極光帯オーロラX線と静止衛星位置高エネルギー電子の地磁気共役性*

平島　洋**

Geomagnetic Conjugacy of Auroral X-rays and Energetic Electrons Observed at the Geostationary Satellite

By
Y. HIRASIMA

Abstract: A correlation between auroral X-rays (15～85 keV) observed with the balloon (April 9, 1975 UT, Thompson) and electrons (28～50 keV) at geostationary satellite ATS-6, has been researched. Geomagnetic filed configurations by some models of the magnetosphere were pictured, then a geomagnetic latitude λ_{mag} on the earth surface traced back along a field line has been used as a new parameter for analysis of geomagnetic conjugacy. When the correlation between auroral X-ray counts in auroral zone and high energy electron counts at the geosynchronous orbit is good, geomagnetic conjugacy realizes, if an appropriate model of the magnetosphere is adopted. This realization of geomagnetic conjugacy is not dependent on sizes of electron pitch angles. An effect of diamagnetism by plasma particles has been discussed. It is convenient for explanation of a neutral line in the tail of the magnetosphere, that direction of field line at the midnight ATS-6 position (6.62 R_E) approaches equatorward in the time of large geomagnetic disturbance.

1975年4月9日 UT に Thompson で行われた気球観測による 15～85 keV のオーロラ X 線と，赤道面静止衛星 ATS-6 による 28～50 keV の電子との相関関係について調べた．magnetosphere の各モデルについて磁力線群を描き，磁力線の根元の地表上地磁気緯度 λ_{mag} を，地磁気共役性の解析の新しいパラメーターとして用いた．適当な magnetosphere のモデルを用いれば，極光帯でのオーロラ X 線と赤道面静止衛星 ATS-6 位置での高エネルギー電子の相関が良い時，地磁気共役性が成立していることが見出された．これは，赤道面での高エネルギー電子のピッチ角の大小にかかわら

---

* 宇宙研特別事業費による研究論文

** 立教大学理学部

This document is provided by JAXA.

ず成立している．プラズマ粒子による反磁性的効果についても検討された．地磁気擾乱の大きい時，最夜中子午面付近の ATS-6 位置（6.62R_E）で磁場の方向が赤道面に平行な方向に寄っていることは，magnetsphere の tail の磁気中性線を説明するのに都合がよい．

1. はじめに

オーロラ X 線は，magnetosphere から precipitate した高エネルギー電子が地上 100 km 付近で制動輻射を起こすことにより生ずると考えられている［*1*］，［*2*］．これらの高エネルギー電子はどこから伝播してくるのかが問題となる．この点を解明するのに，静止衛星位置での高エネルギー電子，および静止衛星と地磁気共役な（広義の共役：同じ磁力線上にあるという意味の共役であり，以後この意味で共役という言葉を用いる．）地点でのオーロラ X 線の相関関係を調べることが有力な一つの方法である．また，地磁気共役性を調べることは magnetosphereのモデルとも関連していて，これらのモデルに対しても示唆を与える．地磁気共役性の研究で，南北の極光帯の共役点での同時観測をするのも一つの方法である．しかしながら，極光帯におけるオーロラ X 線の観測と，それに地磁気共役な地点にある赤道面静止衛星による高エネルギー電子の観測との相関関係を調べることは有力な方法であり，この場合，magnetosphere の磁場およびプラズマ状態の直接観測を使用できる点が非常に大きな利点である．

2. オーロラ X線と高エネルギー電子の地磁気共役性の新しい解析方法

Barcus et al.［*3*］は南北の両極光帯の地磁気共役な地域でオーロラ X 線の観測，riometer による電離層吸収の観測の相関関係を調べた．それによると昼側では地磁気的に共役な関係にあることが見いだされているが，夜側では共役性が成り立っていない．これは粒子の precipitation 領域が地磁気緯度で非常に狭いこと，およびオーロラ X 線観測気球の水平飛行による移動で，観測点が共役点からずれてしまったことによるとしている．Eather et al.［*4*］は，ATS-5 と大体地磁気共役な地点 Gillam（カナダ）で子午面を scan する photometer でオーロラの光学観測を行い，静止衛星 ATS-5 による電子，陽子の観測と比較し，地球の近くでの磁力線に沿っての加速の可能性を論じている．Parks et al.［*5*］は，ATS-6 位置の magnetosphere 粒子と，それに共役な地域での気球搭載 photometer によるオーロラについて調べている．静止衛星 ATS-6 位置の高エネルギー電子，陽子とオーロラの相関が良いことが見いだされており，magnetosphere と電離層での高エネルギー粒子の振舞が論じられている．

Substorm 時のオーロラ X 線と静止衛星 ATS-1 による高エネルギー電子との相関関係については，初期に Parks et al.［*6*］によって行われている．それによれば，20 keV 以上のオーロラ X 線と 50 keV$<E_e<$150 keV の電子の強度変化について相関の良い events を発見しており，ある event では ATS-1 の高エネルギー電子の強度が 6 倍にわたって相関のよいことが示されている．ATS-1 では同時にカリフォルニア大学ロス・アンジェルス校（UCLA）によって磁場の観測も行われており，Parks et al. は磁束密度 B の値から Mc Ilwain の L 値を $L=(0.311/B)^{\frac{1}{3}}$ によって換算し，解析にこの L の値を用いている．こ

This document is provided by JAXA.

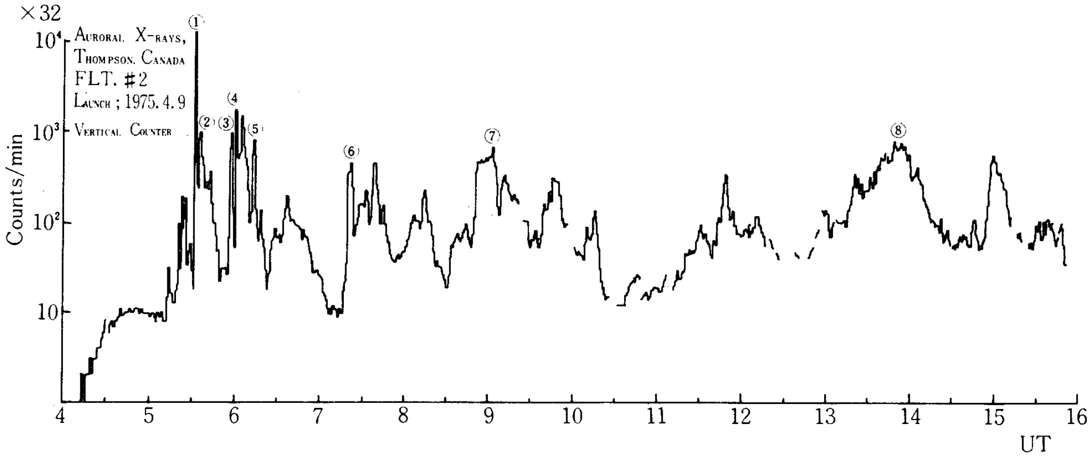
れは ATS-1の位置は地磁気赤道面にあると近似していることに当る．また，(L, B)座標をとり L は前述の式から求めたということは，magnetosphere としては ATS-1の軌道位置 $R=6.62R_E$(R：地球中心からの距離，R_E：地球平均半径)では近似として双極子のモデルを用いたことになる．当時としてはこの L をパラメーターとして用い成功を収めている．しかしながら，その後，人工衛星による magnetosphere の磁場の直接観測データも増加し，それらのデータを用いた新しい magnetosphere のモデルも提唱されている（例えば，Olson and Pfitzer [7]；Mead and Fairfield [8]）．地磁気共役性を議論する場合，磁力線の細かいダイナミックな変化，およびプラズマによる反磁性的効果が問題となる．$L=6\sim7$ の赤道面で 30 keV の電子の Larmor 半径は 5 km であり小さい．電子の入射ピッチ角を α とし，電子の速さを一定としたとき $\sin^2\alpha/B=\mathrm{const}$ が断熱不変量であることを考えれば，この程度のエネルギーをもった電子はほとんど磁力線にはりついて運動するといってよい．従って，静止衛星位置の高エネルギー電子と極光帯オーロラX線の地磁気共役性を厳密に議論するのには L をパラメーターとするのでは十分でなく，magnetosphere の磁力線を丹念にたどらなければならない．そうした後で，地磁気共役性を解析するのに“適当なパラメーター”を用いなければならない．ここで，静止衛星の地球に対する位置も時間の関数として正確な値を用いることが要求される．南北の両極光帯の地磁気共役点について対称な magnetosphere のモデルを採用する限りにおいては，解析のパラメーターとして L で代用することができる．しかし，太陽風の方向が地磁気双極子の方向と垂直でない場合，magnetosphere 内での複雑な電流分布を考えた場合などのように，地磁気赤道面について非対称な一般的な magnetosphere のモデルを用いる場合には，地磁気共役性を論じるのにパラメーターとして Lを用いるのはよくない．地磁気共役性の解析の“適当なパラメーター”としては，各モデルの磁力線を丹念に追い，つながっている磁力線の根元の地表上地磁気緯度 λ_{mag} を用いるとよい．このようなパラメーター λ_{mag} を用いると地磁気共役性の問題が明確に解析しれていくことを以下に示してゆく．

3. Thompson におけるオーロラX線気球観測と ATS-6による電子観測との相関関係

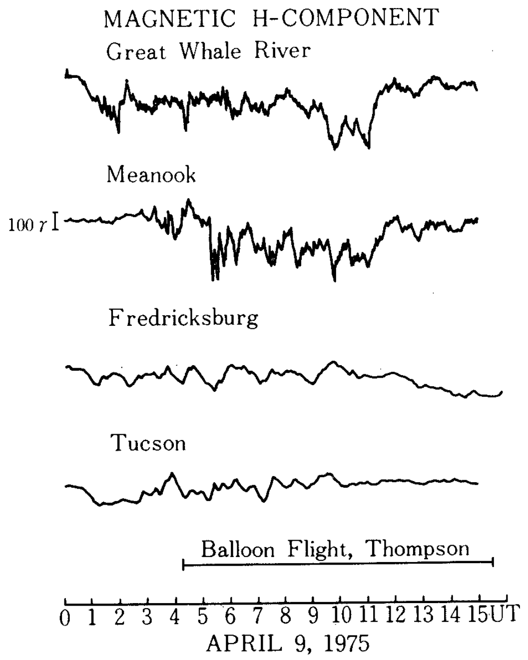
Yamagami et al. [9] はカナダの Thompson (55.8°N, 262.1°E)で1975年4月8日，9日 UT に substorm に伴う活発なオーロラX線バーストの気球観測を行った．オーロラX線のエネルギーは 15～85 keV である．ATS-6の高エネルギー電子との相関を調べるのに用いたものは，1″$\phi\times$1 mm の NaI (Tl) シンチレーション・カウンターで，円筒型コリメーターにより全視野角を 70° にし，その中心軸が天頂方向に向いた“vertical counter”によるオーロラX線のカウントのデータである．ATS-6による観測と比較して興味があったのは4月9日 UT のデータであり，その時の“vertical counter”によるカウントの時間変化を第1図に示した．この時，Thompson の周辺の地点で観測された地表の地磁気水平分力の時間変動を示したのが第2図である．Thompson に最も近いのが Meanook (54.62°N, 246.67°E) で 400γ 程度の擾乱が起っている．

1975年4月9日 UT には ATS-6 (最夜中時：0.93°S, 265.8°E) は Thompson と大体地磁気共役な点にあった．地磁気共役な点は厳密に言えば，太陽活動の大きさ，magneto-

This document is provided by JAXA.



第1図　Thompson，1975年4月9日 UT における気球観測オーロラX線カウントの時間変化（"vertical counter" について）．



第2図　1975年4月9日 UT における Thompson 周辺各地の地磁気水平分力の時間変化

This document is provided by JAXA.

sphere のモデルによって異なってくるが，それは地磁気共役性の厳密な議論と深く関係しているので後の節で詳述する．ATS-6上で測られたミネソタ大学（UM）による高エネルギー電子のデータ，カリフォルニア大学サン・ディエゴ校（UCSD）によるプラズマ粒子のデータ，カリフォルニア大学ロス・アンジェルス校（UCLA）による磁場のデータを地磁気共役性の解析に用いた．

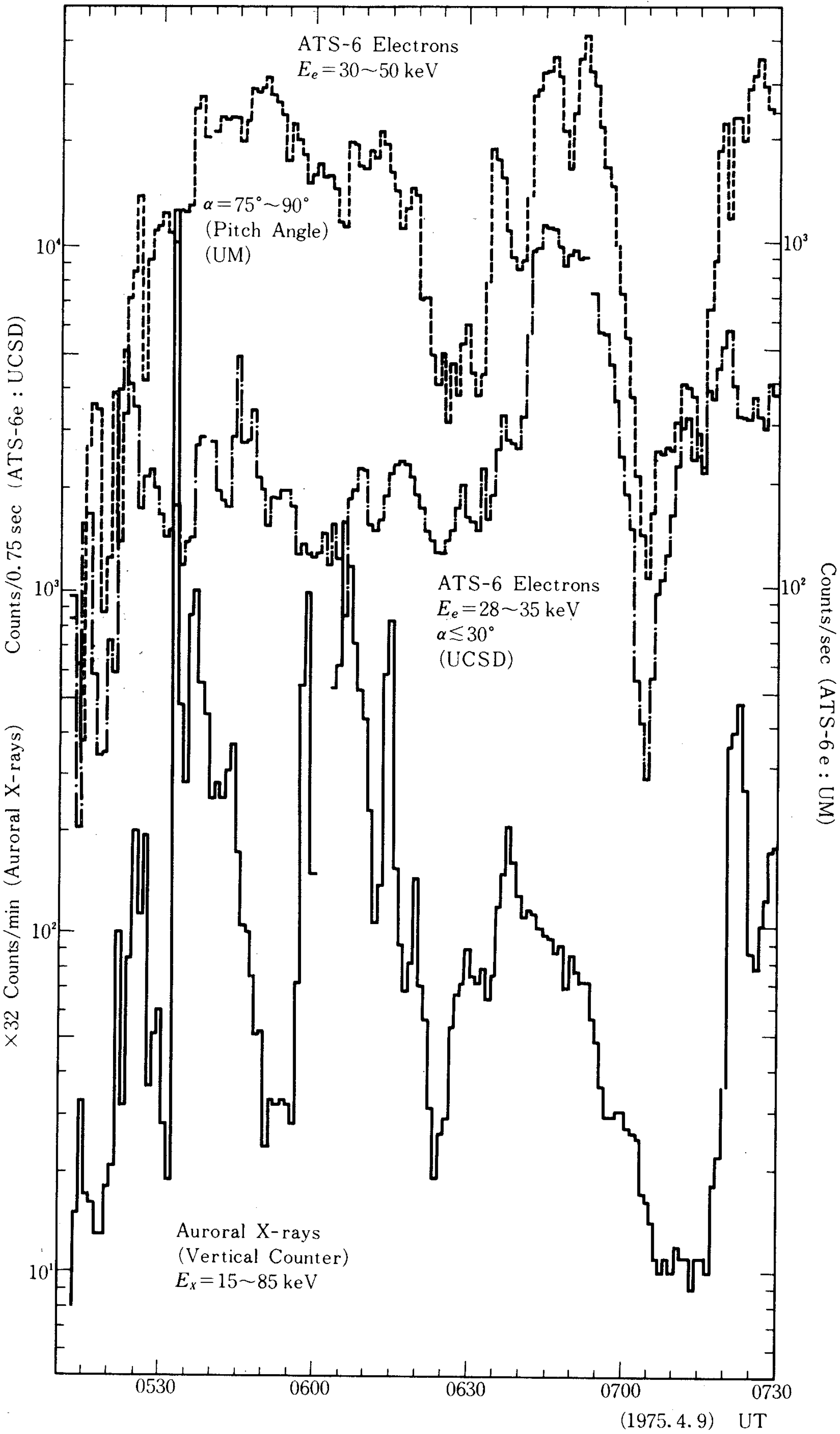
気球飛揚時間中で，0512〜0729 UT の間にオーロラX線と ATS-6位置の高エネルギー電子との相関関係が良い場合が見いだされたので，この時間帯について詳しい解析を行った．第3図に，気球観測によるオーロラX線のカウントの時間変化および ATS-6 位置における高エネルギー電子の時間変化を示した．UM の Walker et al.[*10*]によって観測されたデータのうち 30〜50 keV のエネルギーの電子でピッチ角が 75°〜90° のもの，および UCSD の Mauk and McIlwain [*11*]．によって観測されたデータのうち 28〜35 keV のエネルギーの電子でピッチ角が$\lesssim$30°のものを第3図にプロットした．第3図を見ると，0512〜0531 UT の時間帯と 0654〜0729 UT の時間帯でオーロラX線のカウントと ATS-6 位置高エネルギー電子のカウントとの相関が良いようである．相関関係を定量的に調べるために，0512〜0729 UT の時間について，相関の良い時間帯，相関の悪い時間帯に分けて相関図をとった．相関図の代表的なものを第4図〜第7図に示した．第4図は電子のピッチ角が小さい場合であり，第5図は電子のピッチ角が大きい場合である．いずれも相関の良い場合でオーロラX線についても，電子についてもカウントの変化がほぼ2桁にわたる範囲で相関が良い．第6図は，オーロラX線と電子のカウントの相関がない場合で，オーロラX線カウントが3桁も変化しているのにもかかわらず，電子のカウントは5倍程度しか変化していない．特に，0532 UT 台ではオーロラX線のカウントが非常に増加し，1秒毎の相関図が第7図であるが，これからよくわかるようにオーロラX線のカウントは激しく変化しているのにもかかわらず，電子のカウントはほとんど一定である．ここで，0512〜0729 UT を四つの時間帯に分けて相関係数を計算し図示したものが第8図である．その結果，電子のピッチ角が小さい場合も，大きい場合も共に，0512〜0531 UT と 0654〜0729 UTの二つの時間帯で，オーロラX線と ATS-6位置高エネルギー電子のカウントの相関がよいことがわかった．

ここで解析した時間帯では地磁気変動は活発で，0300〜0600 UT では $K_p=6$ であり，0600〜0900 UT では $K_p=5$ であった．

4. ATS-6による磁場およびプラズマ粒子の観測とその解析

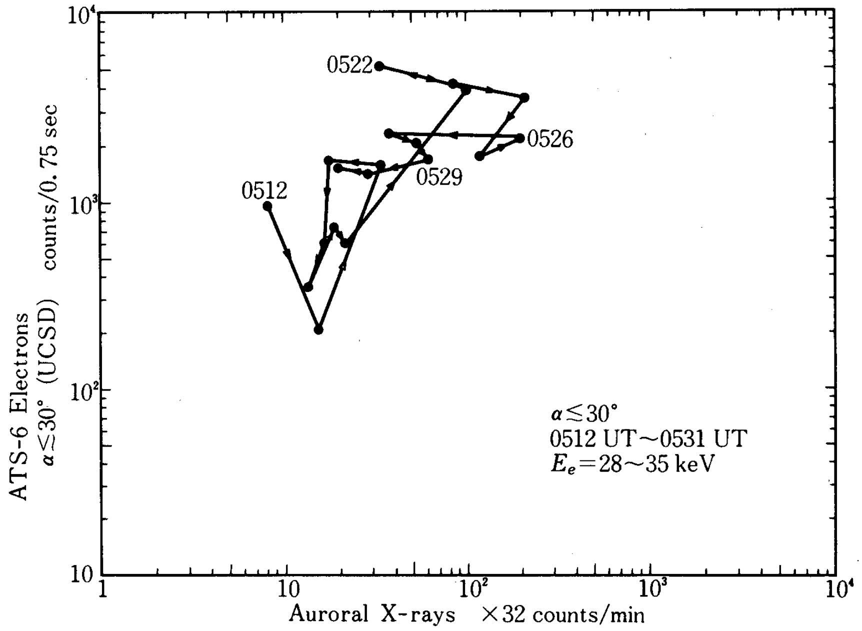
UCLA の McPherron et al. [*12*] が ATS-6で fluxgate magnetosphereを用い磁場の観測を行った．この観測結果を用い，試みに従来行われていたような方法で地磁気共役性について調べてみる．すなわち，前に述べたように，双極子モデルをとり，地磁気赤道面の値として，磁束密度 B から $L=(0.311/B)^{\frac{1}{3}}$ によって各時刻における L を求めてみる．これは，ATS-6 位置で磁場の強さが変化したことを，相対的な磁力線の位置とATS-6の位置の関係がダイナミックに変化すると考えて L の変化に置き換えてみたことに相当する．第9図（a）に双極子モデルの場合の細かい時間変化を示した．気球については水平飛行中の位置の移動を考慮して対応する L を求めてある．次に Olson and Pfitzer [7] による

This document is provided by JAXA.

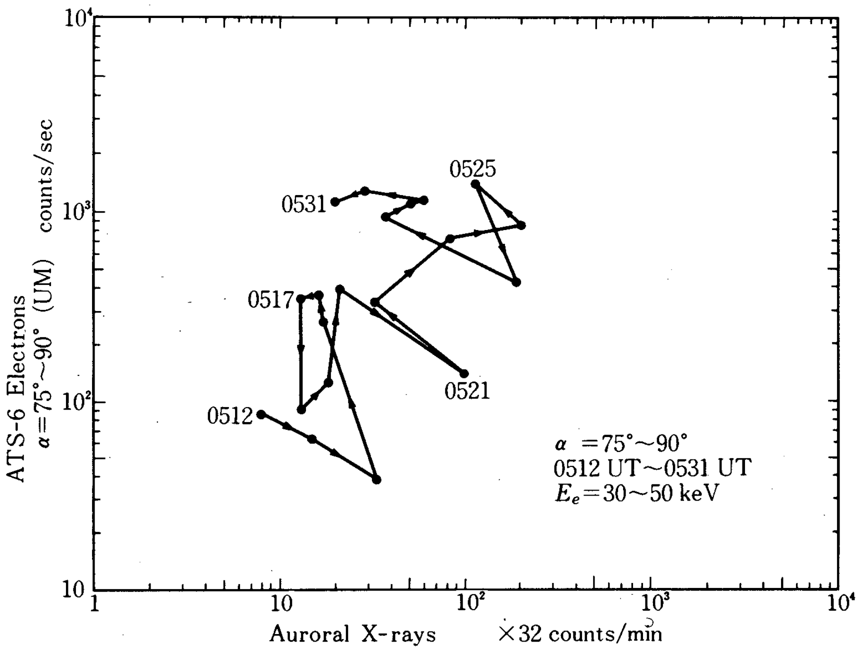


第3図　Thompson における気球観測オーロラX線，および静止衛星 ATS-6 による高エネルギー電子のカウントの時間変化.

This document is provided by JAXA.

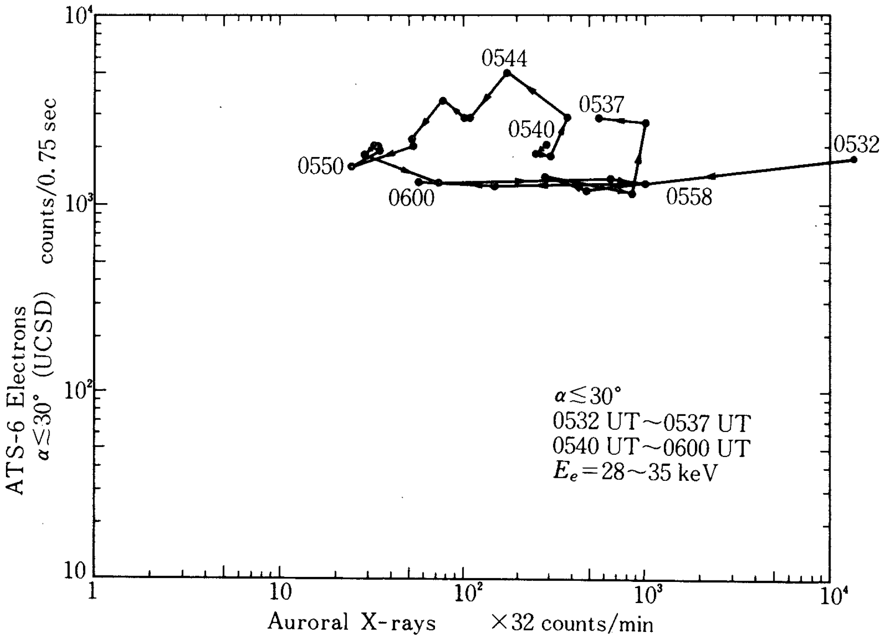


第4図　Thompson における気球観測オーロラX線，および ATS-6 によるピッチ角の小さい高エネルギー電子（UCSD）のカウント相関図で，相関の良い時間帯の例.

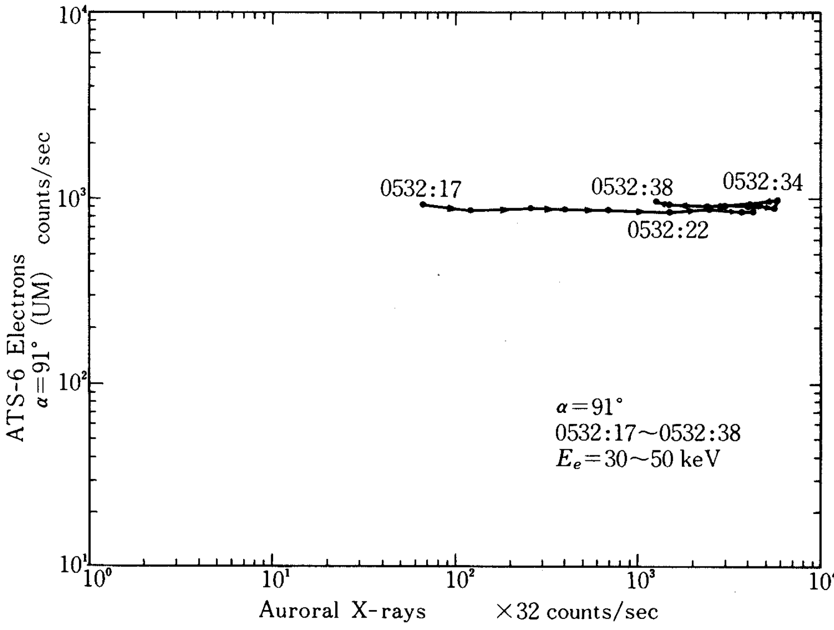


第5図　気球観測オーロラX線，および ATS-6 によるピッチ角の大きい高エネルギー電子（UM）のカウント相関図で，相関の良い時間帯の例.

This document is provided by JAXA.

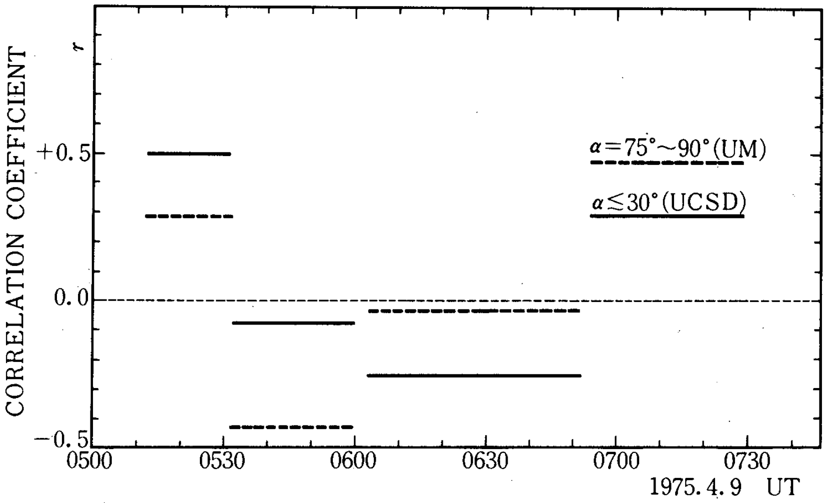


第6図　気球観測オーロラX線，および ATS-6 によるピッチ角の小さい高エネルギー電子（UCSD）のカウント相関図で，相関がない時間帯の例.

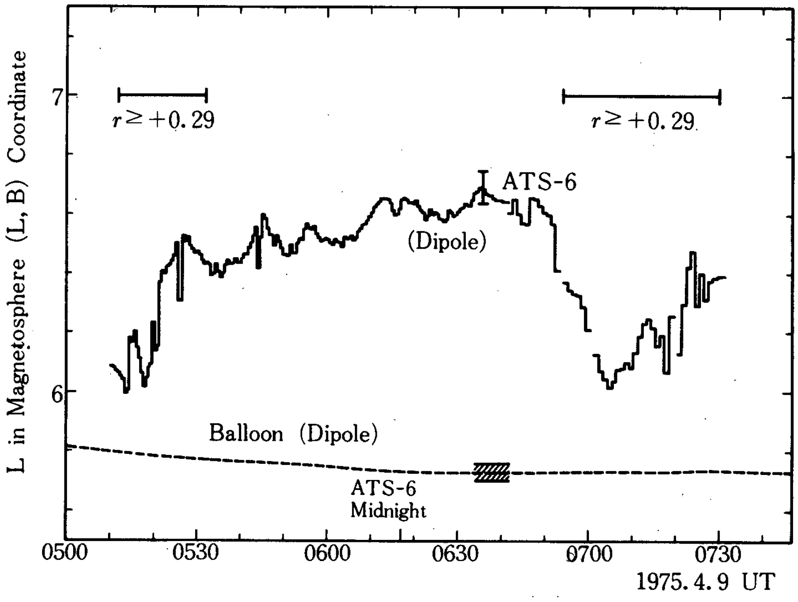


第7図　0532 UT 台の1秒毎のオーロラX線と ATS-6 電子（UM）の相関図

This document is provided by JAXA.

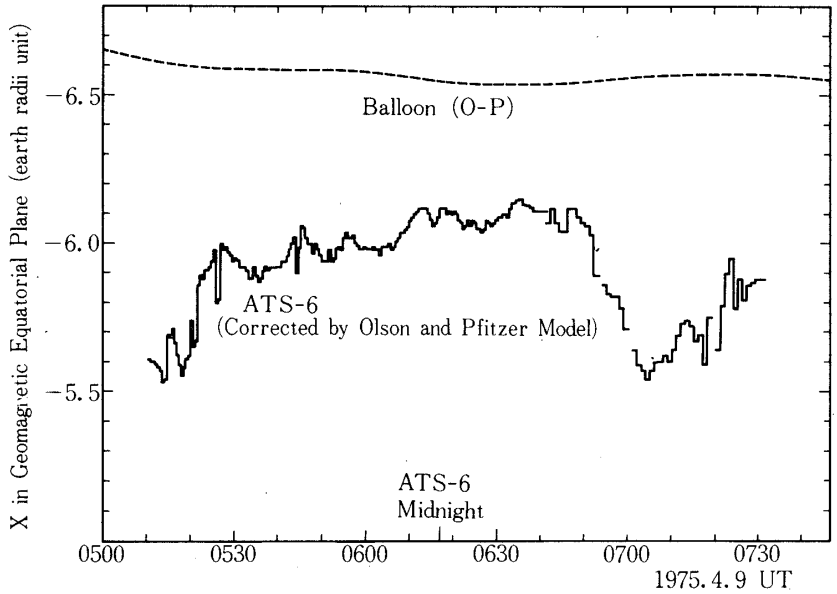


第8図　0512〜0729 UT における，オーロラX線と ATS-6 電子の間の相関係数の時間変化.
実線：電子エネルギー=28〜35 keV；ピッチ角≲30°.
破線：電子エネルギー=30〜50 keV；ピッチ角=75°〜90°

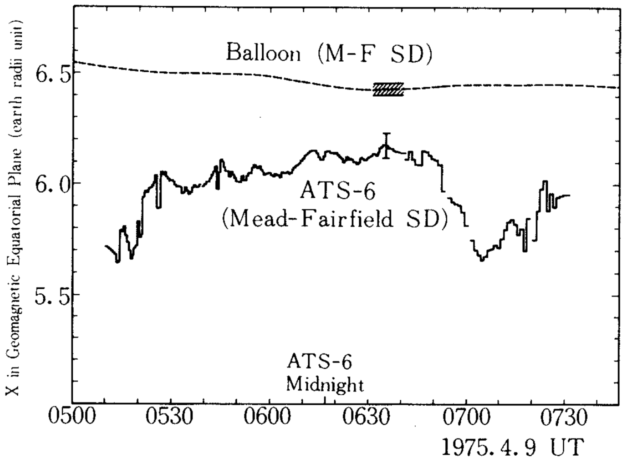


第9図(a)　双極子モデルの場合の，ATS-6の L および気球の L の時間変化. オーロラX線と電子の相関がよい時間帯を記入.

This document is provided by JAXA.



第9図(b)　Olson and Pfitzer モデルの場合，ATS-6位置の B に対応する，赤道面での地球中心からの距離 X (地球平均半径単位)の時間変化，および気球位置から磁力線を追って求めた対応する X の時間変化.

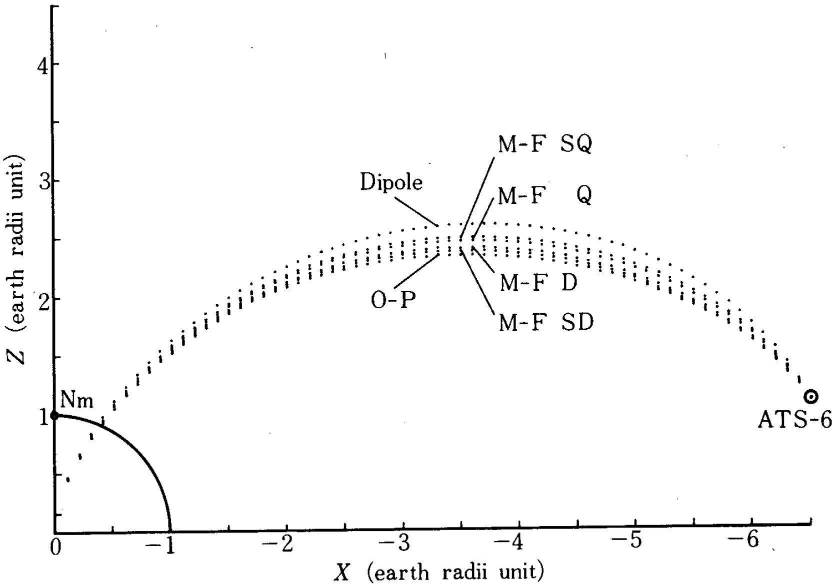


第9図(c)　Mead and Fairfield モデル superdistubed (SD, $K_p \gtrsim 3$) の場合，ATS-6の X および気球の X の時間変化.

This document is provided by JAXA.

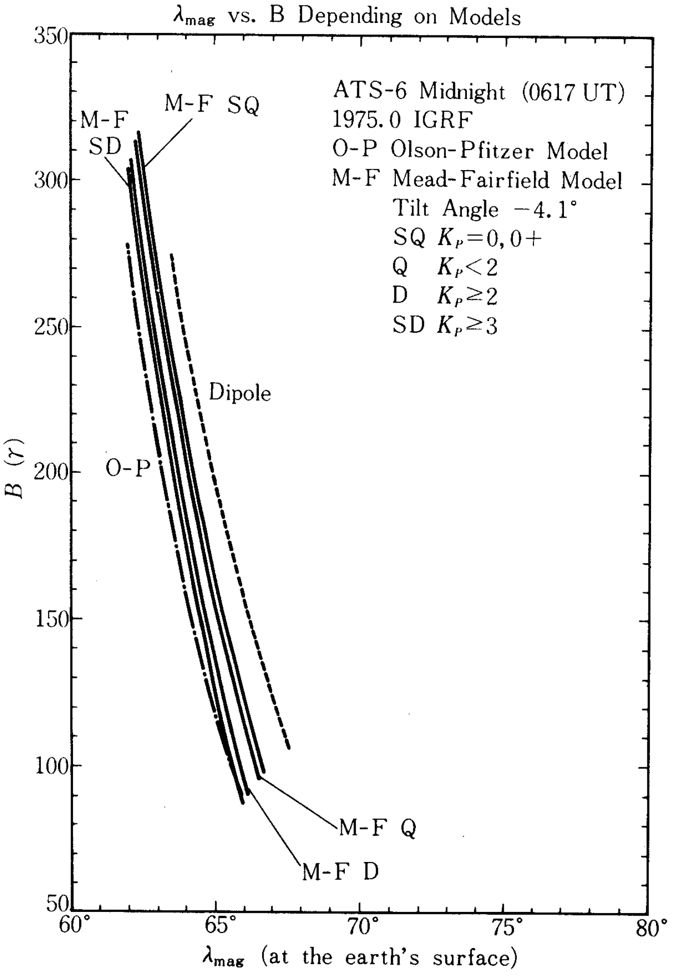
magnetosphereのモデルを用いて，ATS-6位置の B に対応する赤道面の X（地球中心からの距離；地球平均半径単位）の値の時間変化が第9図(b)である．第9図(c)は Mead and Fairfield [8] のモデルで superdisturbed（SD，$K_p \geq 3$）の場合について，ATS-6位置の B に対応する X を求めたものである．ATS-6の L 又は X と，気球の L 又は X が一致すれば，ATS-6と気球は同じ磁力線につながっていて，この時ATS-6による高エネルギー電子と気球によるオーロラX線の相関が良ければ，地磁気共役性が成り立つと考えるわけであるが，第9図(a)〜第9図(c)では両者の L 又は X の値は大きく違っていて一見地磁気共役性がどの時刻にも成り立っていないように見える．しかし，これは解析のパラメーターとして L 又は X をとったのが悪いのである．オーロラX線の親となる高エネルギー電子の Larmor 半径が小さく，電子はほとんど磁力線にはりついて運動することを考えれば，各時刻において，モデルに従って磁力線群を克明に描写することが必要である．

双極子モデル，Olson and Pfitzer のモデル，Mead and Fairfield のモデルについて磁力線群を求めた．第10図に，真夜中子午面における磁力線の一部で ATS-6位置を通るものを示した．また，ATS-6と地球中心を含む線上で，ATS-6付近の磁束密度 B を各モデルについて求めた．これらの計算に基づいて ATS-6と地球中心を結ぶ線上の点における磁束密度 B の値と，それらの点からたどっていった地表における磁力線の根元の地磁気



第10図　真夜中子午面で ATS-6位置を通る各モデルの磁力線の一部．ここでは座標系は，双極子に垂直で太陽方向をX軸の正の方向にとってある．
O-P：Olson and Pfitzer モデル．M-F：Mead and Fairfield モデル．
SQ：superquiet（K_p=0, 0+）．Q：quiet（$K_p<2$）．D：disturbed（$K_p \geq 2$）．
SD：superdisturbed（$K_p \geq 3$）．

This document is provided by JAXA.



第11図　ATS-6 の最夜中子午面で，ATS-6 と地球中心を結ぶ線上での磁束密度 B と，磁力線の根元の地表における地磁気緯度 λ_{mag} との関係. magnetosphere の各モデルについて求めたもの.

緯度 λ_{mag} との関係を第11図に示した. これは，真夜中子午面 (0617 UT が ATS-6 の local time で最夜中) についてである. 0512~0729 UT の間では，λ_{mag} の local time 依存性は 0.03% で無視してよい. Mead and Fairfield のモデルでは太陽活動による地磁気擾乱の程度によって，K_p で分類してある. また，このモデルでは，太陽風の方向と地磁気双極子の方向が直角である場合からのずれの角すなわち tilt 角が考慮されている. Yamagami et al. がオーロラX線の観測を行った 1975年4月9日UT における tilt 角は −4.1°

This document is provided by JAXA.

である．ATS－6の軌道については詳しい軌道要素を用い，地磁気についてはIAGAによる1975.0年のIGRFの値を用いた．

地磁気共役性を議論するとき新しいパラメーターとして磁力線をたどっていった地表の地磁気緯度 λ_{mag} を用いるわけであるが，ここであらかじめ留意して調べておかなければならない重要な事柄がある．磁力線が閉じている領域では電子密度が大きく，地球近傍のプラズマ圏は地磁気活動度によって影響を受ける[*13*]．従って，プラズマによる反磁性的効果によってATS-6付近でもmagnetosphereの磁場がどの程度影響を受けるかを見なければならない．そこでまず，四つの時刻における電子のエネルギー密度と磁場のエネルギー密度を当ってみた結果を第1表に示した．参考のために電子の粒子密度も示してある．電子のエネルギー密度はMauk and McIlwainによって観測された1 eV～82 keVの電子について加え合せたものである．陽子のエネルギー密度が電子のエネルギー密度の約10倍である〔5〕としても，

$$\beta \equiv \frac{1}{2}nmv^2 \Big/ \frac{B^2}{8\pi} < 1,$$

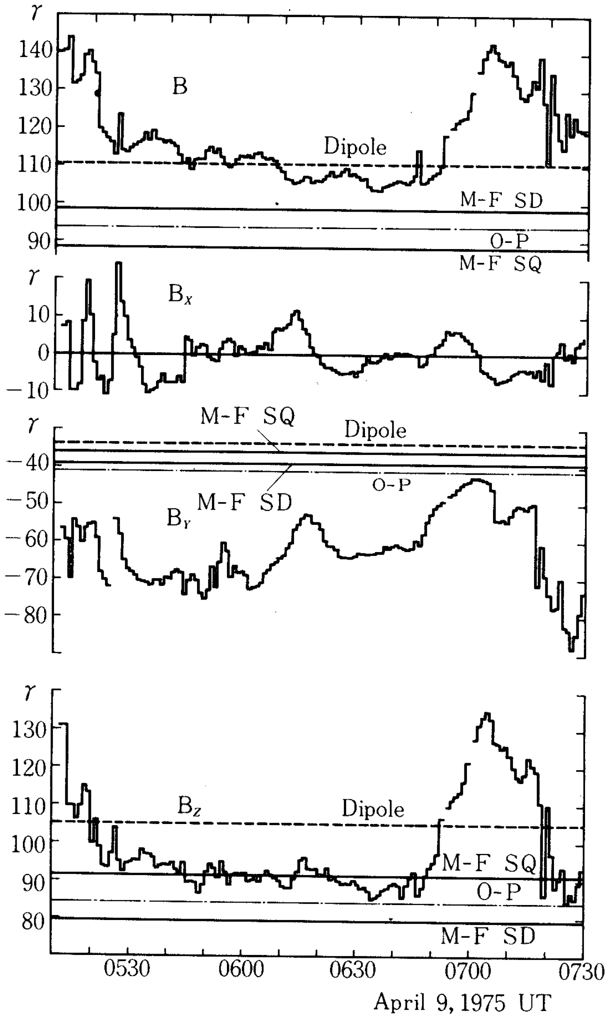
（ただし，n は粒子密度，m は粒子質量，v は粒子の速さ）となり，プラズマの粒子エネルギー密度より磁場のエネルギー密度の方が大きい．また McPherron et al. によって観測された磁束密度の3成分 B_X, B_Y, B_Z を第12図に示した．ここで座標 (X, Y, Z) は衛星座標で，西方向がX正軸の方向，地理的赤道面に平行で地球から外側に向う方向がY正軸の方向，地球回転軸と平行で北向きがZ正軸の方向である．第12図を見ると B_X は－10～20γ の範囲で，0γ の近くでその絶対値は小さい．それに対し，B_Y は－40～－75γ，B_Z は85～135γ で，共に絶対値は B_X よりはるかに大きく，符号も変ってはいない（最夜中におけるATS－6の地磁気緯度は9.5°Nである．）．従って $\beta<1$ であることと，B_X，B_Y，B_Z の大きさの比較から，解析している時間帯ではATS－6付近で磁力線の方向が著しくわん曲さ

第1表　ATS－6位置における電子エネルギー密度と磁場エネルギー密度

U T (1975.4.9)	電子密度 n (cm^{-3})	電子エネルギー密度 $\frac{1}{2}nmv^2$ (erg cm^{-3})	磁場エネルギー密度 $B^2/8\pi$ (erg cm^{-3})
0513：06～0513：22	0.61	6.5×10^{-10}	8.3×10^{-8}
0513：26～0513：42	0.53	4.7×10^{-10}	8.3×10^{-8}
0523：26～0523：42	1.8	1.1×10^{-9}	5.4×10^{-8}
0720：06～0720：22	2.3	2.3×10^{-9}	7.3×10^{-8}

注：電子のエネルギー範囲 1 eV～82 keV

This document is provided by JAXA.



第12図 ATS-6位置で観測された磁束密度の大きさ,3成分の時間変化,およびmagnetosphereの各モデルによる値(この時間帯ではlocal timeによる違いは無視できる.).ここで座標系は,衛星座標系で,西方向がX軸の正方向,地理的赤道面と平行で地球の外側に向う方向がY軸の正方向,地球回転軸と平行で北の方向がZ軸の正方向である(第10図の座標系とは異なっていることに注意).

れて乱れているような状態ではない.すなわちプラズマによる反磁性的な効果は磁場を乱す程に強いものでないことがわかる.従って,磁力線をモデルによってたどることは差し支えがなく,次に述べるような解析をすればよい.解析の対象となった約2時間半の範囲で,あ

This document is provided by JAXA.

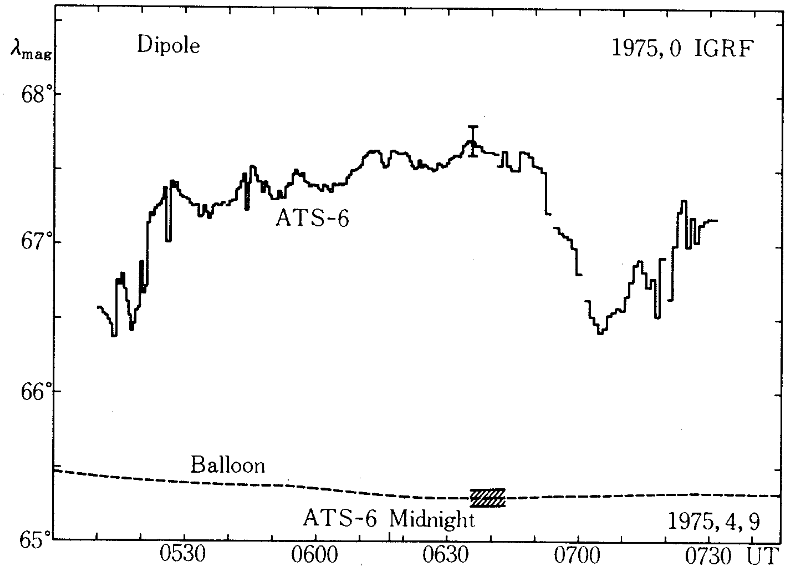
る一つの magnetosphere のモデルを採用する．ATS－6位置での細かい時間変動は，ATS－6位置の磁場の強さの変化を，相対的に磁力線の位置と ATS－6の位置がダイナミックに変化すると考えて，磁力線の根元の λ_{mag} の値は第11図から求め，この λ_{mag} を新しい解析のパラメーターとして用いる．気球については，その位置の λ_{mag} を直接用いることができる．第12図で B の3成分のうち B_Y については観測値とモデルによる値とがずれているが，この点については後で述べる．

5. Magnetosphere の各モデルについての検討と地磁気共役性

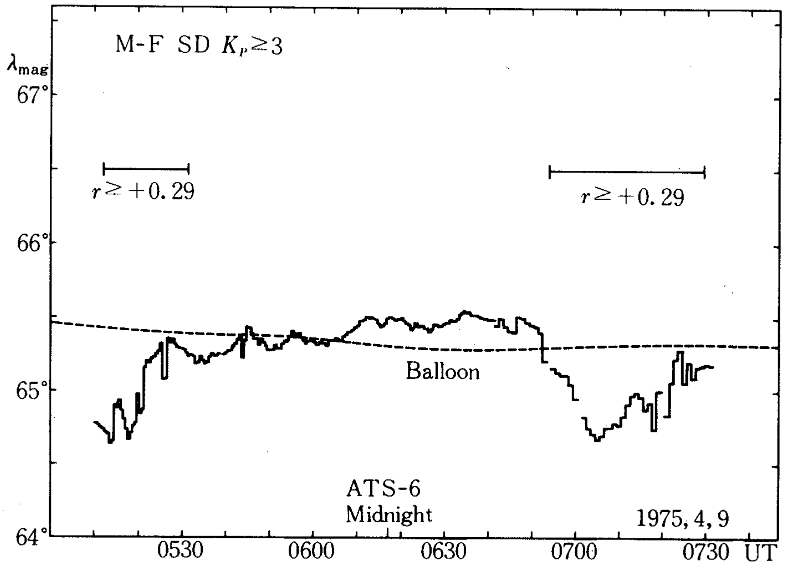
オーロラX線と ATS－6電子の相関性と地磁気共役性の問題を解明するのに L 又は X を用いた場合は，地磁気共役性は一見否定的であった．しかしながら，磁力線の根元の地磁気緯度 λ_{mag} を新しい解析のパラメーターとして用いた場合はどうであろうか．

そこで，magnetosphereの各モデルの場合について λ_{mag} の時間変化をみる．第13図(a)〜第13図(f)にそれぞれのモデルについての λ_{mag} の時間変化と気球の λ_{mag} を示した．気球の λ_{mag} と ATS-6の λ_{mag}（ATS－6位置から磁力線をたどっていった地表上の根元の λ_{mag} の意；以下同様）が同じ値のとき，磁力線がつながっていて，気球と ATS-6が地磁気共役な点にあることになる．第8図に示されたように，0512〜0531 UT 0654〜0729 UT の二つの時間帯でオーロラX線と ATS－6電子の相関がよい．第13図(a)は双極子モデルを用いた場合であり，気球の λ_{mag} と ATS－6の λ_{mag} は大きくずれていてこのモデルではだめであることは明白である．第13図(b)は Olson and Pfitzer のモデルの場合である．このモデルは，双極子磁場の外に magnetosphere 電流による磁場，magnetosphere 内の分布電流による磁場をつけ加えて，人工衛星による磁場の観測値と合うように，付加磁場の各成分が座標のべき関数と指数関数の積の和の形で表わされたものであり，tilt 角が0°の静穏時についてのモデルである．この場合，気球の λ_{mag} と ATS－6の λ_{mag} の値が近い値を示している．しかし，オーロラX線と ATS－6電子の相関の良い時間帯と，両者の λ_{mag} が近い時間帯とが合っていない．このことは，オーロラX線観測時は K_p が大きく地磁気変動が活発な時であったのに対し，Olson and Pfitzer のモデルでは静穏時を対象としているということに起因していると考えられる．第13図(c)〜第13図(f)は，Mead and Fairfield のモデルを用いた場合である．このモデルは tilt 角を考慮してあり，付加磁場の各成分は座標の2次のべき関数と tilt 角の積の和の形で表わされ，人工衛星による磁場の観測値と合う経験式を得ている．このモデルでは，地磁気活動度を表わす指数 K_p により四通りに分類されている．気球の λ_{mag} と ATS-6の λ_{mag} は，第13図(c)の superquiet (SQ)の場合と第13図(d)の quiet (Q)の場合は一致していない．第13図(d)の disturbed (D)の場合，オーロラX線と ATS-6電子の相関の良いところは気球の λ_{mag} と ATS-6 の λ_{mag} の値が近い値になっている．このことは，気球と ATS－6が地磁気共役な地点にあって，オーロラX線と ATS-6電子の間に地磁気共役性が成り立っていることを示すものである．高エネルギー電子が赤道面付近でピッチ角の大きなものも，小さなものも，共に地磁気共役性を満たしている．第13図(f)の superdisturbed (SD)の場合も superquiet (SQ), quiet (Q)の場合に比べれば，λ_{mag} は近い値に

This document is provided by JAXA.

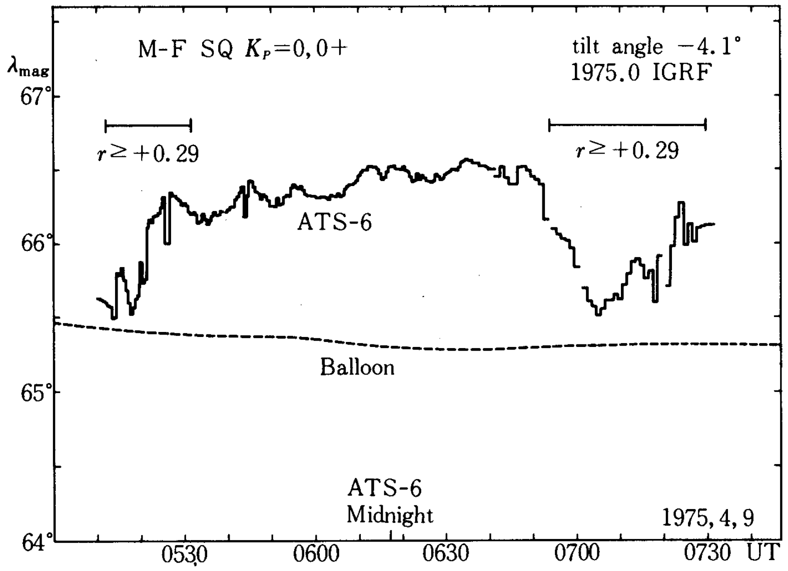


第 13 図(a)　双極子モデルの場合の，ATS－6 位置から磁力線に沿っていった地表の λ_{mag} および気球の λ_{mag} の時間変化.

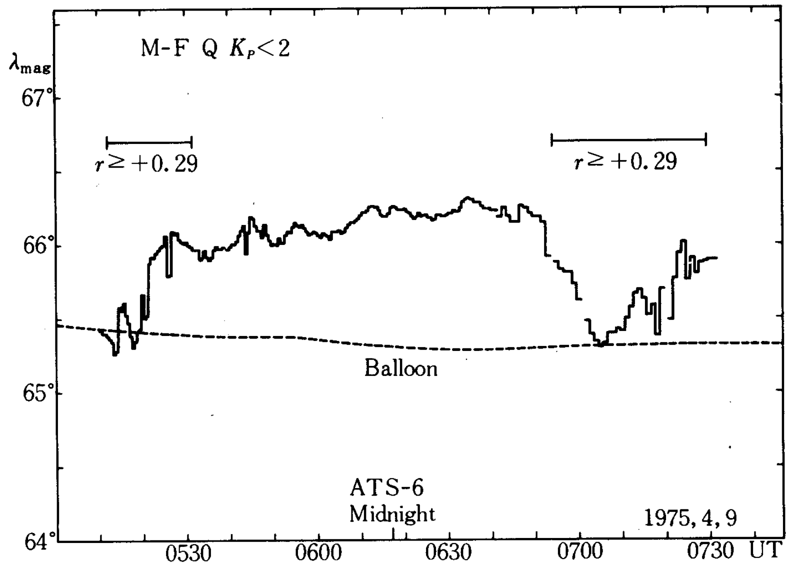


第 13 図(b)　Olson and Pfitzer モデルの場合の，ATS－6 の λ_{mag} および気球の λ_{mag} の時間変化.

This document is provided by JAXA.

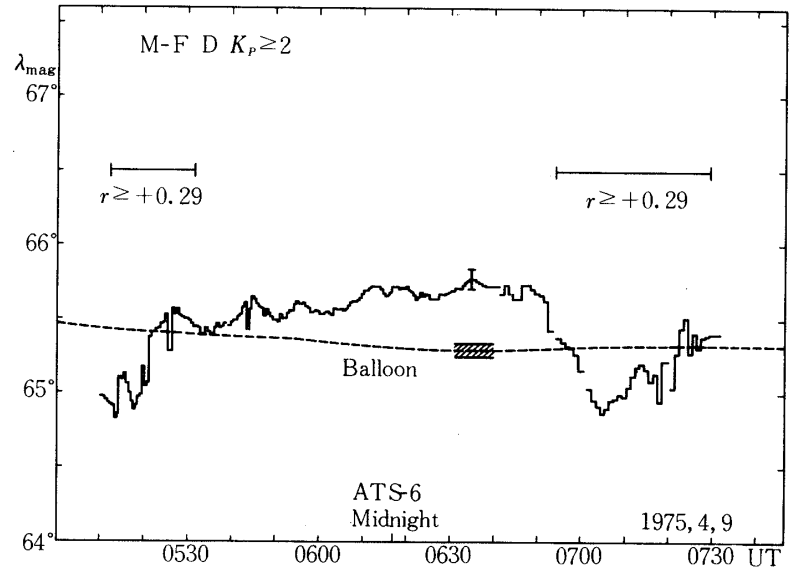


第13図(c)　Mead and Fairfield モデル superquiet (SQ) の場合の，ATS-6 の λ_{mag} および気球の λ_{mag} の時間変化.

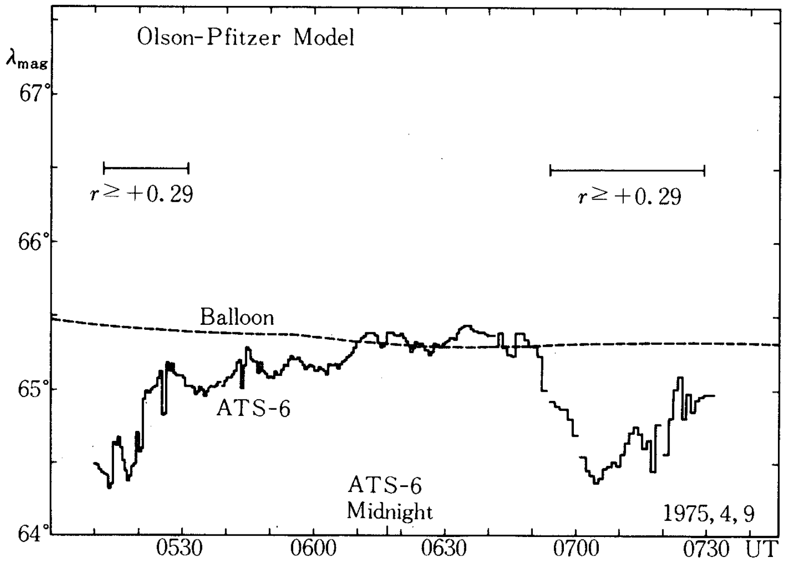


第13図(d)　Mead and Fairfield モデル quiet (Q) の場合の，ATS-6 の λ_{mag} および気球の λ_{mag} の時間変化.

This document is provided by JAXA.



第 13 図(e)　Mead and Fairfield モデル disturbed（D）の場合の，ATS-6の λ_{mag} および気球の λ_{mag} の時間変化．



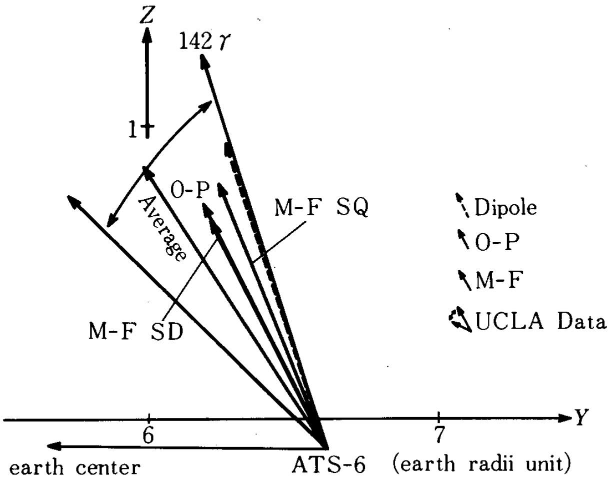
第 13 図(f)　Mead and Fairfield モデル superdisturbed（SD）の場合の，ATS-6 の λ_{mag} および気球の λ_{mag} の時間変化．

This document is provided by JAXA.

なっている．DとSDの差は僅かであるが，SDの方が少しずれているようである．しかしこの差は次のように解釈することによって説明がつく．第12図の磁束密度の3成分の値を見ると，B_Y の観測値の絶対値は各モデルによる B_Y の絶対値より大きな値でずれており，最夜中付近の子午面でのATS-6位置における $\boldsymbol{B}$ ベクトルの図を書くと第14図のようになる．観測値の $\boldsymbol{B}$ ベクトルは，大体において方向が各モデルの場合より赤道面寄りになっている．しかも $\boldsymbol{B}$ の大きさは観測値の方が各モデルの場合より大きい．このことは，最夜中付近での実際の磁場は，K_p の大きい場合，ATS-6位置の $6.62R_E$ あたりで磁力線が赤道面寄りに圧縮され，磁力線の方向が赤道面に平行な方向に寄っていると考えられる．従って，磁場もより強くなると考えられる．このように考えれば，K_p の大きい場合，B からATS-6の λ_{mag} を求める場合，λ_{mag} の値が少し大きくなって，SDの場合でも気球の λ_{mag} とATS-6の λ_{mag} が近い値になるようにすることができる．Olson and Pfitzer のモデルの場合でも，傾向として K_p が大きい場合を推定するとATS-6の λ_{mag} は少し大きな値となり，気球の λ_{mag} とATS-6の λ_{mag} が近い値の時，オーロラX線とATS-6電子の相関が良いようにすることができる．このように最夜中付近のATS-6位置で磁力線の方向が，赤道面に平行な方向に寄ったモデルは Walker et al.〔14〕も示唆している．Olson and Pfitzer のモデルでも Mead and Fairfield のモデルでも，そのままでは最夜中子午面で magnetosphere の tail の磁気中性線の説明は困難である．前述したように，最夜中子午面付近のATS-6位置で，磁力線の方向が赤道面に平行な方向に寄った方が磁気中性線を説明するのに都合がよい．

6. 結　論

赤道面付近にある高エネルギー電子が，極光帯でのオーロラX線の親になっているかどうかを調べるには，赤道面付近の高エネルギー電子と極光帯オーロラX線の間に地磁気共役性



第14図　最夜中付近の子午面でのATS-6位置における $\boldsymbol{B}$ ベクトル．

This document is provided by JAXA.

が成立しているかどうかを調べればよい．しかしながら，この地磁気共役性を厳密に議論する場合に，電子の Larmor 半径が小さいことを考えると，オーロラX線観測点と赤道面付近高エネルギー電子観測点の L，又は観測点とつながる磁力線が地磁気赤道面を横切る点の地球中心からの距離 X を，パラメーターとして調べてゆくのではよくない．また，magnetosphere のいろいろなモデルと関連させてゆくのには L というパラメーターは不適当である．magnetosphere の各モデル毎に丹念に磁力線群を描き，赤道面付近の高エネルギー電子観測点から磁力線に沿って地表に達する点の地磁気緯度 λ_{mag} を求め，これを新しい解析のパラメーターとして採用するのがよい．細かい時間変化では，モデル毎に，ATS-6 位置での磁束密度 B の観測値をもとにして λ_{mag} の値の時間変化に換算して（磁力線群を用いて換算）議論するのがよい．このようにすれば，地磁気共役性が成立するかどうかの議論が明確になる．赤道面付近の高エネルギー電子観測点から磁力線に沿ってたどっていった地表の λ_{mag} とオーロラX線観測点の λ_{mag} が，同じ値か，少くとも近い値になれば，両者はほぼ磁力線でつながっている．さらにこの時，オーロラX線と電子のカウントの相関が良ければ，地磁気共役性が成立していると考えることができる．ここでこのような取り扱いをするのにあらかじめ調べておかなければならない点は，magnetosphere 中のプラズマによる反磁性的な効果が非常に強くなり，磁場が乱れてしまうかどうかということである．このためには，プラズマ粒子の運動エネルギー密度と磁場のエネルギー密度の大小関係を調べればよい．磁場のエネルギー密度が優勢なときは磁場の乱れは余りなく，高エネルギー電子は磁力線に密接に巻きつきながら運動して，極光帯上層大気の方に precipitate してゆくと考えてよい．

Yamagami et al. の Thompson におけるオーロラX線の気球観測，および同時期の ATS-6 による磁場，高エネルギー電子の観測に基づき，以上に述べたような λ_{mag} をパラメーターとする新しい解析法により地磁気共役性を検討した．地磁気共役性の解析は magnetosphere のモデルに依存する．地磁気活動度を考慮し，tilt 角を考慮した Mead and Fairfield のモデルで K_p が大きい場合，極光帯オーロラX線とATS-6位置の高エネルギー電子のカウントの相関がよい時間帯で，気球の λ_{mag} と ATS-6 から磁力線をたどっていった地表の λ_{mag} の値が近い値を示し，地磁気共役性が成り立っている．従って，既に赤道面でエネルギーの高い電子が極光帯上層大気に precipitate してオーロラX線を発生すると考えられる．ここで，各モデルについて磁力線群から求められる地表上の地磁気緯度 λ_{mag} が解析のパラメーターとして重要な役割を果しており，地磁気共役性について調べるのにこのパラメーター λ_{mag} を用いるのがよいと考えられる．precipitation 領域の地磁気緯度は非常に狭く，わずかな λ_{mag} の差が問題となるため，λ_{mag} の違う近い2点での気球観測を行い，地磁気共役な地点のあたりにある静止衛星による観測との関係を調べれば，オーロラ，X線の地磁気共役性の問題はより詳しくわかると考えられる．地磁気擾乱の大きい時，最夜中子午面付近の ATS-6 位置（$6.62R_E$）の磁場の方向が赤道面に平行な方向に寄っていることは，magnetosphere の tail の磁気中性線の説明に都合がよい．

謝 辞

終始御高配をいただいた東京大学宇宙航空研究所西村純教授，理化学研究所小玉正弘博士，

This document is provided by JAXA.

および立教大学奥平清昭助教授に深く感謝致します特に，小玉正弘博士，奥平清昭助教授には細部にわたる数多くの御教示をいただいたことを感謝します．ATS－6の詳細な観測データの入手について G. K. Parks 教授に非常な便宜を計っていただいたことを深謝致します．ATS－6の観測データの使用に対して，ミネソタ大学 J. R. Winckler 教授ほか，カリフォルニア大学サン・ディエゴ校 Mcilwain 教授ほか，同大学ロス・アンジェルス校 P. J. Coleman Jr. 教授ほかに感謝します．立教大学計算センターおよび東京大学大型計算計センターを利用させていただいたことに対し，それらのスタッフの方々に謝意を表します．

1978年11月2日

参考文献

[*1*] H. Kamiyama: Rep. Ionos. Space Res., **20**, 374–394 (1966).

[*2*] M. Kodama and T. Oguti: Mem. Natl. Inst. Polar Res. Series A, **14**, 1–58 (1976).

[*3*] J.R. Barcus, R.R. Brown, R.H. Karas, K. Brønstad, H. Trefall, M. Kodama, and T.J. Rosenberg; J. Atmos. Terr. Phys., **35**, 497–511 (1973).

[*4*] R.H. Eather, S.B. Mende, and R.J.R. Judge: J. Geophys. Res., **81**, 2805–2824 (1976).

[*5*] G.K. Parks, C.S. Lin, B. Mank, S. DeForest, and C.E. McIlwain; J. Geophys. Res., **82**, 5208–5214 (1977).

[*6*] G.K. Parks, G. Laval, and R. Pellat; Plant. Space Sci., **20**, 1931–1408 (1972).

[*7*] W.P. Olson and K.A. Pfitzer: J. Geophys, Res., **79**, 3739–3748 (1974).

[*8*] G.D. Mead and D.H. Fairfield: J. Geophys. Res., **80**, 523–534 (1975).

[*9*] T. Yamagami, M. Fujii, J. Nishimura, H. Murakami, Y. Hirasima, M. Kajiwara, K. Okudaira, and M. Kodama: J. Geomag. Geoelectr., **30** (1978), to be published.
山上隆正，藤井正美，西村純，村上浩之，平島洋，奥平清昭，梶原正男，小玉正弘：東京大学宇宙航空研究所報告，**13**-3（B），901—919 (1977).

[*10*] R.J. Walker, K.N. Erickson, R.L. Swanson, and J.R. Winckler: IEEE Trans. **AES-11**, 1131–1137 (1975).

[*11*] B.H. Mauk, and C.E. McIlwain: IEEE Trans., **AES-11**, 1125–1130 (1975).

[*12*] R.L. McPherron, P.J. Coleman Jr., and R.C. Snare: IEEE Trans., **AES-11**, 1110–1117 (1975).

[*13*] A. Nishida: J. Geophys. Res., **71**, 5669–5679 (1966).

[*14*] R.J. Walker, K.N. Evickson, R.L. Swanson, and J.R. Winckler: J. Geophys. Res., **81**, 5541–5550 (1976).

This document is provided by JAXA.