

# 北向き惑星間空間磁場のときの磁気圏昼側低緯度境界層形成における 磁力線再結合および拡散過程の役割：ジオテイル衛星観測データの解析

中井 仁<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 小淵沢総合研究施設

## Roles of reconnection and diffusion in the formation of the dayside low-latitude boundary layer with northward IMF: Observations by Geotail

Hitoshi Nakai<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Kobuchisawa Institute for Nature and Education*

Plasma structures of the low-latitude boundary layer (LLBL) of Earth's dayside magnetosphere are examined, using the data set of three-dimensional phase space density obtained by Geotail when the interplanetary magnetic field is northward. The double layer structure of the LLBL, i.e. the outer and inner boundary layers, is identified more clearly than those defined in previous studies. Using distinct definitions, properties of plasma in the LLBL are examined in detail. High-energy ion beams ( $\sim 1$  keV) along field lines are frequently observed in the magnetosheath, the magnetopause current layer, and the outer boundary layer in the noon sector, suggesting that reconnection is responsible for the formation of the LLBL. In agreement with previous works the distributions of low-energy ions ( $\leq 0.1$  keV) often exhibit parallel or anti-parallel anisotropies in the outer boundary layer. The directions of the high energy ion beam in the outer boundary layer are opposite to the anisotropy of low-energy ions in many magnetopause-crossing events. This feature suggests that magnetosheath magnetic-field lines which have reconnected with lobe field lines poleward of a cusp penetrate into the inside of the earthward edge of the magnetopause current layer. These field lines form the outer boundary layer, which is primarily filled with open field lines connected to Earth at one terminal. The following observational characteristics of the inner boundary layer have been obtained: The inner boundary layer is observed near the subsolar region; and the hot component of ions with significant intensity is identified in the energy spectra of ions in the inner boundary layer. These facts contradict the dual-lobe reconnection hypothesis for the formation of the inner boundary layer. It is suggested that a diffusion process which occurs at low altitudes is probably responsible for the formation of the inner boundary layer.

ジオテイル衛星による 3 次元位相空間密度データを用いて、昼側磁気圏境界付近のプラズマ構造を、5 時から 17 時（磁氣的地方時）の間で得られた 21 件の境界層横断事象について調べた。本論文では 1996 年 12 月 25 日の事象を例示して、正午セクターにおける LLBL の、低緯度境界層 (LLBL) のプラズマ構造を述べ、LLBL の生成機構を考察する。

以下、次の略称を用いる：MSH/magnetosheath（マグネットシース）、MPCL/magnetopause current layer（磁気圏境界電流層）、OBL/outer boundary layer（外部境界層）、IBL/inner boundary layer（内部境界層）、MSP/magnetosphere proper（磁気圏固有領域）。

ジオテイルは、午前から午後側にかけて準太陽点近傍を横切りながら磁気圏境界面を横切った。図 1 は、同事象におけるプラズマおよび磁場の時間変化である。衛星は 3:26:12（世界時）に MSH から MPCL に入り、3:26:49 に OBL へ、3:34 頃に一旦 IBL に入ったがすぐに OBL に戻り、3:36:30 に改めて IBL に入り、3:39:7 に MSP に進入した。図 1 ではそれぞれの領域を次のように色分けしている：灰色=MSH、青=MPCL、緑=OBL、黄色=IBL、赤=MSP。MSH は衛星の位置および低温、高密度の特徴から判別が可能である。MPCL は、磁場の変化を参照する。ただし、MSH の磁場が真北に近いときは判別が困難な場合がある。OBL、および IBL、MSP の区別は、下に述べるように、主としてイオン微分束のエネルギー・スペクトル、特に磁場に垂直なイオン束のスペクトル、を基に行っている。

図 2 に各領域におけるスペクトルの例を示す。黒丸は磁場に垂直な成分（ピッチ角 $=75-105^\circ$ ）、三角（オレンジ）は磁場に平行な成分（ピッチ角 $<30^\circ$ ）、逆三角（黄緑）は反平行な成分（ピッチ角 $>150^\circ$ ）である。OBL は、MSH とよく似た、しかし若干加熱された、イオン分布を持つのが特徴である。IBL には、OBL 的な低温成分と MSP 的な高温成分の二成分がある。MSP は、高温成分のみからなることが多いが、図 2(f)のように、極低温で沿磁力線方向に卓越した成分が、IBL との境界付近に現れることがしばしばある。これらの分別方法は、主として Le et al. [1996] に依拠する。本研究の解析によって、少なくとも正午セクターにおいては、彼らの、LLBL を OBL と IBL に分類する方法が有効であることを確認した。

MSH と MPCL（図 2 (a) および (b)）に約 2keV に極大値を持つピークが見られる。これらのイオンビームは、おそらく再結合によって生じたものである。MPCL のスペクトルには、低エネルギー領域で反磁力線方向の異方性が見

られる。これを（沿磁力線）低エネルギー・イオンフローと呼ぶことにする。OBL に進入した直後には、イオンビームは見られず、MPCL と同様、反磁力線方向の低エネルギー・イオンフローが見られる（図 2 (c)）。時間的に IBL により近くなって、OBL でもイオンビームが現れる（図 2 (f)）。このビームは強度的には弱いだが、位相空間密度の三次元ダイアグラムで見ると、空間的収斂度の高いビームであることが分かる。OBL 内での高エネルギー・イオンビームと低エネルギー・イオンフローが、互いに逆向きであることが大きな特徴である。

21 件の境界層横断事象のうち、7 例が 10:00~14:00 (MLT) の正午セクター内で観測された。そのうち 5 例に OBL が存在し、残りの 2 例では明らかな OBL の存在は認められなかった。OBL が存在した 5 例のうち 2 例（上記の 1996 年 12 月 25 日の事象を含む）は、境界層横断直前の磁場が  $|B_M| > B_L$  だった。すなわちシーズ磁場が地磁気に対して大きな角度をもつ場合でも、OBL が形成されることを意味する。OBL が認められなかった 2 例は、IMF が北転後 30 分以内の観測であった。従って、IMF 北転の 30 分以降は、OBL が存在する可能性が高い。また、OBL が存在するときは IBL も存在した。上記の高エネルギー・イオンビームとその逆向きの低エネルギー・イオンフローの関係は、かなり普遍的な現象として観測された。少なくとも、両者が同じ方向をもつ事例は観測されなかった。

以上の観測的特徴、および朝側と夕方側側面における観測、さらに先行研究の観測をもとに、正午セクターにおける LLBL 形成の機構として、次のような過程が考えられる。

1. MSH の磁力線の一部が MPCL に侵入すると同時に、地磁気方向に向きを変える。
2. MPCL に侵入した MSH の磁力線が、カスプの極側で地磁気と再結合する。
3. 地磁気と再結合した磁力線は MPCL の内側へ侵入し OBL を形成する。
4. OBL は一方が開いた磁力線によって形成される（一部は、午後あるいは午前セクターで 2 度目の再結合を行い閉じるが、正午セクターの OBL への影響は小さい）。
5. MSP 領域に OBL から低エネルギー・イオンが拡散によってもたらされると同時に、高エネルギーイオンが大気へ降りこむことによって IBL が形成される。

## References

Le, G., and C. T. Russell, J. T. Cosling, and M. F. Thomsen, ISEE observations of low-latitude boundary layer for northward interplanetary magnetic field: Implications for cusp reconnection, *J. Geophys. Res.*, 101, 27,239 – 27,249, 1996.

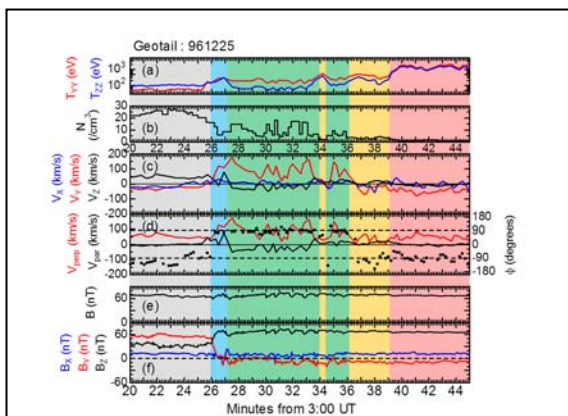


Figure 1. Geotail's data during the December 25, 1996 event: (a) temperature; (b) ion density; (c) the three components of plasma bulk velocity in GSM coordinates; (d) the perpendicular and parallel components of the bulk velocity (black and red lines, respectively), and the azimuthal angle  $\Phi$  of the perpendicular component of the bulk velocity (dots); (e) the magnitude of the magnetic field; (f) the three components of the magnetic field in GSM coordinates.

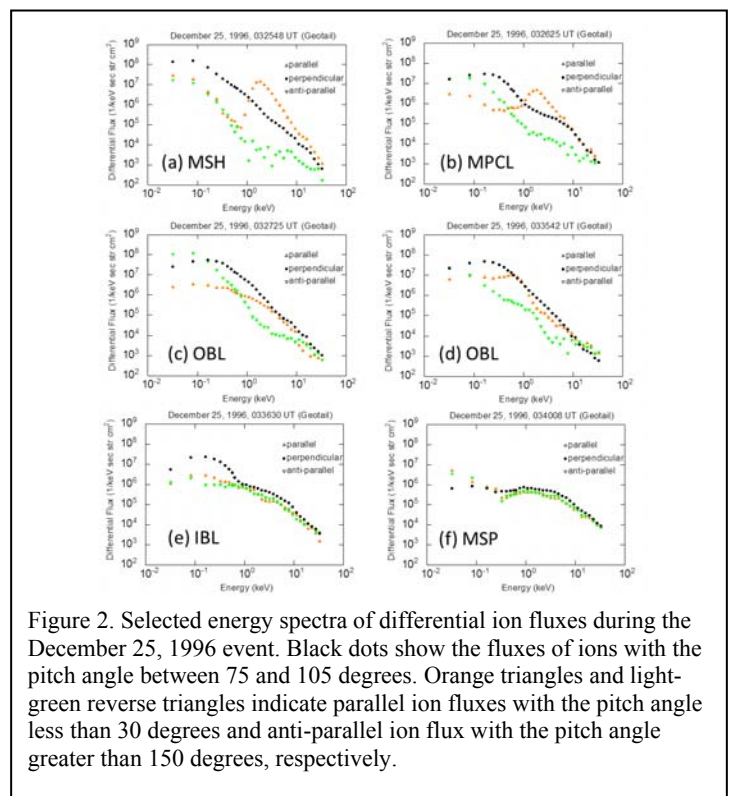


Figure 2. Selected energy spectra of differential ion fluxes during the December 25, 1996 event. Black dots show the fluxes of ions with the pitch angle between 75 and 105 degrees. Orange triangles and light-green reverse triangles indicate parallel ion fluxes with the pitch angle less than 30 degrees and anti-parallel ion flux with the pitch angle greater than 150 degrees, respectively.