカレントをはじめ磁気圏 - 電離圏系に強い電流が流れる。一方サブストームは、磁気圏対流が強まってから1時間程度でプラズマシートでエネルギー解放過程が生じるものである。その解放過程はリコネクション等の不安定性で、そこにはプラズマシート中でのスケール間結合過程が関与している。また、宇宙嵐でもサブストームでも、磁気圏 - 電離圏間相互作用が重要な役割を果たしている。

天体の分野では、様々なエネルギー解放現象がある。なかでも、太陽大気におけるエネルギー解放はその典型的なものである。太陽フレアでは10の29乗から31乗 erg の磁気的エネルギーが数10分から数時間のあいだに解放される。フレアを駆動する物理的機構は現在磁気リコネクションであると考えられている。しかしながら、磁気エネルギーの蓄積や、リコネクションのトリガー、磁場拡散に関する微小スケールの物理など問題点は残されている。

太陽コロナ加熱の問題はもう一つの興味ある問題である。太陽コロナは低温大気の外側（光球・彩層）にありながら数百万度Kの温度を保っている。まだ、はっきりした結論は得られていないが、二つのメカニズムが提案されている。一つは非常に多くの小リコネクションによる加熱であり、もう一方は磁気流体波の散逸による加熱である。SPLAOR-B 観測衛星はこの問題にチャレンジする。

超新星爆発は星の一生の終わりを告げる巨大なエネルギー解放現象である。線バーストのエネルギー源は極超新星と呼ばれる超新星の巨大なものと考えられている。超新星の物理には大きな課題があり、II型超新星の爆発そのものの物理機構はまだ十分に理解されていない。最近では、ニュートリノ輸送や状態方程式などの効果に加え、巨視的な非対称性の効果が注目を集めている。とくに、熱対流、強い自転、および磁場の効果が議論されている。