

論文内容の要旨

論文題目 Configuration of
 the thin current sheet in substorms
 (磁気圏尾部におけるサブストーム時の
 薄い電流層の構造)

氏名 浅野 芳洋

地球磁気圏尾部の反平行磁場に挟まれて存在する Neutral sheet 近傍の電流層は、通常は $3R_E$ 程度の厚さを持ちプラズマシート内の広範囲に渡って存在している。このような状態でのプラズマは十分に流体的な記述が出来、MHD の式から電流密度は

$$\vec{j}_\perp = \frac{\vec{B} \times \nabla P}{B^2} + \frac{\vec{B}}{B^2} \times \nabla \cdot [(p_\parallel - p_\perp) \frac{\vec{B}\vec{B}}{B^2}]$$

と記述される。プラズマシート内のプラズマ圧の等方性とイオン/電子温度の差からこの電流は主にイオンの圧力勾配によって作られていると考えられて来た。しかしこの電流層がイオンの慣性長程度まで薄くなってくると、イオンは流体的な振るまいから外れ、粒子的な描像が必要になってくる。また電流への電子の運動の寄与が大きくなって来るため、単一流体 MHD では十分小さいとして無視されていた一般化されたオームの法則

$$\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B} = \eta \vec{j} + \frac{1}{ne} (\vec{j} \times \vec{B} + \nabla P_e) + \frac{m_e}{ne^2} \frac{\partial \vec{j}}{\partial t}$$

の右辺のうち Hall 電流項 ($\vec{j} \times \vec{B}$) の影響が無視できなくなる。

近年サブストーム Growth phase 後半から Expansion phase にかけてのシミュレーションや理論計算などにおいても電子の振るまいや電流の発生機構について議論されて来ており、磁気圏では電流密度の増加した薄い電流層ではしばしば電子の振るまいが重要となることが示されている。これらのことから、イオンと電子の電流への寄与やその機構を実際に観測し明らかにすることは、サブストームの発生機構や磁力線再結合の物理を更に理解していく上で重要である。

過去の衛星観測では実際に Growth phase から Expansion phase にかけて、イオンの慣性長 (1000km 弱) と同程度の薄い電流層が形成されることが確認されている。しかしこれらはみな磁場の変化をもとに求められたものであり、プラズマのデータから直接電流の様子を調べられたものは無かった。この原因の一つに磁気圏における電子計測の困難さによるものがある。これまでの計測技術では電子のプラズマシートにおける熱速度 (約 10000km/s) の 1% 程度にしかならないイオンと電子の相対速度を精度良く求めることは困難であった。今回 GEOTAIL 衛星の計測で得られた電子のデータから種々の較正を行い、その結果イオンだけでなく電子の速度、温度などの物理量を求めることに成功した。本研究ではイオンと電子のモーメントデータから電流を評価し、サブストーム時の薄い電流層の形成から解消までのプラズマの運動と電流層の構造、Hall 電流項の影響についての解析と議論を行った。

本論文は全部で 7 章で構成される。第 1 章は全体的導入部、第 2 章は解析に用いた GEOTAIL 衛星の観測機器および方法、特に電子とイオンの速度差から電流密度を求めて電流層の厚さを求めるための方法について説明し、尾部電流層の一般的な性質について述べている。

第 3 章より第 6 章が本論文の主要部で、実際のサブストーム時の電流層の解析結果を示す。主な結果は以下の通りである。まず第 3 章では典型的なサブストームの例について詳細に調べ、第 4 章では統計的な解析を行った結果、Growth phase から Early expansion phase にかけての磁気圏近尾部では徐々に薄い電流層が形成されていく様細が明らかになった。また、この薄い電流層の発達は主にオンセット時の X-line 生成領域より地球側で起こり、X-line の生成領域より尾部側や X-line の生成されない磁気圏側面部ではこの電流層の thinning は見られないということが明らかになった。この結果は X-line は形成された薄い電流層の最も尾部側付近で生じるということを示している。この薄い電流層は B_z の減少とともに発展し、同時に大きな Neutral sheet 向きの E_z が現れて電子が朝方側にドリフトし、電流を運ぶようになるということが明らかになった。またこの電流層は時間的空間的変化が大きく、変動に伴ってしばしば Neutral sheet からやや離れた部分で最も強い電流が観測された。これは過去のモデルなどでは言及されていない一時的、局所的な構造の存在を示している。

第 5 章では Expansion phase の X-line 近傍の post-plasmoid plasma sheet における電流層の解析をイベント 2 例と統計解析を用いて行い、この領域での電流層の二次元的な構造を得た。Cross-tail 方向には Neutral sheet からやや外れた領域で電流が大きくなる様子が観測された。この領域は X-line のまわりに形成される slow shock の領域であり、Neutral sheet 向きの強い E_z に伴って粒子は朝方向きにドリフトして電子による電流を作っていることが明らかになった。一方 Neutral sheet 付近のやや電流が弱い領域では電子だけでなく夕方向きに流れるイオンも電流を担っている。この領域のイオンはまだ完全に熱化しておらず、高エネルギーの成分とやや低エネルギーの成分の 2 つの成分に分かれている様子が観測された。このうち高エネルギー成分のイオンは強く夕

方側へ加速されており、磁気再結合領域での夕方側向きの電場により加速されたものと考えられる。これが電子と同等程度の大きさの電流を担っているということが明らかになった。この時の電流層は X-line に近づくにつれて薄くなり、近傍では 500km 程度にまで薄くなるイベントも観測された。また X-line から離れると neutral sheet 付近の電流層は徐々に厚くなり電場 E_z の観測される領域が neutral sheet から離れた外側へと限られていく傾向が見られた。

X-line 近傍領域では cross-tail 方向だけではなく、XZ 面内で X-line へ出入りする向きの電流の構造も得られた。このうち外向き (X-line から出る方向) の電流については電子とイオンの速度差が大きいため過去にも何度か観測されて来たが、本研究ではこの電流系を統計的に解析し、それぞれの電流の流れる領域を明らかにするとともにその幅を見積もった。その結果、外向きの電流は Plasma sheet boundary layer を磁力線に沿って電子が流れ込むことによって生成されており、幅は約 500km であると見積もられた。内向き (X-line 方向) の電流は X-line 近傍では比較的 b_x (磁場強度をローブの磁場で規格化した値) の小さい Neutral sheet 近傍でも電流が見られるが、X-line から離れると少し Neutral sheet から離れた場所、主に $0.4 < b_x < 0.8$ の slow shock の領域と重なるように流れていることが明らかになった。この領域ではイオン、電子とも外向きに流れているが、電子の方が速度が速いため速度差によって内向きの電流が生じているという結果が得られた。これらの電流の境界は $b_x \sim 0.85$ 付近にあり、これは X-line からやや離れた領域でよりはっきりするという結果が得られた。またこの電流系 (Hall 電流系) の出入りにより X-line の前後、南北で B_y が四重極構造を持って現れていることが一般的にも示された。

第 6 章においては、Expansion phase から Recovery phase にかけて、cross-tail 方向の電流層が磁場の形状変化 (dipolarization) とともに薄い電流層から非常に幅の広い電流層へと変化する際の解析を行った。この時、両電流層の境界域では電流密度は B_z の増加とともに速やかに減少し、電流層が急速に厚くなっていく様子が得られた。多くの場合これは地球向きプラズマ高速流の終了と前後しており、プラズマの高速流が見られなくなるとともに B_z が増加する傾向が示された。またこれと同時に夕方側から朝方側に向かう電流が生じていることが明らかになった。これは高速流の地球向き速度の急激な減少により生じた慣性電流であると考えられる。過去の観測と同様この dipolarization は地球近傍で発生し、時間とともに NENL 領域にまで尾部方向へ広がっていくという結果が得られている。また、その規模が地球から遠くなるにつれて小さくなる様子も得られた。特に最初に形成された X-line の場所より尾部側のプラズマシートではプラズモイドの放出により存在していたプラズマが一掃されるためプラズマシートが一度非常に薄くなり、その回復後に起こる弱い dipolarization は先にサブストームが終了するなどの場合まったく起こらない場合も見られた。

第 7 章ではこれら全ての結果のまとめをおこなっている。