

IMS 期間中に得られた昭和基地周辺の
地磁気多点観測データ解析結果
—オーロラジェット電流位置とオーロラ発光域との比較
および南北地磁気共役性の変動—

鮎川 勝¹・巻田 和男²

Analysis of Geomagnetic Data Obtained at Multi Observatories
near Syowa Station during the IMS (1976–1978)
— Correlation of the Location of Auroral Electrojet Current
with the Aurora and the Behavior of Geomagnetic Conjugacy —

Masaru AYUKAWA¹ and Kazuo MAKITA²

Abstract: This report describes the movement of small scale auroral electrojet current regions and their relationships to spatial and temporal variation of visual auroras based on magnetic data at three ground stations [Syowa (69°00'S, 39°36'E, 30 m a.s.l.), Unmanned (69°47'S, 41°35'E, 1470 m a.s.l.) and Mizuho (70°42'S, 44°20'E, 2230 m a.s.l.)]. Japanese Antarctic Research Expedition (JARE) party carried out this observation as a contribution to the International Magnetospheric Study (IMS) from 1976 to 1978. It was shown that ionospheric currents with no change in Z-component magnetic field variations corresponded to auroral luminous regions. This result suggests that the line current approximation is applicable to small scale auroral electrojet currents. Secondly, a conjugacy of polar substorm phenomena is examined with comparing magnetogram data obtained from three ground stations in Antarctica and with those from Leirvogur station (64°08'N, 21°47'W), Iceland in the northern hemisphere. During quiet periods, the conjugacy could not be identified due to poor correlation of magnetic field variations between Leirvogur and the three stations in Antarctica. On the other hand, during disturbed periods, the conjugate point of Leirvogur was located near the Unmanned station. Thirdly, the diurnal variation of magnetic conjugate point is examined with magnetogram data of antarctic three ground stations and two stations (Husafell and Leirvogur) of iceland. The conjugate point shifted toward the higher-latitude side from the evening (18 h MLT) to the mid-night (00 h MLT), while it shifted toward the lower-latitude side from the mid-night to the morning (08 h MLT) hours. This result was consistent with the diurnal variation of the conjugate point calculated from the Tsyganenko-Uzmanov model.

¹ 国立極地研究所. National Institute of Polar Research, 9-10, Kaga 1-chome, Itabashi-ku, Tokyo 173-8515.

² 拓殖大学工学部. Faculty of Engineering, Takushoku University, 815-1, Tate-Machi, Hachioji-shi, Tokyo 193-0944.

要旨: 国際地球磁気圏観測計画 (IMS, 1976-1978) 期間中に、昭和基地周辺でオーロラ活動に伴う超高層物理現象の地上多点観測を実施した。この地上多点観測で得られた地磁気の変動記録に基づきオーロラジェット電流 (auroral electrojet current) 位置とオーロラ発光領域の対応関係、地磁気 H 成分が湾型負変動 (negative bay variation) している時の南北共役性及び地磁気共役点の日変化特性などを解析した。その結果、電離層中に水平電流を仮定した時、① 地磁気 Z 成分変動から求めた $\Delta Z=0$ の地点がオーロラの活動的な発光領域のほぼ真下に位置し、オーロラジェット電流は極域電離層の比較的狭い領域を集中的に流れている。② 地磁気 H 成分の湾型負変動時の南北共役性に関しては、北半球側のレイルボグル (Leirvogur, Iceland) と最も良い相互相関を示す地点は、みずほ基地よりも低緯度側の無人観測点や昭和基地であった。③ 南北共役性の日変化は、北半球側の共役点 (南半球の共役点を固定した場合) は夕方側から真夜中側 (18 h-00 h MLT) にかけて高緯度側に、真夜中側から朝方側 (00 h-08 h MLT) にかけて低緯度側にシフトする地方時依存特性を示し、この特性は Tsyganenko-Uzmanov のモデルによる共役点の日変化パターンの傾向と一致する。

1. はじめに

近年の人工衛星観測やリモートセンシング技術などの急速な進展は、オーロラ現象に関する観測データを急速に倍加、集積しつつある。しかし、一方で、高度なりリモートセンシング技術が提供する情報をより確実に理解するためには、地上観測との比較が大変重要である。とりわけ、オーロラあるいはこれに伴う諸現象の詳しい時間的空間的变化の知見を得るためには、地上における多点観測の実行が最も効果的な観測方法の一つであろう。

日本南極地域観測隊が昭和基地 (69°00'S, 39°36'E, 標高 30 m) を中心に展開した超高層物理関係の多点観測は、第 10 次隊 (南極地域観測統合推進本部, 1968-1970) が実施したオーロラ出現に伴う超低周波音波観測が最初である。この超低周波音波観測は、第 12 次隊および第 13 次隊 (南極地域観測統合推進本部, 1971-1973) においても継続され、オングル諸島周辺域の数地点からテレメトリーを用いて昭和基地へデータを送信した。この観測は、東オングル島内を中心にして約 30 km 以内に位置する島々の範囲に限定された地上多点観測であった。第 11 次隊の福西 (1973) は、大陸氷床と昭和基地との同時観測の先駆けとして、観測点の面的な広がりを一挙に 10 倍 (~300 km) にまで拡大する地上多点観測を実行した。第 14 次隊の桑島 (1976) は、雪氷圏研究グループの内陸調査旅行隊と行動を共にし、昭和基地と南極大陸内部との地磁気二点同時観測を行い、オーロラの爆発的な活動現象の領域が、およそ 300 km の範囲で観測される地上の地磁気変動で十分識別できることを指摘した。また、磁気圏境界面近傍においてケルビン・ヘルムホルツ不安定性で生起するといわれる波動に関して、水平成分の偏波方向の反転や伝搬特性などの観測事実を理論と対比し、解釈を与えている (KUWASHIMA, 1976, 1978)。

南極の超高層多点観測の本格化は、今から約 20 年前の国際磁気圏観測計画 (IMS: International Magnetospheric Study, 1976-1978) の一環として企画立案されたことにある。地上多

点観測計画は、地上に細かな観測網を展開することによって、極域嵐の代表的な現象であるオーロラとこれに伴う諸現象の時間的空間的な発達過程を詳細に捉えることが大きな目的の一つであった。IMS計画による、南極の無人観測拠点を含み多点観測網の敷設計画は、アメリカ、ソ連(当時)、日本、イギリス、オーストラリアなどの国々が競合して実施することとなった。

昭和基地付近における地上多点観測は、図1で示す昭和基地とみずほ基地の二つの有人観測基地と、みずほ基地を中心とした南極大陸氷床上に四つの無人観測施設(A1~A4)を設置することで計画された(NAGATA *et al.*, 1976; 鮎川ら, 1976)。東南極みずほ高原付近の自然環境条件は、上田(1971)、山田(1974)、佐々木(1974)などの報告から、年平均気温が -30°C 程度、年平均風速がおおよそ 10 m/s と推察され、1年間を通しての最低気温と最大風速は、各々 -60°C および 40 m/s と想定された。また、西尾・楠(1975)によれば、この近辺の雪の堆積は、年平均 $10\text{--}50\text{ cm}$ と見積もられていた。超高層無人観測施設は、これらの厳しい自然環境に耐えうることはもちろんのこと、気象要素観測などの限られたデータ収録量に比べ、短いサンプリング時間での多量のデータ収録が要求された。計画立案時には衛星利用によるデータ伝送がまだ必ずしも一般化されていなかったことから、この無人多点観測には年間の無人運用に耐える収録システムや電力供給システムの構築に新しい発想による開発が要求された。

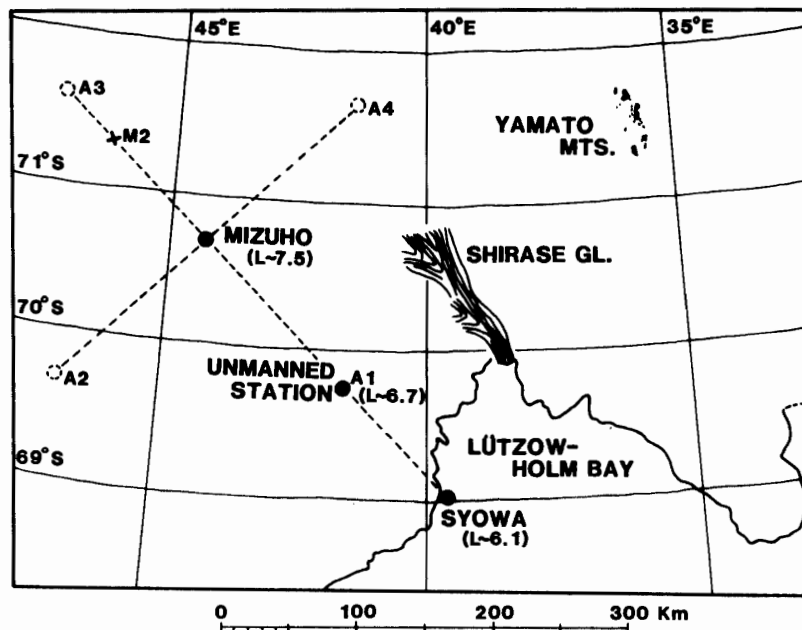


図1 昭和基地周辺の地上多点観測網

Fig. 1. Location of the ground-based network observations around Syowa Station in Antarctica.

本計画では、南極大陸氷床上の無人観測施設の長期的電力供給源として、風エネルギー利用の風力発電機の実用化を初めて試みた (鮎川ら, 1979). 当時の目標とした無人観測施設は、オーロラに伴う地磁気・ULF・VLF・CNA など多種類データを無人で1年間にわたり連続収録することを可能とするシステムであった。この無人観測システムは、電力システムに採用した浮動充電方式のトラブルほか幾つかの機能停止事故などを経験した。トラブル対策について各隊次とも試行錯誤を繰り返した末、IMS 計画期間の最終年度を担った第 19 次隊 (国立極地研究所, 1977-1979) でシステムの機能確保への対応策に目処がつけられた。しかし、電力供給の要である風力発電機システムは、当時の技術力や許容される準備・オペレーション期間などの制限下で、過酷な自然環境へ十分且つ柔軟に対応する信頼性の高い設備として、必ずしも完成したわけではなかった。IMS 期間中の日本隊の無人観測システムでは、電力供給の制限から一部の観測項目の断念を余儀なくされた。

IGA (International Association of Geomagnetism and Aeronomy, 国際地球電磁気学・超高層物理学協会) の南極研究委員会がまとめた IMS データ収録集によれば、世界各国が競って実行した無人観測は、ソ連 (当時) の地磁気観測を除けば、それぞれが計画した観測項目について、所期通りのデータ収集を必ずしも十分に果たしえたとはいえない。この結果は、南極の厳しい自然環境 (風速, 気温, 地吹雪, 日射, 静電気 他) に耐え、かつ、サンプリング比率の高い超高層現象データを無人によって取得できる観測システムが容易には確立しえないことを示している。

IMS 計画以後、日本隊では第 29 次隊 (1987-1989) が地磁気現象の多点観測に的を絞り、新たな電力供給源として灯油を燃焼させた熱を利用する発電、すなわち熱発電システム (SAKA *et al.*, 1990) を採用しての無人観測施設の開発を試みた。SAKA 等による無人観測施設の開発は、マラジョージナヤ基地 (67°40'S, 45°51'E, 標高 36 m), 昭和基地周辺およびあすか観測拠点 (71°32'S, 24°08'E, 標高 930 m) 周辺での無人観測点を含む経度方向の多点観測網の確立と、国立極地研究所がアイスランド地域で展開している北半球の観測網との連携による多点共役観測の実現をも指向していた。熱発電機システムによる無人観測は、第 31 次隊、第 33 次隊および第 34 次隊 (1992-1994) へと引き継がれて南極大陸氷床上で運用されたが、外部気象条件の変動に伴う燃料補給システムや排気システムなどの機能低下、またはシステムの不調等の報告が見られる。第 34 次隊以後の南極域における超高層関係の地上多点観測は休止している。

本論文では、筆者の一人 (鮎川) が参加した IMS 期間中の南極観測隊によって取得された、無人観測データを含む 1977 年の地磁気多点観測記録に基づいて、オーロラ活動と地上の地磁気変動との関係を吟味する。また、昭和基地付近の地磁気共役点に当たるアイスランド地域との共役性について、アナログデータの変動波形の相関的な類似性を追跡した結果について述べる。本報告は、福西・桑島等が意図していた観測の延長線上にあるものと思われるが、両

者との決定的な違いは、無人観測点のデータを使用していることである。また、現在の日本の観測隊の輸送能力や構成人員の規模の制約、あるいは、環境保護に関する法律の制定など新たな制約も加わった下での南極域の観測活動が、益々有人基地の増設を困難とする情勢にも関連し、無人観測を将来の超高層観測体制の一つの選択肢としてめざましい技術革新の裏付けの下に再考する時期であると考えられる。ちなみに、既に米国では南極点のアムンゼン・スコット基地を中心に広大な南極大陸の内部領域において AGO 計画 (Automatic Geophysical Observatory) として地磁気観測を展開している。極域科学が大気圏、陸水・生物圏および固体圏などとして総合的に進展する中で、古くて新しいオーロラに伴う諸現象の研究課題をフィールドサイエンスとしても発展的に推進させる一つの方向性として、地味な地上多点観測の重要性を再認識しておくことは大切なことであろう。

2. オーロラ活動と地磁気変動

オーロラが突然強く輝き、その輝きの領域が急激に拡大する現象は、auroral breakup (AKASOFU, 1968) として知られている。この時、明るいオーロラの直下では ~ 2000 nT にもおよぶ大きな磁場変動が観測されることが少なくない。これは、主としてオーロラが輝いている高さ 100–120 km 付近の電離層中に流れる強い電流によるもので、この電流はオーロラジェット電流 (auroral electrojet) と呼称される。オーロラジェット電流を、地上の地磁気変動記録のみから研究した報告は数多く知られている (例えば、NAGATA and KOKUBUN, 1962; IJIMA and NAGATA, 1972; KISABETH and ROSTOKER, 1974)。しかし、オーロラの発光領域と地磁気変動から予想されるオーロラジェット電流の位置との詳細な対応づけに関しては、AYUKAWA and MAKITA (1984), AYUKAWA *et al.* (1986) などの報告もあるが未だ必ずしも十分であるとは言えない。地上で観測される地磁気の変動は、電離層の電場、電気伝導度や磁気圏と電離層の間を流れる沿磁力線電流などに関連し、オーロラ中の電流のみを単純に反映しているものではない。しかし、密な多点観測から、オーロラおよび電離層電流の空間分布と地上の地磁気変動との関連を明らかにできれば、オーロラジェット電流に関する知見を深めるための有効な情報になるであろう。ここでは、電離層中を水平に流れる電流の効果により、地上の地磁気変動の大部分が説明しうるとの仮定のもとに、オーロラの発光領域とオーロラジェット電流位置との対応がどの程度良いのかを調べる。

2.1. 観測場所と解析手法

ここで取り扱うデータは、図 1 で示した昭和基地、南極大陸氷床上のみずほ基地およびそのほぼ中間点に位置する無人観測拠点 (A1) の 3カ所で第 18 次隊 (1976–1978) が観測した、地磁気三成分の記録と昭和基地におけるオーロラの観測記録である。3観測点の位置関係は、表 1 に示した。3観測点とも、ほぼ同じ地磁気子午線に位置し、オーロラ現象の発達過程や

表 1 南極の 3 観測点の地理座標と地磁気座標
 Table 1. Location coordinates of the three antarctic stations.

Stations	Geographic coordinates		Geomagnetic coordinates		Remarks (above sea level)
	Latitude	Longitude	Latitude	Longitude	
Syowa Station	69°00'S	39°36'E	-66.40°	70.17°	30 m
AI Unmanned Station	69°47'S	41°35'E	-67.21°	70.21°	1470 m
Mizuho Station	70°42'S	44°20'E	-68.26°	70.34°	2230 m

爆発的な変動過程の時間的空間的な観察をするのに適している。なお、3 観測点の地磁気的な地方時 (Magnetic Local Time: MLT) は地理的な世界時 (Universal Time: UT) にほぼ等しい。

図 2 は、3 点で観測された地磁気三成分の変動記録の一例で、上段が H 成分、中段が D 成分、下段が Z 成分の変動である。地磁気 H 成分は、負の湾型変動 (negative bay) をしている。図 2 で示される H 成分は、南北方向の磁場の変動量を表し北向きへの変化が正で記録されている。同様に、 D 成分は東西方向の変動量を表し東向きへの変化が正であり、 Z 成分は鉛直方向の変動量を表し、上向きへの変化が正方向の変動量として記録されている。各成分の変動の大きさは、図中に示される矢印のついた指標の長さが 100 nT で表されている。3 カ所の地磁気変動の全体的な変動状態の様相は、三成分ともほぼ同様であり、1977 年 7 月 20 日から 21 日にかけて、昭和基地周辺の地磁気子午線方向少なくとも 300 km の範囲を覆う超高層擾乱現象が発生していたことを示唆している。しかし、3 カ所の観測記録の変動には僅かながら時間差が認められ、鋭利な鋸歯のように見えるパルス的な変動は 3 地点で必ずしも同時に観測されていない。例えば、 H 成分の 2130 頃-2200 UT 頃 (以下 UT を省略する) の変動は、AI 無人観測点と昭和基地で比較的似ているがみずほ基地では鋭い負のパルス的な変動が見られる (図中の矢印 ①)。また、2300 頃に 3 観測点に見られる負のパルス的な変動 (矢印 ②) は、高緯度側のみずほ基地で最も早く始まり、AI 無人観測点、昭和基地へと低緯度側の観測点ほど開始時刻が遅いように見える。さらに、2325 頃にみずほ基地で見られるパルス的な変動 (矢印 ③) は、AI 無人観測点に小さな負の変動が見られるものの昭和基地には見られない。この鋭い負の地磁気変動が観測された 3 地点の時刻の違いは、特に H 成分変動記録に顕著に認められ、 D 成分ではあまり目立たない。また、 Z 成分では 3 カ所で同じような変動が同時的に見られる時 (2310 頃: 矢印 ④) もあれば、2130 頃 (矢印 ⑤) の昭和基地のみに見られるような変動もある。

このような 3 地点での地磁気変動の時間的なズレが何に起因しているのかを、現象論としてより細かく把握しておくことは、電流系の空間的な動きを知るうえで大切なことである。オーロラに伴う電流による地上の磁場変動は、電離層中を東西方向に流れる電流を仮定する時、南北方向の変動を表す H 成分が一番大きく変動することが一般に良く知られ、この変動

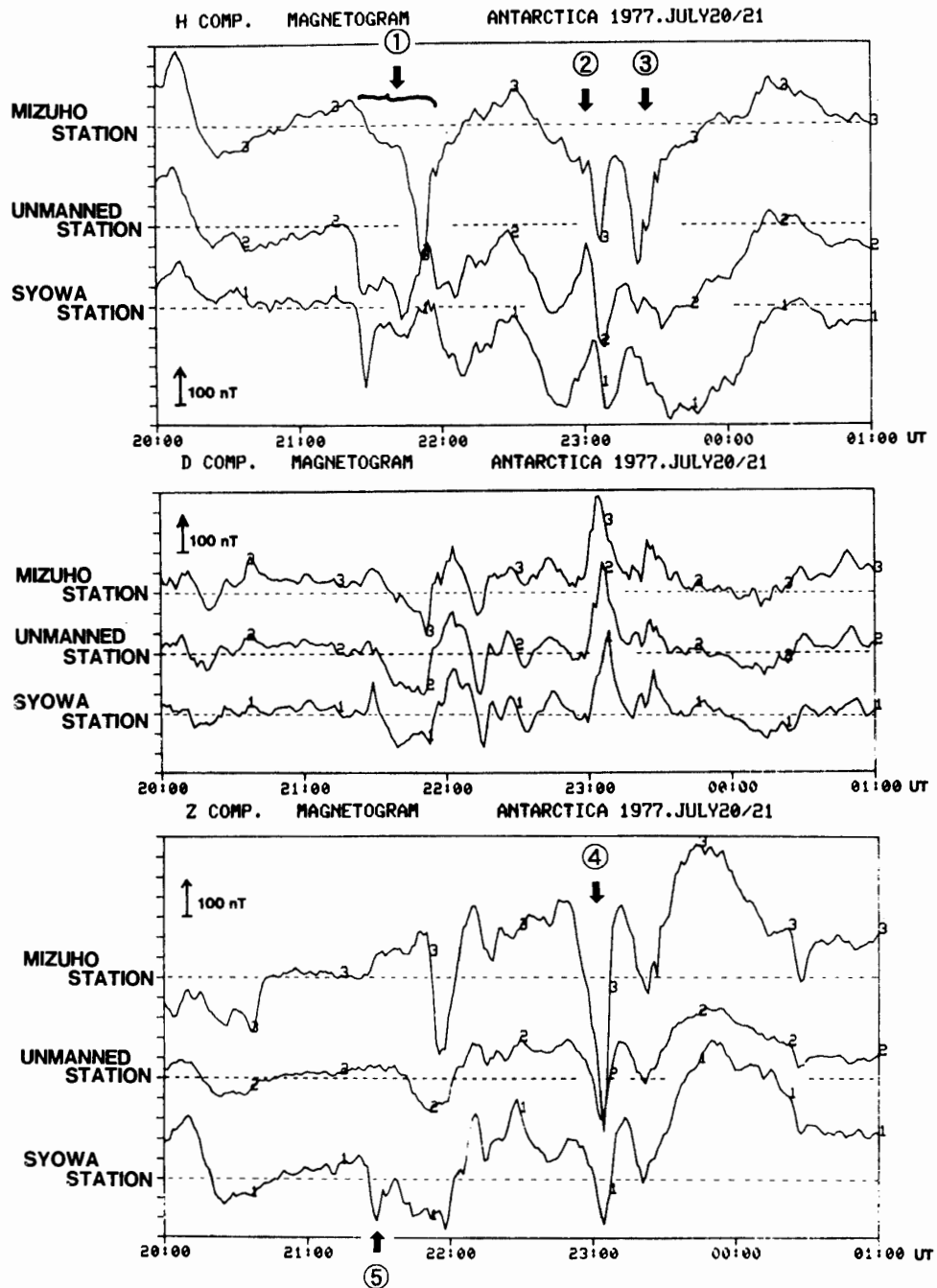


図2 みずほ基地，無人観測点 (A1) および昭和基地における地磁気三成分の同時観測例。各基地は約 150 km の間隔で配置している。(横軸の破線は地磁気の静穏日のレベルを示す。)

Fig. 2. Temporal variations of the H-, D- and Z-component magnetic field observed simultaneously at Mizuho, A1 unmanned and Syowa Stations during the period 2000-0100 UT on July 20-21, 1977. Three stations are located along a magnetic meridian with the mutual distance of about 150 km. (The horizontal dotted lines indicate quiet day levels of the magnetic field.)

は電流の強さ、方向および流れている領域を知る手がかりを与える。東西方向の磁場変動を表す D 成分の変動は、 H 成分の変動に比べて一般にやや小さく複雑である。 Z 成分は鉛直方向に変動する成分を表し、もしも、観測点の真上の電離層中に線電流が流れていればその点の Z 成分の変動はゼロを示し、観測点より低緯度側に西向きの線電流が存在すれば Z 成分は正に変動し、逆に高緯度側を流れていれば負に変動する。それゆえ、 Z 成分の符号の変化する場所を調べれば電離層中を流れる電流系の中心の位置を推定することができるはずである。これらの関係を、図3の模式図に示した。今、図3の(A)に示したように電離層中を西向きに流れる電流 (Auroral electrojet) を仮定した時、地上の点Pで観測される地磁気の変動は、この電流によって作られる磁場 B_{AE} が地上で南向きの変動量として検出されるので、北向きを正として観測している地上の H 成分は減少することになる。また、この電流による磁場の鉛直方向の変動は Z 成分の変動として検出され、観測点Pと電流の流れている領域との位置関係によって Z 成分に現れる変動方向が変わる。すなわち、図3の(B)に示すように西向きの電離層電流系が点Pよりも低緯度側にあれば Z 成分には上向きの変化が、逆に高緯度側にあれば下向きの変動が点Pで観測されることになる。

図4は、地上で見る磁場変動のうちオーロラジェット電流の影響をより強く反映していると考えられる H および Z 成分を図2から取り出し、昭和基地で観測したオーロラ光学観測データとを並記したものである。図4のオーロラ写真データは、横軸が時間経過で、縦軸に

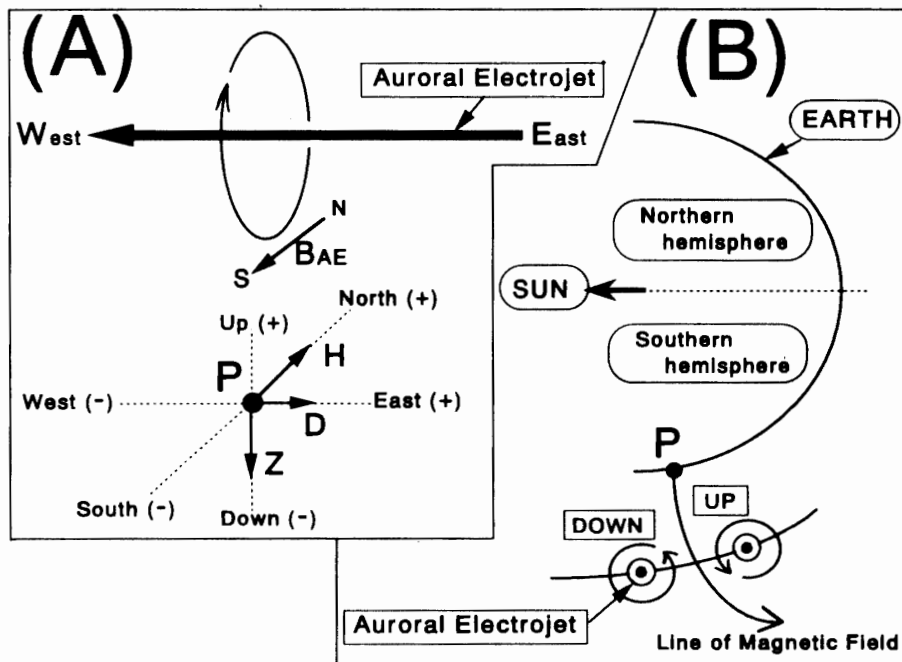


図3 地上の地磁気変動とオーロラジェット電流の関係を示す模式図

Fig. 3. Schematic diagram for the relationship between ground based magnetic variations and auroral electrojet.

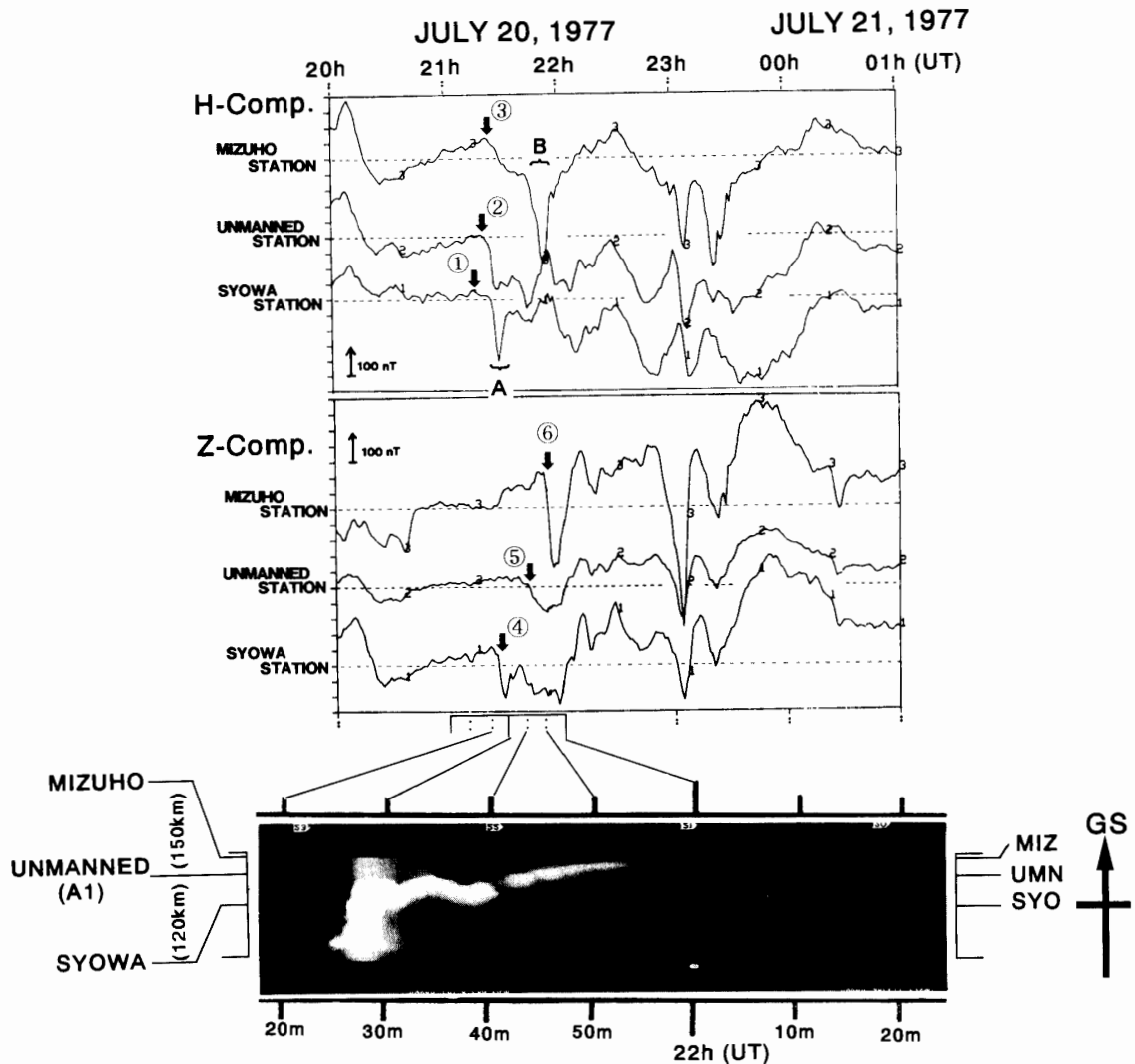


図4 みずほ基地，無人観測点 (A1) および昭和基地で観測された地磁気 H および Z 成分変動と昭和基地で観測されたオーロラ活動との関係

Fig. 4. Relation between auroral activity and H - and Z -component magnetic variations observed at Mizuho, A1 unmanned and Syowa Stations during period 2120-2220 UT on July 20, 1977. Auroral optical data observed at Syowa Station is shown in the bottom panel.

昭和基地から見た地磁気子午線方向のオーロラ発光領域が示されており，オーロラの南北方向の時間的空間的な動きの概要を知ることができる．地磁気子午線写真観測装置と呼ばれるこの装置は，光学系がキャノン 50 mm, $f: 1.8$ のレンズにケンコー魚眼コンバージョンを組み合わせたもので，焦点面に地磁気子午線方向に幅 4.5 mm のスリットを置き，このスリットの下をスリットに直角方向にフィルムが毎時 120 mm の速さで動いていくように工夫されている．

図4の H 成分の変動に見られる3観測点での負の変動 (Negative bay) の開始時刻は，図中の矢印で指示したように，昭和基地では①の2115頃，A1無人観測点では②の2120頃，

そして、みずほ基地では③の2123頃に、 H 成分の負の変動の発生が昭和基地から順に高緯度側の観測点へと移行しているように見える。このことは、西向きの電離層電流の強く流れている領域あるいはその中心が低緯度側から高緯度側へ移動していると考えられる。また、鋭い負の変動は、図4に印したAマーク付近の2120頃に昭和基地とA1無人観測点でほぼ同時に観測されており、変動のピークは2125頃に見られる。みずほ基地では、Bマーク付近の2140過ぎ頃に急激な負の変動の開始があり、ピークは2152頃に観測されている。これに対して、図4の下部に示されるオーロラの発光領域は2120頃に昭和基地の遥か低緯度側に微かに認められる程度の輝きで存在し、2124-2125頃に急激な輝度上昇とともに高緯度側への移動を開始している (auroral breakup 現象と呼ばれる)。このオーロラ発光領域は、2140頃にはA1無人観測点の頭上を通過し、2150過ぎ頃にはみずほ基地を通過してさらに高緯度側へと移動している。この時、オーロラの発光領域が頭上を通過したと思われる時刻の各観測点の Z 成分の変動を見ると正から負へ符号を変えていることが確認できる。すなわち、最も低緯度に位置する昭和基地では図4の矢印で示す④の2125頃に、A1無人観測点では⑤の矢印位置で2140過ぎ頃に、また、みずほ基地では⑥の矢印に示す2150過ぎ頃に Z 成分変動が正から負へと符号を変えており、これらの変動がオーロラの発光領域の移動と良く一致している。従って、この観測事実は、オーロラ発光領域の中を西向きに強い水平電流が流れているとの仮定を支持している (H 成分が正変動の時は東向き電流)。

ここでは3観測点の H 成分に鋭い負の変動が認められるイベントについて、イベントごとの Z 成分のゼロ位置の時間変化とオーロラの発光領域との比較を行う。解析に使用したオーロラのデータは、酸素原子の励起に伴う波長557.7 nmのオーロラ光の時間的空間的な輝度変化を視野角 5° の範囲で30秒ごとに南北方向に掃天するフォトメーターにより昭和基地で観測したものである。解析手法としては、まず、地磁気データを計算機処理し時間空間座標の中での3観測点の Z 成分の変動記録から $\Delta Z=0$ の点の軌跡を求めた。座標系は、縦軸を空間軸、横軸を時間軸にとり、計算機処理に必要な両軸の全体の長さ指定とこれを等分割する数を指定しての格子座標を考える。この座標系の縦軸に、一つの観測点を原点にとれば、他の2観測点の空間的な位置は、縦軸の大きさで決まる。時間軸の格子数は、取り扱うデータの開始時刻および終了時刻の指定とその時刻間の等分割数の指定で決まる。3つの与えられるデータから、ある点 (ここでは $\Delta Z=0$ のポイント) を決める方程式は、2次曲線 $y=ax^2+bx+c$ である。

したがって、3観測点で観測されるデータには、時間空間座標の中で次の3連立2次方程式の関係が成り立つことが必要である。

$$y_0 = ax_0^2 + bx_0 + c, \quad (1) \quad (\text{昭和基地})$$

$$y_1 = ax_1^2 + bx_1 + c, \quad (2) \quad (\text{A1 無人観測点})$$

$$y_2 = ax_2^2 + bx_2 + c, \quad (3) \quad (\text{みずほ基地})$$

ここに、 y_0, y_1, y_2 は各点の観測値で、 x_0, x_1, x_2 は格子座標系の中の各点の位置を表している。いま、 x_0 を仮に原点にとれば、式 (1) は $y_0 = c$ で表され、式 (2) および式 (3) は、

$$y_1 = ax_1^2 + bx_1 + y_0, \quad (4)$$

$$y_2 = ax_2^2 + bx_2 + y_0, \quad (5)$$

で表される。式 (4) および式 (5) の係数 a, b は、

$$\begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_2^2 & x_2 \\ x_1^2 & x_1 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} y_2 - y_0 \\ y_1 - y_0 \end{pmatrix},$$

で求められる。この係数 a, b を用いて、2 次方程式 $y = ax^2 + bx + y_0$ がゼロになる未知数 x を求める。ここで $y=0$ は、3 観測点の位置と Z 成分変動値との関係から求めた $\Delta Z=0$ の点を意味している。したがって、求めた未知数 x は座標系の中の $\Delta Z=0$ の点の位置である。この計算を指定した時間間隔で繰り返し計算機処理し $\Delta Z=0$ の点の軌跡を求めた。 $\Delta Z=0$ の点の軌跡は、オーロラ輝度の濃淡図の中にプロットし、オーロラ発光位置との関連性を吟味することにした。なお、全天カメラによる写真データも各イベントごとにオーロラの形態と動態の全体的な様相を知るための参考として用いた。解析に使用したデータは、1977 年 5 月末～8 月中旬にかけての冬期に A1 無人観測点の地磁気連続観測と昭和基地におけるオーロラ光学観測が同時に実施されている 43 日間から、図 4 で示したような比較的活発なオーロラ活動が見られる時間帯 (00 h UT 付近) の 15 イベントを選んだ。2.2 節では解析したイベントの内の 2 例について説明する。

2.2. 地磁気変動とオーロラ発光領域の比較

2.2.1. イベントー1 (June 9-10, 1977)

図 5 は、1977 年 6 月 9 日から 10 日へかけて昭和基地、A1 無人観測点およびみずほ基地で観測された地磁気三成分の記録である。図中の各パネル内の数字は、1 が昭和基地、2 が A1 無人観測点、3 がみずほ基地のデータであることを示している。 H 成分の全体的な変動の様相は、3 点で同じ傾向を示し 2200-0200 までの間に、各観測点とも最大約 -500 nT の負の変動が見られる。ただし、パルスの鋭い変化の発生は 3 点で必ずしも同時ではない。例えば、2300 頃のみずほ基地に見られるパルスの変動は、A1 無人観測点や昭和基地では見られない。また、0000 頃のパルスの負の変動は開始時刻に僅かな差が見られる。 D 成分については、3 点で変動の振幅に違いはあるが、その変動の様相はほぼ同じである。特に、2300 頃には各点で最初 -85 nT ～ -180 nT ほどの負の変動があった後、各観測点ともほぼ同時に正の変動に変わり、振幅が 260-340 nT となる大きな変化を示している。 Z 成分の変動は、昭和基地お

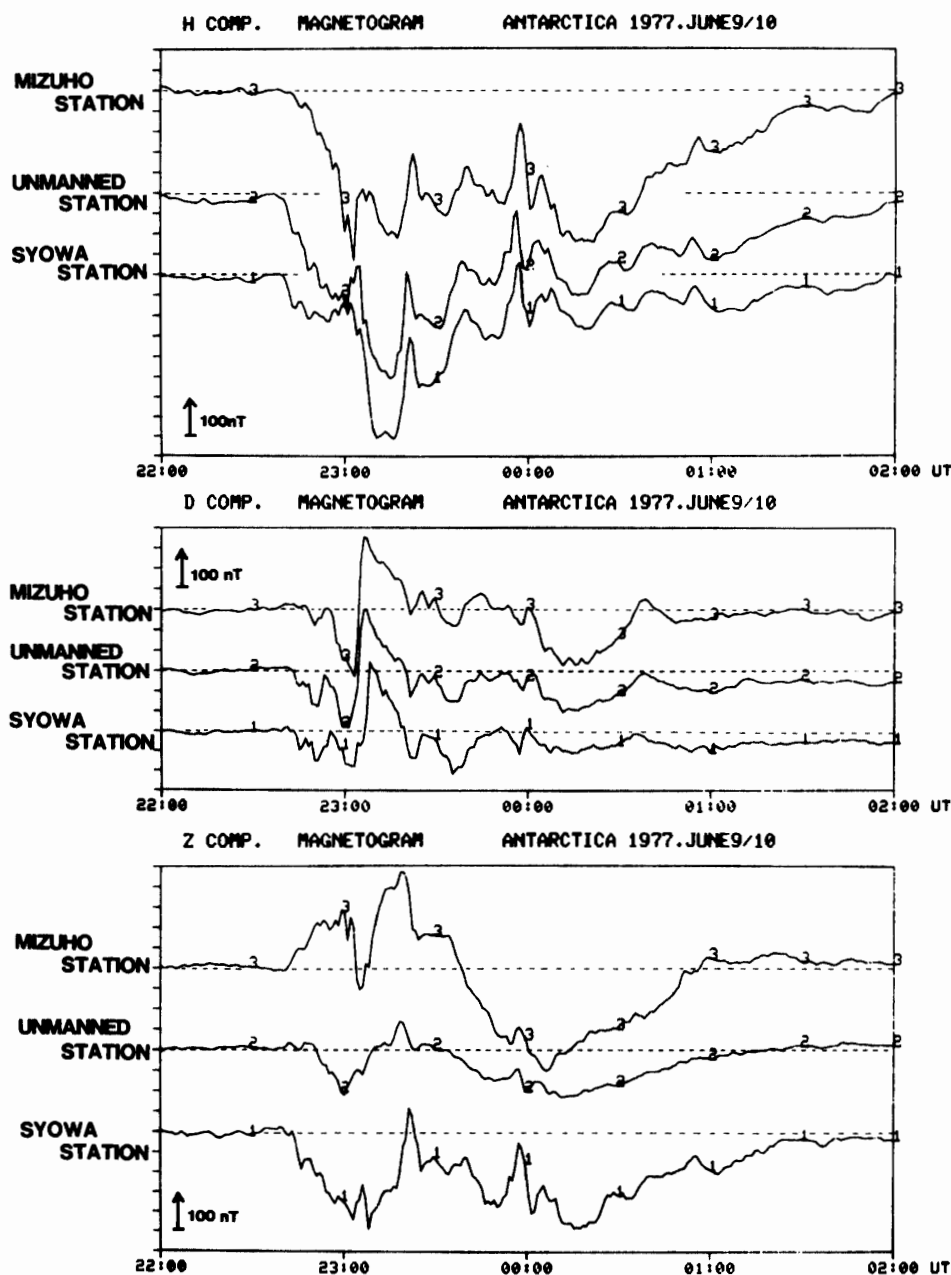


図5 みずほ基地, 無人観測点 (A1) および昭和基地における地磁気三成分の同時観測記録 (横軸の破線は, 地磁気の静穏日のレベルを示す.)

Fig. 5. Temporal variations of the H-, D- and Z-component magnetic field observed simultaneously at Mizuho, A1 unmanned and Syowa Stations during the period 2200-0200 UT on June 9-10, 1977. (The horizontal dotted lines indicate quiet day levels of the magnetic field.)

よびみずほ基地の変化に比べ A1 無人観測点の変動が小さい傾向を示した。A1 無人観測点では静穏時レベルを中心に約 -100 nT の変動が見られるのに対して, 昭和基地では 2200-0200 までの間ほぼ静穏時レベルよりマイナス側で変動し最大 230 nT 程度の変化が見られる。また, みずほ基地においては 2200-2340 頃まで静穏時レベルのプラス側で変動し最大 230 nT 程

度の変化が見られ、2340 過ぎから 0100 近くまではマイナス側の変動に変わり約 300 nT ほどの変化が見られる。3 点の Z 成分の変動はともに 0100 頃-0200 までの間にほぼ静穏時レベルにもどっている。

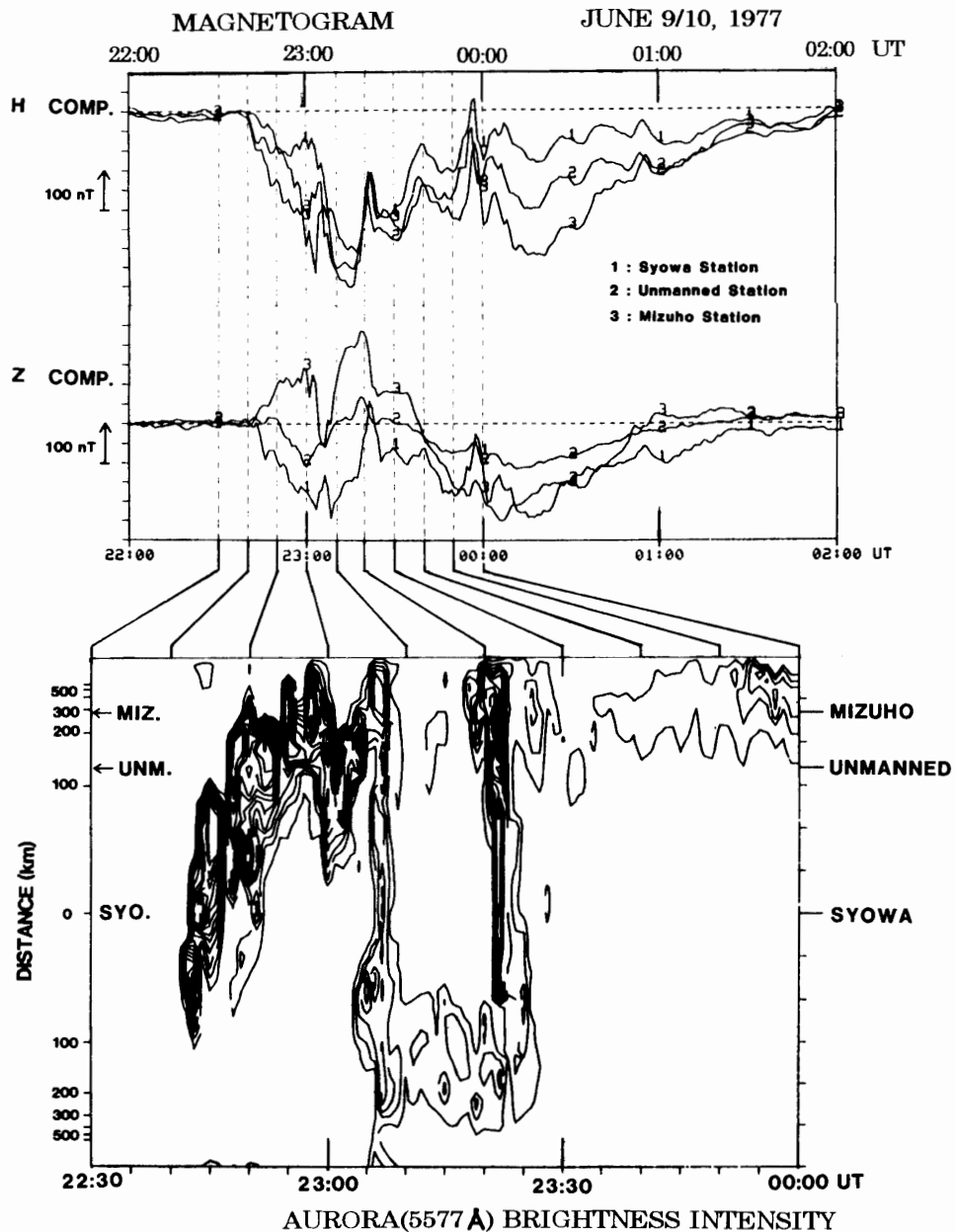


図6 みずほ基地、無人観測点 (A1) および昭和基地で観測された地磁気 H および Z 成分の変化と昭和基地の掃天ホトメーターで観測されたオーロラ光 (波長 557.7 nm) の発光領域との比較図 (1977 年 6 月 9-10 日のイベント)

Fig. 6. Temporal variations in H - and Z -component magnetic field observed during the period 2200-0200 UT on June 9-10, 1977. The data observed simultaneously at Syowa, A1 unmanned and Mizuho Stations are indicated by 1, 2 and 3, respectively. Scanning photometer data of 557.7 nm aurora observed at Syowa Station is also shown in the bottom panel.

図6に、地上で見る磁場変動のうちオーロラジェット電流の影響をより強く反映していると考えられる H および Z 成分変動 (ここでの解析では D 成分には触れない) と昭和基地の掃天フォトメーターで測光したオーロラの輝度分布 (1.0 kR のコンターで時間空間座標へ等高線図として変換) を比較した. オーロラ輝度分布図の縦軸は、昭和基地を中心に南北 500 km の範囲の空間を表し、横軸は時間を示している. オーロラは、3 点の H 成分の負の変動が始まった 2240 頃に、昭和基地の低緯度側で輝度上昇すると同時に、発光領域が高緯度側への移動を開始している. オーロラ発光の強い領域は、2300 頃には一旦みずほ基地の高緯度側へ移るが、2305 頃-2310 頃にかけて輝度の減少とともに低緯度側へ移動し、昭和基地の視野の全天に広った様相を見せている. オーロラの発光は、2320 頃にも輝度上昇が見られ、この時のオーロラの輝きの強い領域は高緯度側から低緯度側へと伝搬しているように見える.

図7の上部は、オーロラ輝度を濃淡で表示した時間空間座標に、3 観測点の Z 成分の変動記録から求めた $\Delta Z=0$ の点の軌跡を太い実線で表して重ね合わせたものである. 図で示す濃淡は、オーロラ輝度を 2.5 kR コンターで計算機処理し表示した. 図の下部には、オーロラ活動の様相を知るために昭和基地で撮影した全天カメラ写真の記録を示した. 全天カメラ写真

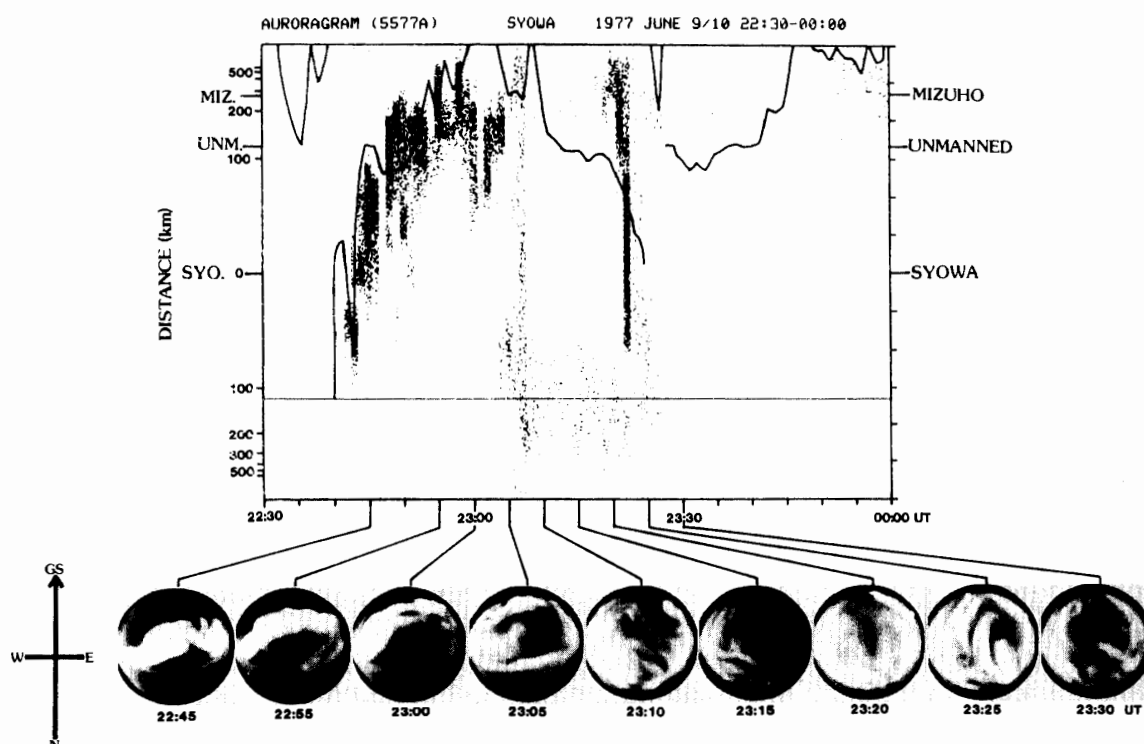


図7 オーロラ光 (波長 557.7 nm) の南北方向における時間空間変化 (濃淡表示) と地磁気 Z 成分変動 ΔZ が 0 である点の軌跡 (濃淡表示の中の太い線). 下のパネルは、昭和基地の全天カメラで撮影したオーロラの活動を示す.

Fig. 7. The space-time variation of auroral luminous region and all sky camera photographs in the before midnight hours. In the top panel, the full line curve indicates the trace of no Z -component disturbance in the geomagnetic field.

は、露光時間約 7 秒で半径約 500 km の視野範囲を撮影し、写真中央が昭和基地の天頂にあたり、上側が高緯度（南方向）、左側が西方向である。全天カメラ写真によれば、2245 に既に輝度の上昇した活動的なオーロラが昭和基地の天頂付近にあり、このオーロラの強く輝く中心的な発光領域は 2300 頃までに高緯度側へ移動している。また、2305 および 2310 の全天カメラ写真データが示すオーロラの発光領域は、昭和基地の視野の全域にわたるように拡大している。オーロラ光は 2315 頃に一旦高緯度側で弱まりを見せるが、2320 頃には再び昭和基地の視野範囲の全天で内部構造のはっきりしないようなオーロラの活動が見られる。このイベントの $\Delta Z=0$ の点の軌跡は太い実線で示されるが、それによれば 2240 頃には昭和基地の位置にあり、2242-2243 頃に一旦低緯度側のオーロラ位置に移動するが、強く輝くオーロラの発光領域の高緯度側への移動とともに $\Delta Z=0$ の点も短時間に高緯度側に移動している。2300 頃には図の高緯度側へ飛び出していることが示されているが、オーロラ発光領域の低緯度側へのもどりはじめ、あるいは、拡散する傾向が見られる 2305 頃や 2310 頃より、オーロラの移動に伴って $\Delta Z=0$ の点の軌跡もまた徐々に低緯度側に移動しているのがわかる。ここで示した図 6 および図 7 の事実から、オーロラの発光領域の移動にほぼ対応して Z 成分のゼロの点の軌跡も移動していることがわかる。これはオーロラジェット電流がオーロラの発光領域中のかなり狭い範囲を集中して流れていることを示唆する。

2.2.2. イベント-2 (June 18-19, 1977)

図 8 は、1977 年 6 月 18 日から 19 日にかけて観測されたイベントで、各観測点が真夜中付近に位置していた時の現象例である。H 成分の全体的な変動の様相は、3 点とも同じ傾向を示している。6 月 18 日の 2300-2310 頃に 3 観測点の H 成分ともに正方向への変動が見られるが 2310 過ぎ頃には各点とも負への変動に転化している。この時の変動の大きさは、高緯度側のみずほ基地が 200 nT を越える値で最も大きく、中間点に位置する A1 無人観測点では 100 nT 程度、昭和基地では約 40 nT の変化が見られ 3 点のうちで一番小さな変動値を示している。その後、3 観測点の H 成分の変動は、昭和基地および A1 無人観測点で 0000 付近の約 10 分間に一度正の変動に変わっているが、全体的な傾向は負の変動の中にあり、それぞれ鋭いパルス的な負の変動を数回繰り返しながら、やがて 19 日の 0015-0020 頃のピークを境として徐々に静穏時レベルへと回復していく様相が見え、0100 頃には 3 観測点とも $\Delta H=0$ ライン上または正の変動に変わっている。

一方、Z 成分の変動は、2310 頃-0020 頃までの期間に、3 観測点ともパルス的な急激な変化を伴って複雑な変動を記録している。良く見ると、高緯度側のみずほ基地の変動幅が最も大きく、正の変動と負の変動が繰り返し発生しているのが目立つ。また、A1 無人観測点では、負の変動であるが他の観測点より変動幅が小さく、静穏時のレベルラインに近いところでの変動であることがわかる。昭和基地では 2313 頃に見られる急激な負の変動以後、0100 前に正の変動に転化するまでほぼ負の変動が記録されている。

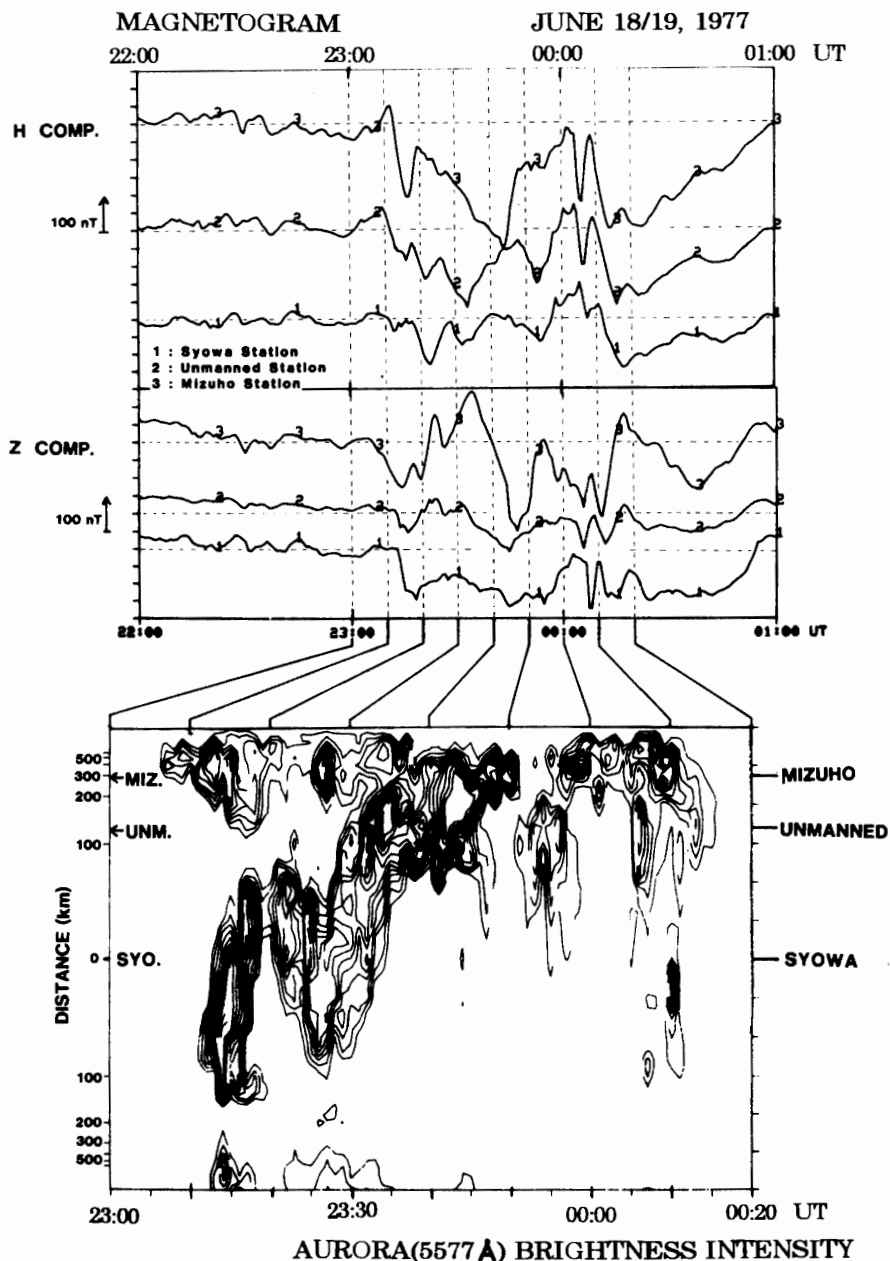


図8 みずほ基地、無人観測点 (A1) および昭和基地で観測された地磁気 H および Z 成分の変化と昭和基地の掃天ホトメーターで観測されたオーロラ光 (波長 557.7 nm) の発光領域との比較図 (1977年6月18-19日のイベント)

Fig. 8. Temporal variations of the H - and Z -component magnetic field observed simultaneously at Syowa, A1 unmanned and Mizuho Stations during 2200-0100 UT on June 18-19, 1977. Scanning photometer data of 557.7 nm aurora observed during 2300-0020 UT at Syowa Station is also shown in the bottom panel.

このような3点の H および Z 成分変動の特徴は、このイベントの電離層電流の中心が昭和基地より高緯度側に位置していたことが多いことを示唆している。その中心位置は昭和基地と A1 無人観測点の間から、時間とともに A1 無人観測点とみずほ基地の間へと移り、さ

らには 2340-2355 の間ではみずほ基地より高緯度側に移動しているものと推察できる. この動きはオーロラ発光領域の動きと良い相関を示している. 図 8 の下部パネルに示したオーロラ発光領域の変動は, 2305 頃-2335 頃までの間は発光領域の一群がみずほ基地の頭上近辺にあり, これと異なる一群が 2310 頃に極めて急激な輝度上昇とともに, 短時間のうちに昭和基地の低緯度側からその頭上を通過して高緯度側へ移動している. 図 9 から明らかなように, 後者のオーロラの発光輝度は, みずほ基地の頭上近辺の一群よりも高い. この時のオーロラ発光領域の高緯度への移動は, A1 無人観測点まで達していないが, 2335 頃には A1 無人観測点の頭上を通過してさらに高緯度側へ移動し, 2340 頃にはみずほ基地の高緯度側へ達している. 同時刻近辺の地磁気データの Z 成分を良くみると, A1 無人観測点で 2333 頃に, また, みずほ基地では 2340 頃に正から負への変動をしていることが確認できる. Z 成分から見た電離層電流の中心位置がオーロラの強く輝く領域と良い関係にあることが, ここからも推測できる.

図 9 の下部の全天カメラ写真データからも前述のオーロラ活動を裏づけることができる.

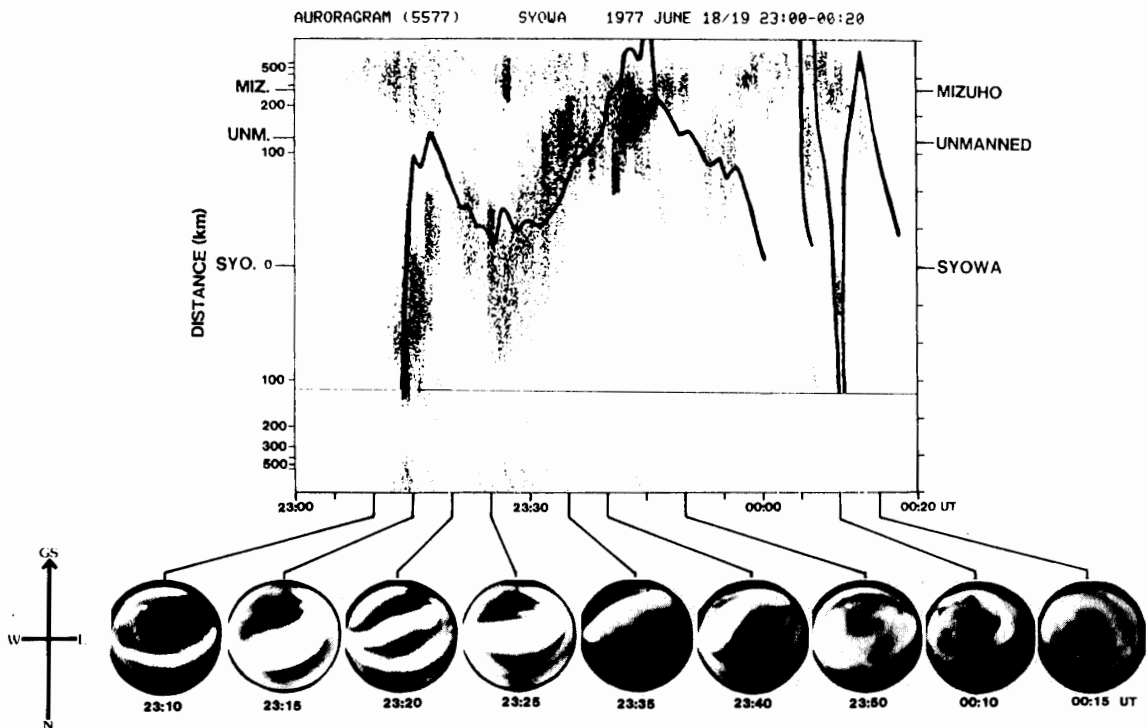


図 9 昭和基地の掃天ホトメーターで観測されたオーロラ光 (波長 557.7 nm) の南北方向における時間空間変化の濃淡表示図. 図中の太い実線は, みずほ基地, 無人観測点 (A1) および昭和基地の 3 点で観測された地磁気 Z 成分のデータを 2 次補間して求めた $\Delta Z=0$ の点の軌跡である. 下のパネルは, 昭和基地の全天カメラで撮影されたオーロラ写真記録である.

Fig. 9. The space-time variation of auroral luminous region obtained by meridian scanning photometer and all-sky camera photographs at Syowa Station. The thick line in the top panel shows the trace of no Z component disturbance of the geomagnetic field.

オーロラは 2310 頃にみずほ基地上空付近にも輝きが見られるものの昭和基地の低緯度側にアーク状オーロラが強く輝いているのが見てとれる。その 5 分後の 2315 頃には急激な輝度上昇とともに南北両方向へ活動域を拡大している。2320-2325 頃には全天に多重アークが見られる広範囲な活動となり、2335, 2340 および 2350 のデータでは強く輝くオーロラの活動域は高緯度方向へと移動し、昭和基地の低緯度側のオーロラは弱くなっている。それ以後は構造の不明確なベイル状のオーロラが全天を覆い包むような傾向が見られる。この時の Z 成分のゼロの点の軌跡は、2314 あるいは 2315 頃にオーロラの急激な輝度上昇とその輝きの強い部分の高緯度移動に対応して、同じように高緯度側へ動いている。 $\Delta Z=0$ の点は 2317 頃には A1 無人観測点の付近に達し、その後 30 分過ぎ頃までの間に低緯度側へ緩やかに移動しているが、この動きもオーロラの発光領域の移動にほぼ対応している。更に $\Delta Z=0$ 位置は、2332-2333 過ぎ頃には、強く輝くオーロラの発光領域の移動に対応して再び高緯度方向への移動を開始し、2340-2350 頃の間ではみずほ基地より高緯度側に移動している。2350 過ぎの構造が不明確なオーロラの低緯度方向への拡散に対応して $\Delta Z=0$ の軌跡も低緯度方向へ移動しているのが見てとれる。

図 8 および図 9 から、このイベントに関しても、オーロラの発光領域の移動にほぼ対応して Z 成分のゼロの点の軌跡が移動し、オーロラジェット電流がオーロラの強く輝く発光領域中をかなり狭い範囲に集中して流れていることが示唆される。

以上二つのイベント例で、地上で観測される地磁気変動記録から予想した電離層中を流れるオーロラジェット電流の位置とオーロラの発光領域の関係を示した。いずれも良い対応をしていることが明らかである。このことは、オーロラ発光領域の中を極めて狭い範囲に集中的にオーロラジェット電流が流れていることを示しており、少なくとも 150 km 程度離れた地上観測点群の地磁気変動記録により、オーロラジェット電流の中心位置を推定することが可能であることを示唆している。

3. サブストーム時の南北共役性

前章で明らかにした、電離層中の狭い範囲にオーロラジェット電流が流れているとの示唆に基づき、強いオーロラジェット電流が流れていることを予想させるような現象が見られる地磁気変動データから地磁気南北共役性の変化を調べる。取り扱うデータは、南極の昭和基地周辺の 3 観測点と、それらの地磁気共役点近くにあると考えられるアイスランドのレイルボグル基地 (Leiruvogur Station) の地磁気記録である。両半球のデータは、その全体的な変動の様相が一般に良く似ている。なおオーロラジェット電流が流れていることを前提条件にしているので、地磁気の湾型負変動と思われる現象に限定して解析する。

図 10 は、レイルボグル基地 (地理座標: $64^{\circ}08'N$, $21^{\circ}47'W$, 地磁気座標: 65.64° , 69.05°) と南極の 3 観測点の地磁気 H 成分の変動の様相が良く似ていることを示す一例である。図に示し

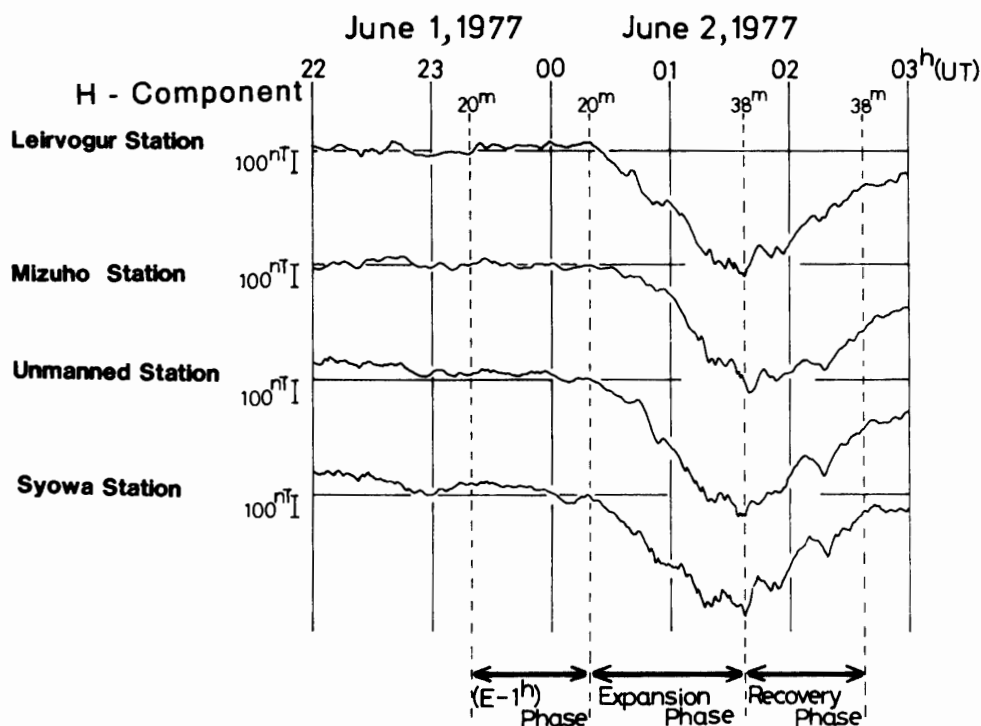


図 10 南極域における地磁気 H 成分変動の多点観測記録とレイルボグル (アイスランド) で観測された地磁気 H 成分変動の記録 (1977 年 6 月 1-2 日のイベント). 地磁気の湾型負の変動が両半球でほぼ同時に発生しているように見える.

Fig. 10. The H -component magnetogram data at Leirvogur (Iceland) and Antarctic three stations (Mizuho, AI unmanned and Syowa) on June 1-2, 1977. The occurrence of magnetic negative bay seemed to appear nearly at the same time in both hemispheres.

たデータは、1977 年 6 月 1 日から 2 日にかけて観測された記録で、上から下へレイルボグル基地 (北半球)、みずほ基地・AI 無人観測点・昭和基地 (南半球) のデータが順に示されている。各基地のデータとも 6 月 1 日の 2200-0000 頃までは静穏時レベル付近で微変動を繰り返しているが、0020 過ぎ頃からほぼ同時に負の変動が始まっている。各観測点とも 0140 頃にそれぞれの最低値を示し、その後徐々に元の静穏時レベルへもどる傾向が見てとれ、全体的な変動の様相が良く似ていることがわかる。これに対し、0020 頃の負の変動の開始時刻など全体の変動の中に見られる細かな変化については、南極の各観測点間およびレイルボグル基地とも僅かながらその発生時刻や大きさに差が認めらる。これらの差が意味のあることは既に前章で述べた。

ここでは、この各点のデータ間に見られる変動値の僅かな違いや時間差に着目し、北半球の一点の観測記録に見られる地磁気変動が、南極の 3 観測点のどの場所の変動記録と最も良い対応を示すかを相関的な比較解析で調べる。解析対象としたデータは、南極における AI 無人観測点の記録が存在する 1977 年 5 月末から 8 月 23 日までの約 3 カ月間の記録である。

この期間のデータの中から、 H 成分が負の湾型変動の様相を示しているイベント 22 例を無作為に選出した。選出したイベントは、本論文ではサブストーム現象と総称して取り扱うことにする。解析手法は、サブストームの発生期間を時間軸で三つに区分して、それぞれの区分ごとの相互相関係数を計算機処理により求める方法をとった。相互相関係数 ($r_{x,y(t)}$) は、南北 2 地点の観測データの対応性や時間的なずれを調べるためのもので次式で与えられる。次式中の分子は x, y の相互共分散で、分母の平方根の中は x および y の自己共分散である。

$$r_{x,y(t)} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^{n-1} x_{(k)} \cdot y_{(k+1)}}{\sqrt{\left(\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_{(k)}^2\right) \left(\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n y_{(k)}^2\right)}} .$$

さて、サブストーム発生期間の三つの区分けは、図 10 中に破線で示したように ① H 成分の負の湾型変動が開始された時刻 (0020) からピークに至った時刻 (0138) までをサブストームの爆発期 (Expansion Phase: EP) と規定し、その前後 1 時間の現象をそれぞれ ② サブストームの発達期 (E-1st Phase: E-1P, 2320-0020) ③ サブストームの回復期 (Recovery Phase: RP, 0138-0238) と呼称することにして区分した。なおここでの解析では、サブストームの爆発期を、レイルボグル基地の H 成分の負の湾型変動の開始時刻と最低値を示した時刻を基準として取り扱った。具体的な解析イベントの 2 例を以下に示す。

3.1. イベント-1 (July 10-11, 1977)

図 11 は、1977 年 7 月 10 日から 11 日にかけて観測された地磁気 H 成分の記録である。南極の 3 観測点のデータ上には、レイルボグル基地の記録を破線で重ね描きしてある。実線で示される南極の各観測点の変動記録と破線で示されるレイルボグル基地の変動記録から、全体の様相としては同じような変動と見ることができる。図中に示したようにこのイベントでは、レイルボグル基地のデータが負の湾型変動を開始した 2229 から最低値に至った 2325 までを EP と決め、負の変動が始まる 1 時間前の 2129 からが E-1P, RP は湾型負変動の最低値が見られた時刻から 1 時間後の 0025 までとした。

図 12 は、レイルボグル基地の変動に対する南極の 3 観測点の変動の相互相関係数を求めて図示したものである。上から順にレイルボグル基地対みずほ基地 (LRV: MIZ), レイルボグル基地対 A1 無人観測点 (LRV: UMN), レイルボグル基地対昭和基地 (LRV: SYO) の相互相関を、また、左側から発達期 (E-1st Phase), 爆発期 (Expansion Phase), 回復期 (Recovery Phase) の相互相関を示した。発達期のレイルボグル基地と南極の 3 観測点の相互相関係数は、3 点とも 0.5 以下であり対応が良いとはいえない。爆発期の相互相関係数は 0.58-0.85, 回復期では 0.58-0.79 で、発達期に比べてレイルボグル基地と南極の 3 観測点の現象との対応が良くなっている傾向が見られる。また、爆発期や回復期の対応関係を観測点別に見てみると、

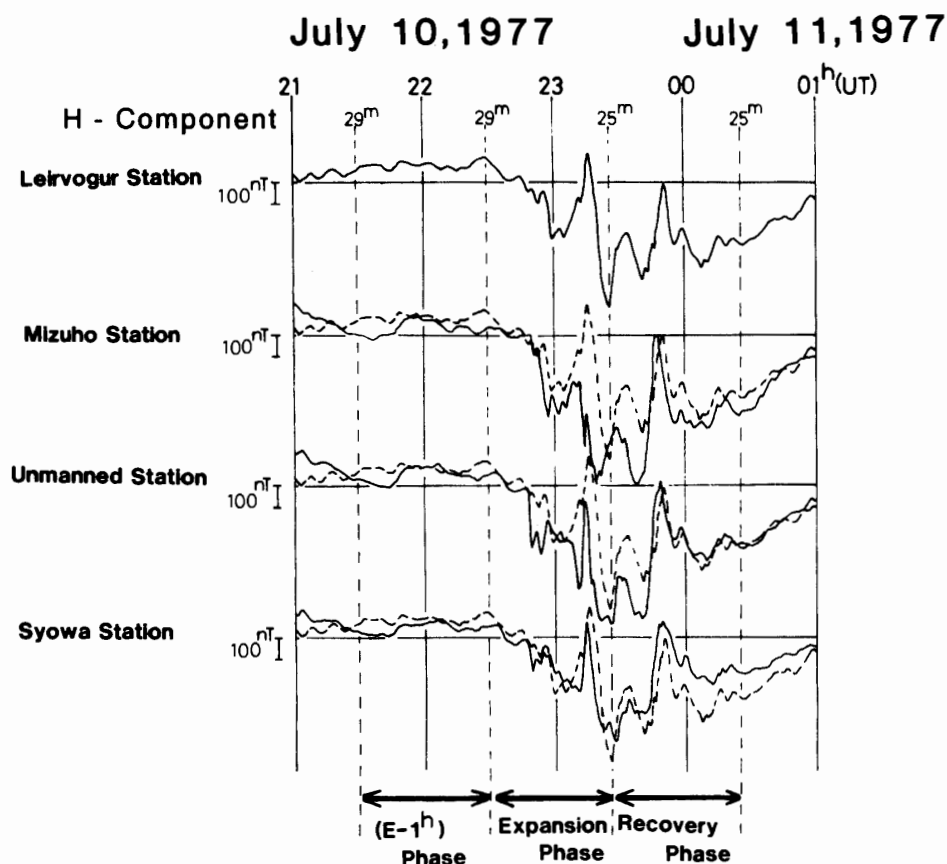


図 11 レイルボグルと南極の 3 観測点 (みずほ基地, A1 無人観測点および昭和基地) で観測されたサブストーム時の地磁気 H 成分変動記録. 南極の 3 観測点の記録にレイルボグルの観測記録を破線で重ね書きしてある.

Fig. 11. Relationship between the H -component magnetograms at Leirvogur and three antarctic stations during the magnetic substorm on July 10-11, 1977. The observed H -value at Leirvogur Station is superimposed (with dotted lines) on the data of three antarctic stations.

高緯度側の観測点 (みずほ基地) の相関係数が 0.6 弱であるのに対して低緯度側の観測点 (A1 無人観測点や昭和基地) が 0.7 以上を示し, みずほ基地より低緯度側に位置する観測点とレイルボグル基地との相関性が高い. これは地磁気共役性が良いことを示している. また, 爆発期の相互相関は, 昭和基地の相関係数が 0.85 を示しており, 回復期のそれよりもやや優性であるように思われるが, ここでのイベント例のみからは判断できない.

3.2. イベント-2 (July 6-7, 1977)

図 13 は, 1977 年 7 月 6 日から 7 日にかけて観測されたデータである. この例でも南極の各観測点の変動とレイルボグル基地の変動とは, 多少のずれは認められるが概ね似かよっている. このイベントでは, 図中に示したように 0002-0204 までの比較的長い期間を爆発期 (Expansion Phase) と区分した. 発達期 (E-1^h Phase) は 2302 からの 1 時間であり, 回復期

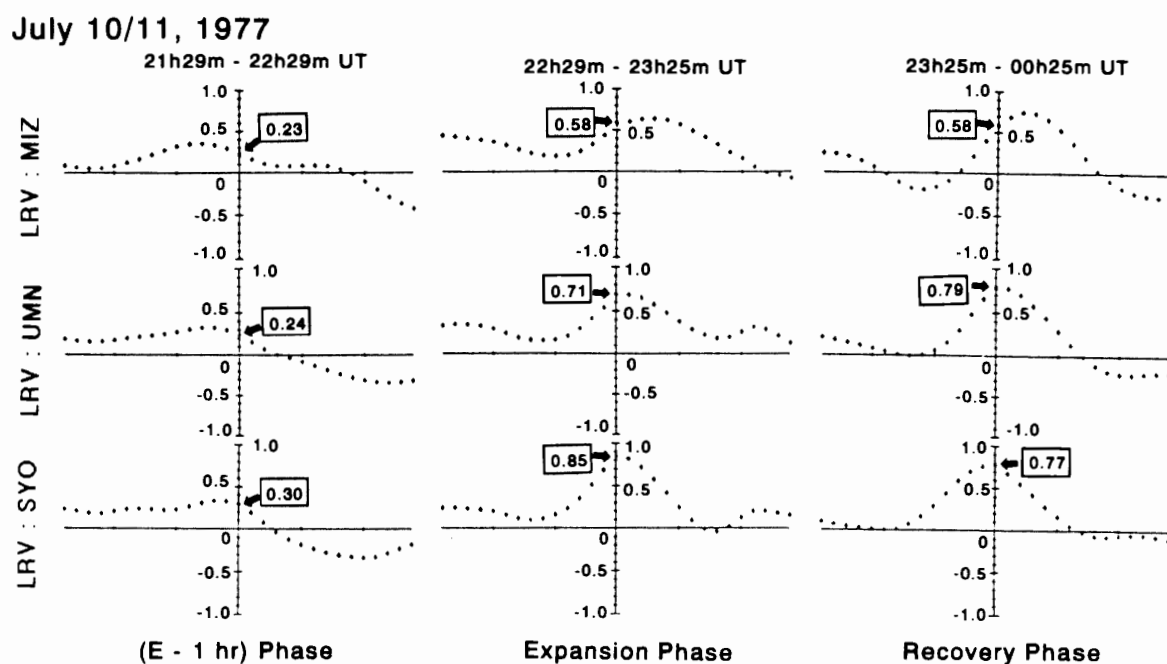


図 12 レイルボグルの地磁気 H 成分の変動に対する南極の 3 観測点の地磁気 H 成分変動との相互相関係数値 (1977 年 7 月 10-11 日のイベント)

Fig. 12. Correlation coefficients between ΔH -values observed at Leirvogur and three antarctic stations on July 10-11, 1977. (top panel shows the correlation between Mizuho and Leirvogur, middle panel shows between A1 unmanned and Leirvogur, bottom panel shows between Syowa and Leirvogur)

(Recovery Phase) は最低値が見られた時刻から 1 時間後の 0304 までである。

図 14 の発達期のレイルボグル基地と南極の 3 観測点の相互相関係数値は、最大で精々 0.53 であるが、爆発期および回復期の相互相関係数は、0.7 あるいは 0.8 で発達期のそれに比べると大きく、レイルボグル基地と南極の観測点との対応が良くなっている。爆発期あるいは回復期におけるレイルボグル基地と各観測点の対応関係を比較すると、高緯度側の観測点 (みずほ基地) との相関係数が 0.7 程度であるのに対して、それより低緯度側の A1 無人観測点や昭和基地では、0.7 より僅かではあるが、いずれも大きな値を示す傾向が見られる。この例でも、イベント-1 の例と同様にレイルボグル基地との共役性が良いのは、みずほ基地よりも低緯度側の A1 無人観測点や昭和基地の方である。

3.3. まとめ

3.2 節で述べた解析手法により、22 イベントのサブストームについてレイルボグル基地と南極の 3 観測点との相互相関をフェイズ別に調べた。図 15 は、南北の観測点で記録された現象の対応性を相関係数の群別でみた時の頻度数の分布である。観測点間、フェイズ別の対応は図 14 と同じである。各パネルの横軸は相互相関係数の値で、縦軸は頻度数を示す。頻度数

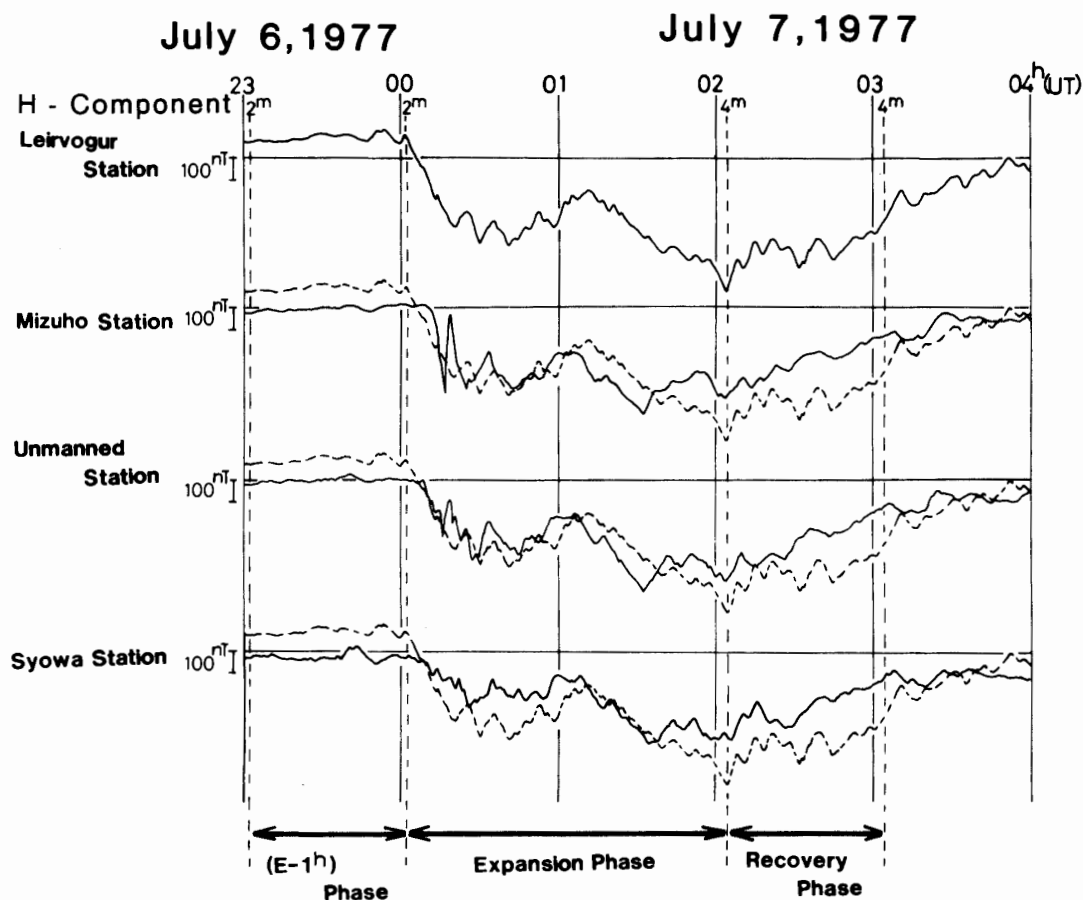


図 13 レイルボグルと南極の 3 観測点で観測された 7 月 6-7 日のサブストーム時の地磁気 H 成分変動記録. 他は図 11 と同じ.

Fig. 13. Same as Fig. 11 for the data observed on July 6-7, 1977.

分布は、相互相関係数 (r) を 0.2 間隔の範囲で区分してある.

例えば、A の図からは、発達期のレイルボグル基地とみずほ基地の相互相関は、良いケースも悪いケースもほぼ同数あることが見てとれる。同様に E の図から、レイルボグル基地と A1 無人観測点間では爆発期に見られる現象の南北の対応性が良いことが判る。また、I の図からは、レイルボグル基地と昭和基地との相互相関が、発達期に比べ爆発期や回復期の方がはるかに対応性が良いことがわかる。

表 2 は、図 15 の結果を統計的な視点で整理したものである。サブストームのフェイズ別に見たレイルボグル基地と南極の 3 観測点との相関係数の平均値 (mean value), 偏差 (variance), 標準偏差 (standard deviation) を示している。発達期の南北対応性は、3 観測点ともに相関係数が 0.5 前後でありあまり良いとは言えない。これに対して、爆発期では 3 観測点ともほぼ 0.8 程度の良い対応性を示している。回復期のそれは爆発期よりもやや小さい値の 0.66-0.74 である。サブストーム時の南北共役性は、フェイズ別には爆発期に南北の対応性が最も

July 6/7, 1977

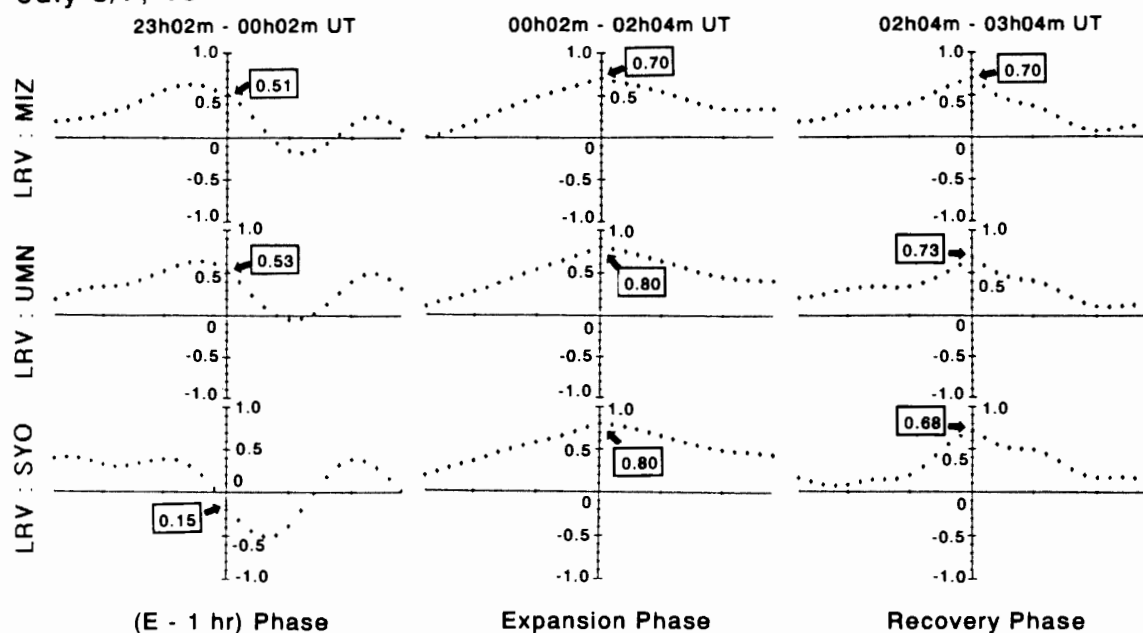


図 14 レイルボグルと南極の 3 観測点間の 7 月 6-7 日イベントの相互相関係数値. 他は図 12 と同じ.

Fig. 14. Same as Fig. 12 for the data observed on July 6-7, 1977.

良く、次が回復期であり、発達期は必ずしも良い対応性が見られない。また、観測点別には AI 無人観測点が最も共役性が良く、次が昭和基地で、高緯度側に位置するみずほ基地が最も共役性がよくない。発達期の共役性が爆発期や回復期より劣るのは、図 11 や図 13 などに見るサブストーム発生の 1 時間前の現象が極めて変動の少ない、特徴の無い変化であることに関連しているように考えられる。ここで用いた相互相関による解析手法が、このフェイズに関する限り適当ではないように思える。従って、本論文では発達期と区分した現象の相互相関の解析結果に限り、解析の事実のみを表示するにとどめ結果に関する考察は行わない。

図 16 に表 1 の平均値を用いて、サブストーム発生時にレイルボグル基地の現象が南極のどの観測点の現象と良い相関関係にあるかをフェイズ別に示した。また図 17 は、ここでの解析結果を総合的にまとめて模式化したもので、レイルボグル基地と南極の 3 観測点間とのサブストーム発生時における南北の共役関係を示した。サブストームの各フェイズにおける全体としての南北の相関関係は、3 観測点の相関係数の平均値で表している。発達期では、一般に変動そのものが微小で際だった特徴もない現象であることから相関係数の値が小さく、先に述べたようにここで用いた解析手法の結果で南北の共役性を吟味することは危険である。一方、爆発期のレイルボグル基地と南極の 3 点間の平均相関係数は 0.8、また、回復期では約 0.7 で、南北で見られる現象の対応性が良いことがわかる。観測点別に見た爆発期および回復期の現象の南北の対応性は、既に表 1 や図 16 に示したが、この対応性についても再度図の下

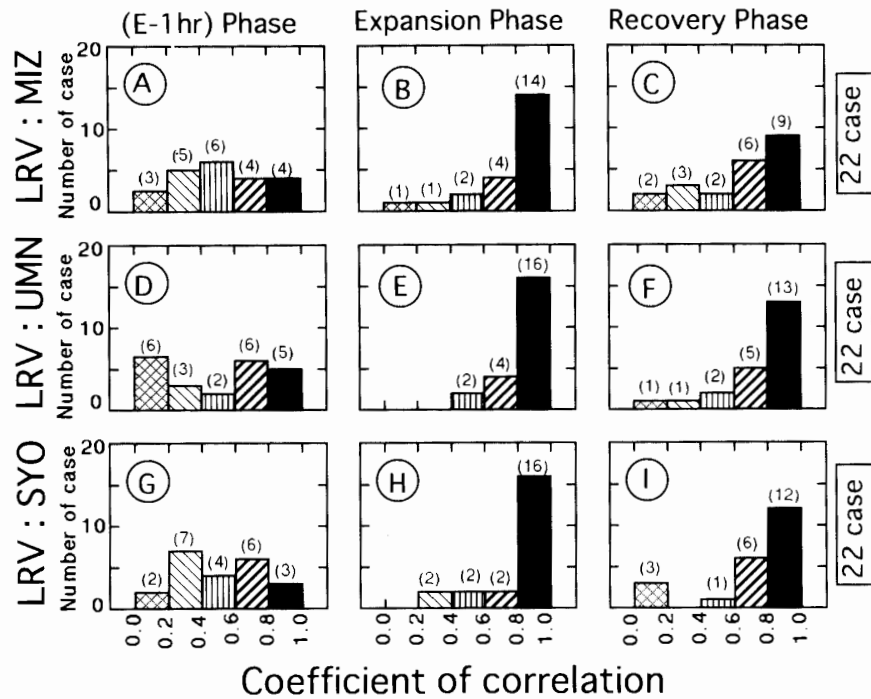


図 15 相互相関係数値で群別して見たレイルボグルと南極の3観測点(みずほ基地, A1 無人観測点および昭和基地)間の共役性. 図の棒グラフは, 相互相関係数 (r) を 0.2 間隔の範囲で区分した時の頻度数を表す.

Fig. 15. Occurrence frequency of the correlation coefficients between ΔH -values observed at Leirvogur and three antarctic stations conjugate point pair period polar magnetic substorm. A mark in the figure is expressed as follows:






; $0.0 \leq r < 0.2$,
 ; $0.2 \leq r < 0.4$,
 ; $0.4 \leq r < 0.6$
; $0.6 \leq r < 0.8$,
 ; $0.8 \leq r \leq 1.0$.

表 2 サブストーム時にレイルボグルと南極の3観測点で観測される現象の対応性
Table 2. Statistics of correlations between each Antarctic station and Leirvogur station during polar magnetic substorm.

	Number of data	Station*	Mean value $\bar{X} = 1/n \sum X_i$	Variance $V = 1/(n-1) \sum (X_i - \bar{X})^2$	Standard deviation $S = \sqrt{V}$
(E-1hr) phase	n=22	LRV : MIZ	0.51	0.0719	0.27
		LRV : UMN	0.49	0.0964	0.31
		LRV : SYO	0.49	0.0645	0.25
Expansion phase	n=22	LRV : MIZ	0.77	0.0531	0.23
		LRV : UMN	0.82	0.0237	0.15
		LRV : SYO	0.80	0.0485	0.22
Recovery phase	n=22	LRV : MIZ	0.66	0.0954	0.31
		LRV : UMN	0.74	0.0577	0.24
		LRV : SYO	0.72	0.0954	0.31

*LRV : Leirvogur Station, MIZ : Mizuho Station, UMN : Unmanned Station, SYO : Syowa Station.

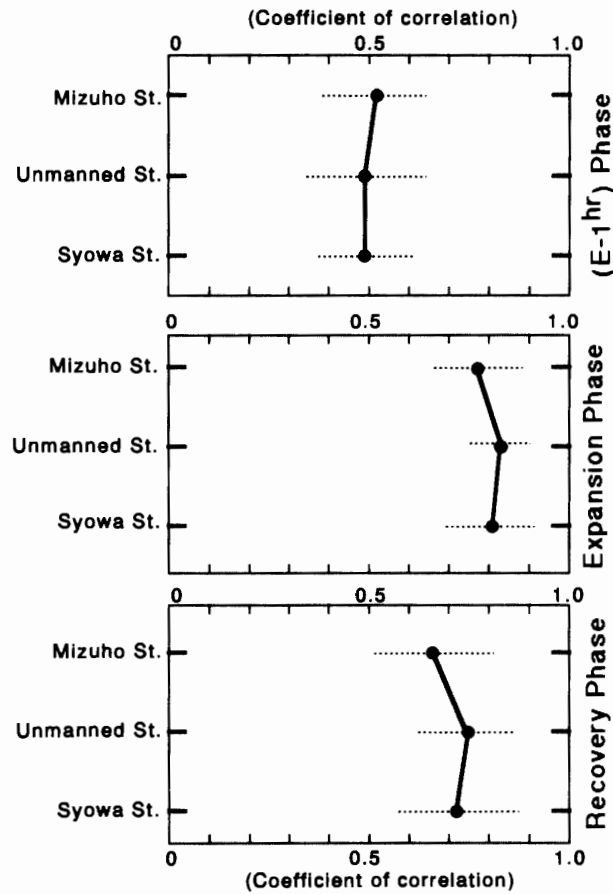


図 16 フェイズ別に見たサブストーム時の南北の相関係数

Fig. 16. Estimated conjugate points between Antarctica area and Leirvogur Station for different phases of magnetic substorms.

段に表示してある。爆発期や回復期におけるレイルボグル基地と南極の約 150 km 離れた三つの観測点との共役性は、最も高緯度側に位置するみずほ基地が AI 無人観測点や昭和基地より低い傾向が認められる。発達期の共役性に関してはここでの解析手法では不明確である。

4. 地磁気共役点の地方時 (MLT) 依存特性

レイルボグル基地の地磁気座標緯度は IGRF モデル (1975) によれば 65.64° と計算され、これに対して昭和基地のそれは -66.40° で、南極の 3 観測点のうちでレイルボグル基地に最も近い位置関係にある。ここでは、モデル計算上からレイルボグル基地周辺と地磁気共役関係にある昭和基地周辺の南極域とで同時に観測された地磁気現象を比較し、南北共役点の地磁気地方時 (MLT) 依存性について調べる。解析手法は、2 章で示した南北のそれぞれの地磁気 Z 成分の $\Delta Z = 0$ の点の軌跡を先ず求め、その軌跡の位置を同じ座標系のなかで比較検討する方法を用いた。解析データは、南半球側が 2 章と同様に昭和基地周辺の 3 観測点、北半球側がレイルボグル基地とそのすぐ高緯度側に隣接しているフッサフェル基地の 2 観測点

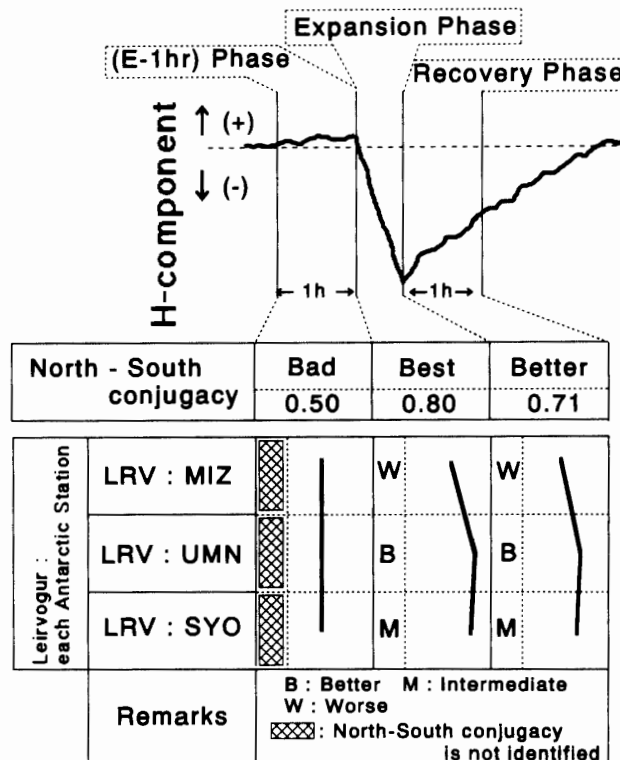


図 17 サブストーム時の南北共役性に関する模式図

Fig. 17. The summary of northern-southern conjugacy depending on the phase of polar magnetic substorm

のデータを使用した。フッサフェル基地の位置は $64^{\circ}40'N$, $21^{\circ}02'W$ (地理座標) で、地磁気座標の緯度経度は 66.09° , 70.27° である。解析対象にしたデータ期間は、1977年5月末から8月23日までの85日間である。解析に当たっては、地磁気 Z 成分の $\Delta Z=0$ の点の軌跡が「電離層中を流れる電流系の中心位置である場合」と「電離層に電流が流れていない場合」と二通りであることに注意する必要があることから、求めた $\Delta Z=0$ の点の軌跡が電離層電流のゼロの位置では無いことを裏付けるために、昭和基地とレイルボグル基地の両観測点の地磁気 H 成分の変化の様相をチェックしている。オーロラ帯付近の地磁気変動の様相は、昼間側では比較的变化に乏しく夜間側で大きな変動が見られることが一般的であるため、昼間側のデータの比較解析は、変動が小さいことに影響されて夜間側に比べて困難である。ここで報告する南北共役点の地磁気地方時 (MLT) 依存特性に関しても、昼間側のデータ解析数に比べ夜間側の時間帯の解析数が圧倒的に多いことを付記する。解析の具体的な例を4イベントについて以下に示す。

4.1. イベント-1 (July 28-29, 1977)

1977年7月28日から29日にかけて、昭和基地とレイルボグル基地で同時に観測された地

磁気 H 成分の変動の様相を図 18 上段に示した。この地磁気 H 成分の変動の様相は、南北の観測点の頭上近くに強い電離層電流が流れていることを示している。この日の地磁気擾乱は、昭和基地では最大 1000 nT 程度、レイルボグル基地では最大 830 nT 程度の負の変動が 0030 頃に観測されている。このイベントは、磁気擾乱が真夜中前から暁側 (dawn side) を経て朝方側の早い時間帯まで継続した現象の南北共役性を調べた例である。

図 18 の下段には、南極側のデータによる $\Delta Z=0$ の点の軌跡とアイスランド側の $\Delta Z=0$ の点の軌跡を示した。アイスランド側の $\Delta Z=0$ の点の軌跡は、与えられる 2 点のデータから

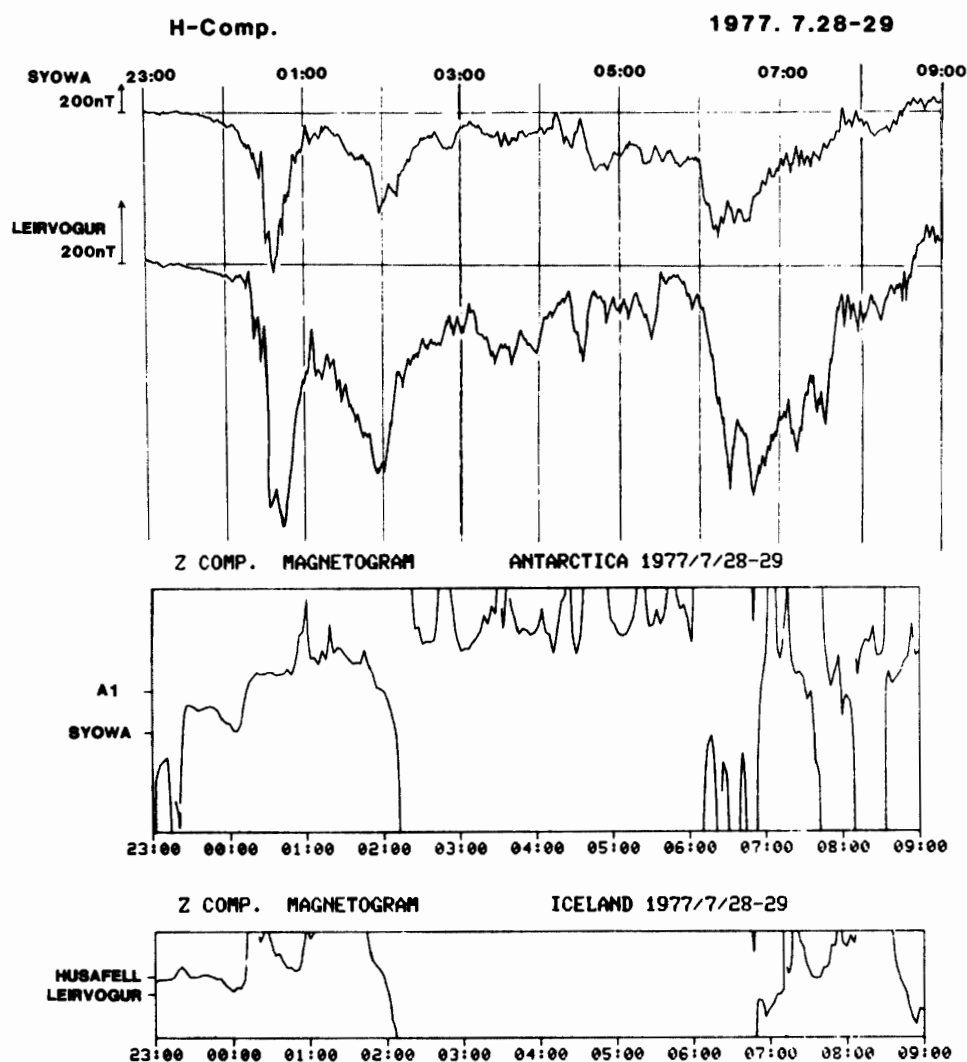


図 18 真夜中直前から早い朝方側までの時間帯 (2300-0900 UT \approx MLT) に南北で観測された地磁気変化の現象例。下のパネルには、南北ともそれぞれの観測点の地磁気 Z 成分記録を補間して求めた $\Delta Z=0$ の点の軌跡を示す。

Fig. 18. Magnetic H-component variations observed simultaneously at Syowa and Leirvogur (upper and lower curves in the top panel) Stations during period 2300-0900 UT on July 28-29, 1977. The space-time variation in the bottom panel shows the trace of zero point of ΔZ -variation in Antarctic and Iceland.

ある点を決める一次関数 $y = ax + b$ を解くことで求める。すなわち、

$$y_0 = ax_0 + b, \quad (6) \text{ (レイルボグル)}$$

$$y_1 = ax_1 + b, \quad (7) \text{ (フッサフェル)}$$

とにおいて、 x_0 を仮に原点と決めれば、式 (6) は $y_0 = b$ で表され、式 (7) の係数 a が $a = (y_1 - y_0) / x_1$ となる。係数 a 、 $b (= y_0)$ を第 2 章で述べた南極側と同じ時間間隔で求め、 $0 = ax + y_0$ を x について解き、その点の軌跡を座標系の中に表現する。

南極側の昭和基地と A1 無人観測点との位置間隔は約 120 km、アイスランド側のレイルボグル基地とフッサフェル基地との位置間隔は約 55 km である。したがって、縦軸のフルスケールは、南極側が約 700 km、アイスランド側が約 330 km である。南北両者の $\Delta Z = 0$ の点の軌跡を比べると、2300-0200 と 0700-0900 頃に南北で類似した変化をしている。一方、0200-0700 頃ではアイスランド側の時間空間座標に $\Delta Z = 0$ の点の軌跡が見られないことから、南北の類似を議論するには無理がある。しかし、その前後の時間の類似関係から、北側の $\Delta Z = 0$ の点の軌跡がこの座標軸より更に高緯度側に存在している可能性が高いことが示唆される。

図 19 は、南極側の $\Delta Z = 0$ の点の軌跡に、アイスランド側の $\Delta Z = 0$ の点の軌跡の類似するところを重ね合わせて破線で表示してある。南北の $\Delta Z = 0$ の点の軌跡は、破線内で同じように変動しているように見える。すなわち、このイベントでは、2300-0600 頃までは昭和基

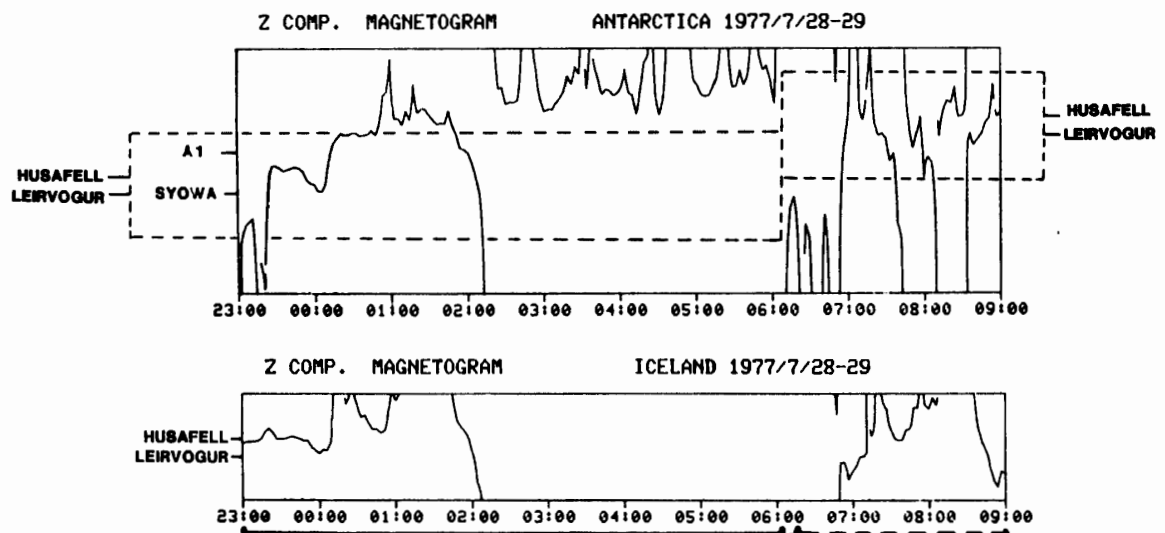


図 19 地磁気 Z 成分の $\Delta Z = 0$ の点の軌跡の南北比較図。破線で示す時間空間領域で南北の共役性が良いように見える。

Fig. 19. Comparison between northern and southern hemispheres of the zero ΔZ -value positions observed from nightside to late morning hours on July 28-29, 1977. In the figure, the dotted rectangular area seems to indicate a good conjugacy.

地とレイルボグル基地の現象が良い共役性にあり、0600-0900頃までの間では、A1無人観測点とレイルボグル基地の現象が良い共役性をもっているように見える。南極側を固定して考えると、0600頃付近でアイスランド側の共役点が高緯度側へ移動したように思える。

4.2. イベント-2 (August 9, 1977)

1977年8月9日の1300-2100にかけて、昭和基地とレイルボグル基地で同時に観測した地磁気 H 成分の変動の様相を図 20 の上段に示した。このイベント解析は、昼過ぎから夕暮れ時 (dusk side) を経て夕方側の遅い時間帯までの現象を調べている。この地磁気 H 成分の変動の様相は、南北とも、真夜中側に見られるような観測点近くに強い電離層電流系が存在するようには見えない。前述の例に比べ変動幅は小さく、昭和基地で最大 80 nT 程度、レイルボグルで 100 nT 程度の変化である。しかし、南北で 1300 頃-1530 頃に見られる負の変動、ま

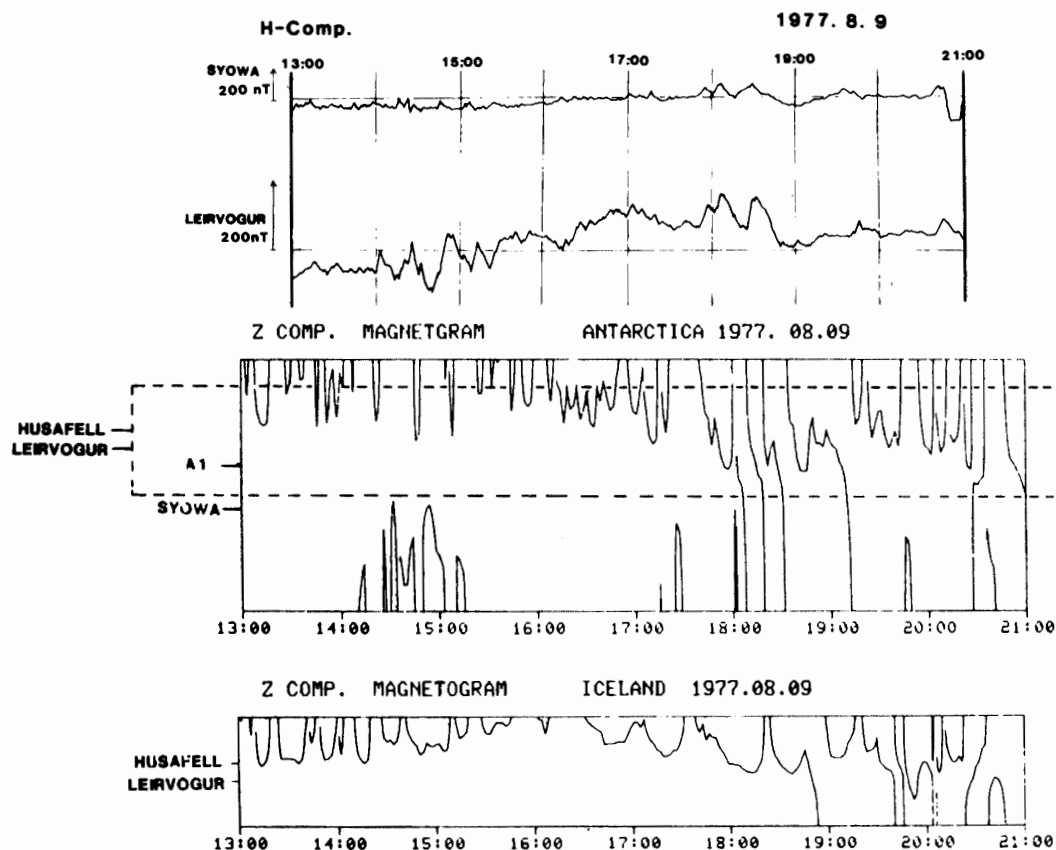


図 20 昼過ぎから遅い夕方側までの時間帯 (1300-2100 UT \approx MLT) に南北で観測された地磁気変化の現象例。下のパネルは南北の地磁気 Z 成分の $\Delta Z=0$ の点の軌跡で、破線で示す時間空間領域で南北の共役性が良いように見える。

Fig. 20. Same as Fig. 18 and Fig. 19 for the data observed during 1300-2100 UT (from post noon to late evening) on August 9, 1977. In the figure, the dotted rectangular area seems to indicate a good conjugacy.

た、北半球側に比べて南半球側では必ずしも明確であるとは言えないが、1700頃-1900頃頃までに見られる正の変動は、それぞれ西向きおよび東向きの電離層電流が流れていることを推察させる。電離層電流が弱い傾向にあるイベントではあるが、南北の $\Delta Z=0$ の点の軌跡を図 20 の下段に示した。南北両者の $\Delta Z=0$ の点の軌跡を比べると、1800以降あるいは1900以降の南北の類似性にやや複雑さが伴うが、全般的には1300-2100の期間、破線で図示するような空間で南北の変化が類似している。このイベントでは、A1 無人観測点とレイルボグル基地が良い共役性にあったように見てとれる。

4.3. イベント-3 (August 4, 1977)

1977年8月4日の1600-2300にかけて、地磁気 H 成分の観測例を図 21 に示した。このイベント解析では、夕方側 (dusk side) から真夜中側までに見られた現象の南北共役性を調べている。この例では、南北ともに正方向への湾型変動で、観測点付近の頭上に東向きの電離

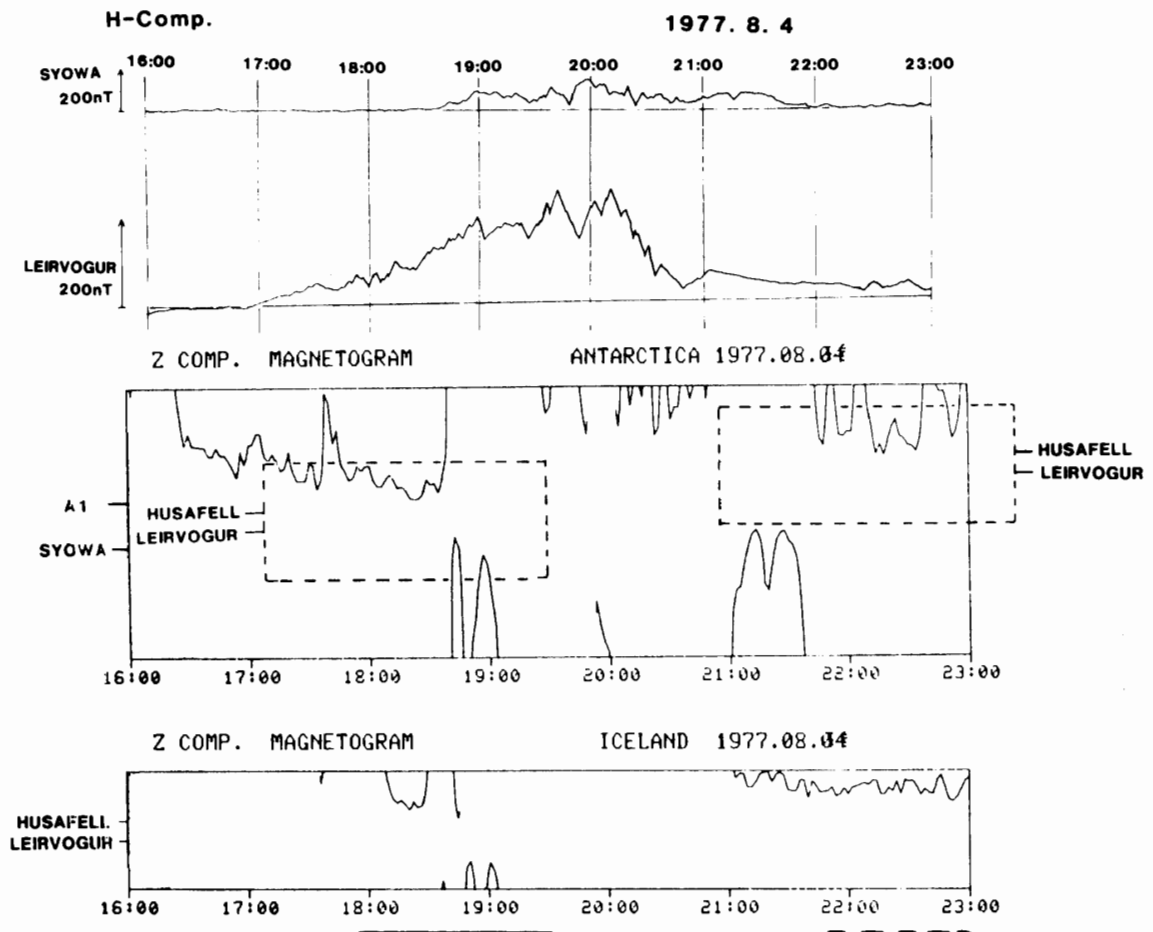


図 21 夕方側から真夜中直前までの時間帯 (1600-2300 UT \approx MLT) に南北で観測された地磁気変化の現象例。他は図 20 と同じ。

Fig. 21. Same as Fig. 20 for the data observed during 1600-2300 UT (from evening to late evening) on August 4, 1977.

層電流が流れていることが推察できる。昭和基地側では 1840 過ぎ頃から正の方向への変動が観測されているのに対し、レイルボグル基地ではそれより約 1 時間 30 分前の 1700 頃から正変動が見られる。しかし、全体的な変動の様相は、南北で同じように見える。地磁気の変動値は、北半球の方が南半球よりもはるかに大きいかのように見えるが、南北で記録紙上の感度が異なることに注意が必要である。例えば、1940 頃の昭和基地では静穏時レベルから約 120 nT の変動をしているのに対して、レイルボグル基地では約 230 nT の変動で、約 2 倍の違いである。

図 21 の下段で南北両者の $\Delta Z=0$ の点の軌跡を比べると、18 時過ぎ頃から 19 時過ぎ頃までと、22 時過ぎ頃から 23 時までが類似して変化している。これらの時間帯以外の $\Delta Z=0$ の点の軌跡では、アイスランド側に軌跡が見られないことから南北の類似を見つけることが困難である。このイベントでは、1800-1910 頃までのレイルボグル基地の共役点は昭和基地の高緯度側に位置し、また、2050 頃-2300 頃の間ではレイルボグル基地の共役点の位置が更に高緯度側へシフトして、A1 無人観測点付近と良い共役性をもつと思われる。

4.4. イベント-4 (August 4-5, 1977)

1977 年 8 月 4 日から 5 日にかけて、観測された地磁気 H 成分の変動の様相を図 22 に示した。南北ともに 5 日の 0025 頃に極めて急激に鋭い負の湾型変動が発生している。このイベントでは、最初に昭和基地で約 240 nT、レイルボグル基地で約 180 nT の初期変動が起き、その後、負の変動が継続して 0155 頃に南北の観測点とも変動が最大 (昭和基地: 約 570 nT、レイルボグル基地: 約 700 nT) に達していることから、南北とも観測点の頭上近くに強い西向きのオーロラジェット電流が流れているものと推察される (因みに昭和基地のオーロラ光学観測は天候が悪く欠測であった)。このイベント例は、夜側から真夜中付近を経て朝方側の早い時間帯までの現象を調べた解析例である。図 22 の下段に示したように南北両者の $\Delta Z=0$ の点の軌跡を比べると、アイスランド側の $\Delta Z=0$ の点の軌跡が 0150 頃以降に領域から外れていることから、このイベント例ではこの部分の南北の比較解析はできない。ここでの解析では、図 22 の破線内の領域で南北の変動が類似しており、この範囲が良い共役関係にあったと推測できる。すなわち、このイベントでは 2200-0200 過ぎ頃までレイルボグル基地と A1 無人観測点の現象が良い共役性にあり、レイルボグル基地の共役点が A1 無人観測点付近にあったものと解釈される。

4.5. まとめ

南北共役性の地方時依存特性について、南北の $\Delta Z=0$ の点の軌跡の類似性を捜すという手法によって調べた。ここで示した 4 例は、① 真夜中前から暁側 (dawn side) を経て朝方側の早い時間帯までの現象 (2300-0900 UT \approx MLT) ② 昼間過ぎから夕暮れ時 (dusk side) を

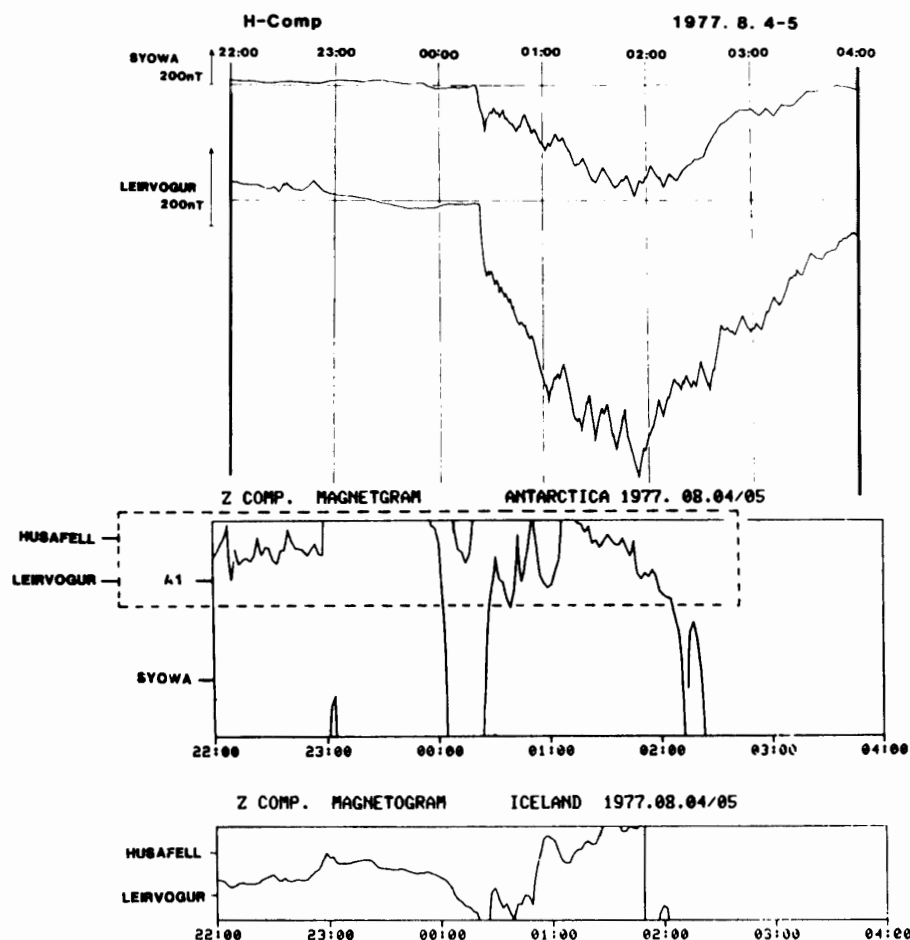


図 22 夜側から真夜中を経て早い朝方側までの時間帯 (2200-0400 UT ≡ MLT) に南北で観測された地磁気変化の現象例. 他は図 20 と同じ.

Fig. 22. Same as Fig. 20 for the data observed during 2200-0400 UT (from late evening to early morning) on August 4-5, 1977.

経て夕方側の遅い時間帯までの現象 (1300-2100 UT) ③ 夕方側 (dusk side) から真夜中側までに見られた現象 (1600-2300 UT) ④ 夜側から真夜中付近を経て朝方側の早い時間帯までの現象 (2200-0400 UT) についての解析結果である.

オーロラ帯付近の地磁気変動の様相は、夜側の変動に比べて昼間側では比較的变化に乏しい。このことから、昼間側の現象は夜側の現象に比べて計算機処理が困難で、その解析数は夜間側の半数以下であった。図 23 は、1977 年 5 月末から 8 月 23 日までの 85 日間の地磁気変動データを解析対象にして、南北の $\Delta Z=0$ の点の軌跡の類似性から求めた南北共役性の地方時依存特性である。解析対象としたデータのうち、昭和基地の地磁気 Kp 指数が 2 以下であるような地磁気静穏時のデータについては、地磁気の変動量が小さいことから除外した。解析したデータ数は、図 23 の中央部に地方時別に示した。真夜中を挟む夜側の解析数が最も多く、これに対して昼間側の解析データ数は、夜側の半数以下であることがわかる。

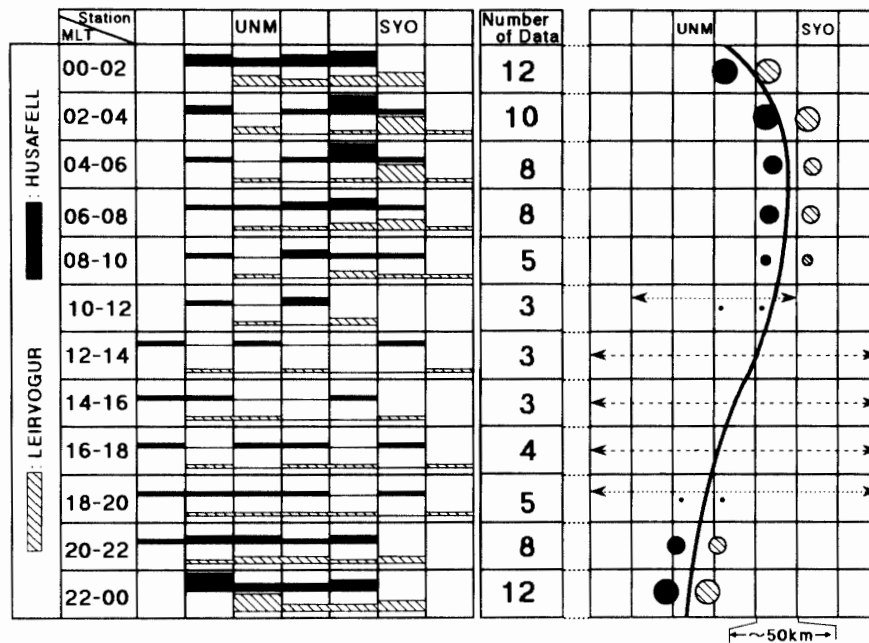


図 23 地磁気 Z 成分の $\Delta Z=0$ の点の軌跡の図形解析から求めた南北共役性の地方時依存特性. 図中に示したマークは、昭和基地周辺の場所とレイルボグル基地 (斜線, ⊗) およびフッサフェル基地 (■, ●) との共役性が良かったところを表す. マークの幅の大小は、解析データ総数に対する相対的な割合を表現している.

Fig. 23. Magnetic local time dependence of the North-South conjugate point of geomagnetic disturbance. A mark in the figure shows a good conjugacy between of Northern and Southern Hemisphere; 斜線 and ⊗ marks are Leirvogur, ■ and ● marks are Husafell.

図 23 の左側のパネルは、縦軸の数字が地磁気地方時 (MLT) を示し、横軸が観測点の間隔を表している. UNM は A1 無人観測点, SYO は昭和基地の位置を示している. また、図中の黒塗りマークおよび斜線で示したマークは、図形解析から求めたフッサフェル基地およびレイルボグル基地の共役性が良かった場所を示し、解析データ総数のうち共役性の良かった位置の相対的な割合をマークの太さ幅で表現している. 例えば、地方時 (MLT) の 00-02 h では、解析したデータ総数は 12 イベントであるが、このうちレイルボグル基地と共役性が良かった南極側の場所は、A1 無人観測点付近が 3 イベントあり、そのすぐ低緯度側の領域が 2 イベントある. また、昭和基地付近と 4 イベントが、そのすぐ高緯度側の領域と 3 イベントが共役性が良かったことを示している. 従って、この時間帯では共役性が良い場所は、無人観測点付近から昭和基地付近までの間にほぼ一様に存在しているかのように思える. しかし、平均的な位置を求めると、図 23 の右側パネルの斜線で示した丸印位置付近がレイルボグル基地の共役性が良くなる場所であるように見える. フッサフェル基地と共役性が良かった場所はこれらを高緯度側へ約 50 km ずつ平行移動した位置にあり黒丸印で示した. 一方、昼間側の 12-14 h MLT の範囲では解析できたデータの総数は 3 イベントと僅かである. しかも、共

役性が良かった場所は A1 無人観測点をはさんで高緯度側から低緯度側へ広範囲に分散しており、昼間側で共役性の良い場所を観測事実から特定することは困難である。

このように平均的な南北共役点の位置を地方時別に集約化したのが図 23 の右側パネルである。ここでは、南極側の地域を約 50 km 間隔のグリッドで区分けして、アイスランド側フッサフェルの共役点を黒丸印、レイルボグルの共役点を斜線の丸印でプロットしている。北半球の共役点は、真夜中の直前付近の時間帯 (22-00 h MLT) に南極側で最も高緯度側に存在し、真夜中 (midnight: 00 h) 過ぎから暁側 (dawn side: 06 h) へ向けて徐々に低緯度側へシフトしていく傾向が見られる。暁側を過ぎた朝方側から昼間側 (dayside: 12 h) へかけては、北半球の共役点は逆に高緯度側へ移動しているかのように見える。この高緯度側へのシフト傾向は、さらに夕方側 (dusk side: 18 h) 過ぎの時間帯まで継続されているかのようにも見えるが、ここでは昼間側の解析データ数が少ないことから不確かな点も多く破線で示してある。これらのことを総合的にまとめると、南北共役性の地方時依存特性は全体的には太線で示すような日変化特性であろうと考えられる。

図 24 には、TSYGANENKO-USMANOV モデル (1982) から計算されるフッサフェル基地 (A) とレイルボグル基地 (B) の共役点の日変化を示した。フッサフェル基地の共役点の日変化パターンが昭和基地のやや東方の高緯度側 (大陸側) に見られているのに対して、レイルボグル基地では、昭和基地の地磁気子午線面をほぼ中心として低緯度側 (海側) に日変化パターンが見られる。この Tsyganenko-Usmanov モデルによる共役性の日変化パターンによれば、16時から20時頃までの間では経度方向の移動が目立ち緯度方向への移動成分は少ない。しかし、良く見ると徐々に高緯度側へ移動している傾向が認められる。共役点の高緯度側への移動は20時から22時の間に顕著に見られる。そして、00時ないし02時過ぎからは、低緯度方向への移動を始める日変化パターンが見られる。

図 25 は、モデルから求めたレイルボグル基地の日変化パターンと、ここで解析した結果 (図 23) を地磁気子午線面に沿って、同一画面上に斜線の丸印を用いプロットした比較図である。斜線丸印の大きさは、丸印が大きいほど解析したデータの数が多ことを示している。レイルボグル基地の共役点は、22-00 h MLT の時間帯で最も高緯度側に位置し、その場所は A1 無人観測点付近にあたることを示されている。その後、共役点は時間経過 (00-02 h, 02-04 h, 04-06 h MLT) とともに徐々に低緯度側へ移行している。08 h 以後 20 h MLT 頃までは解析データの数が少なく共役性の良い場所を観測結果から表示することは困難である。20-22 h MLT の時間帯では無人観測点のすぐ低緯度側あたりの領域に共役性の良い場所が移行している。斜線の丸印で示される共役点は、解析データに経度方向の情報が入っていないことから経度的な変化が不明であるが、南北共役性の緯度的な地方時依存特性を示している。この南北共役性の地方時依存特性は、モデルから計算された共役性の日変化パターンと同一傾向であることがわかる。モデルと解析結果が示す共役点の位置関係の緯度的な違いについて

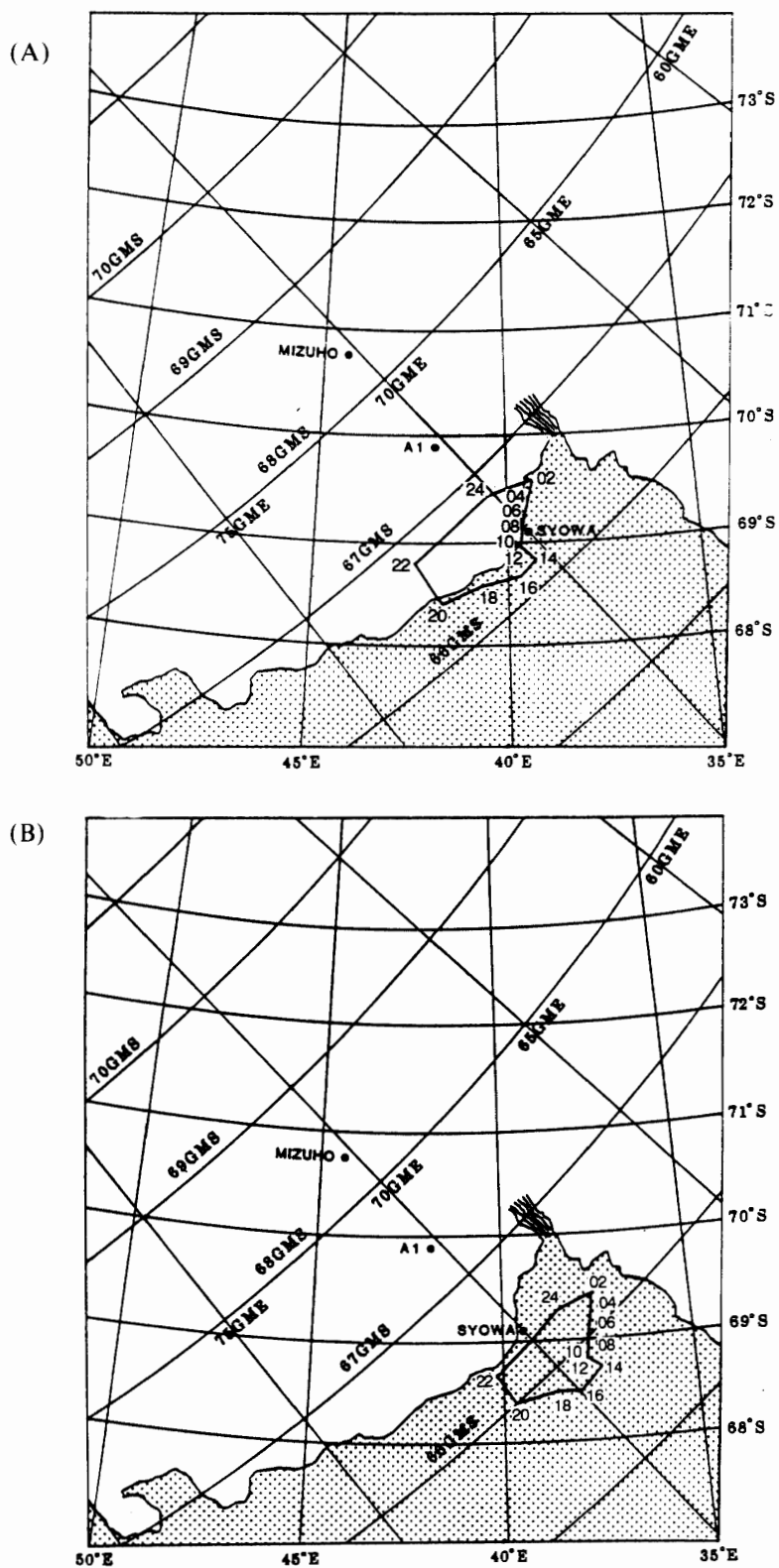


図 24 Tsyganenko and Usmanov モデルから求めた共役点の日変化パターン (冬至期). A パネルがフッサフェル, B パネルがレイルボグルの日変化特性を示す.
 Fig. 24. Daily variation in the conjugate point location of Husafell (A-panel) and Leirvogur (B-panel) Stations, calculated by using Tsyganenko and Usmanov's model.

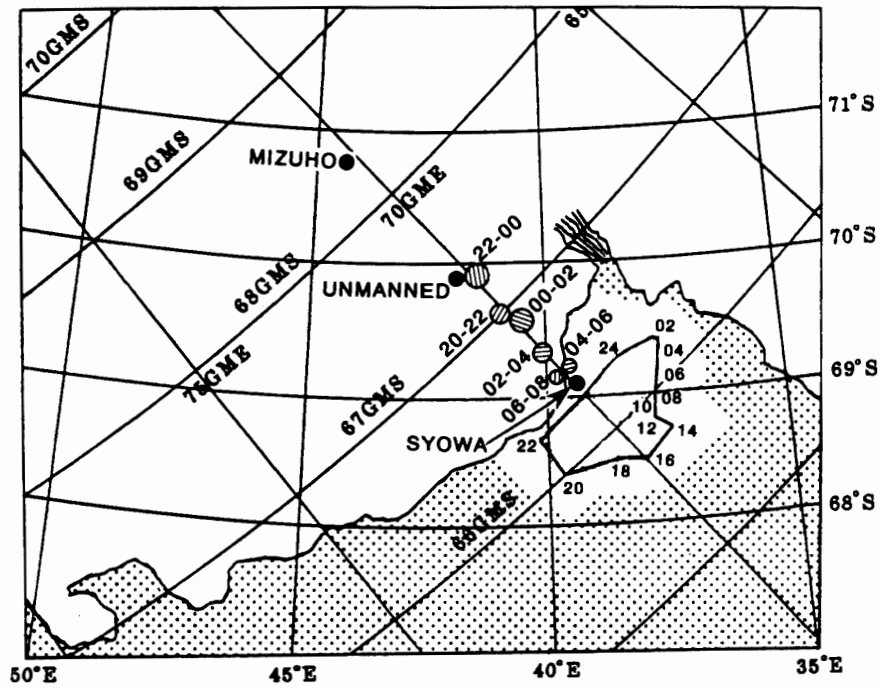


図 25 解析から求めたレイルボグルの地方時依存特性とモデルの日変化特性の比較図
 Fig. 25. Magnetic local time dependence of the conjugate point of Leirvogur, with the hatched circles indicating the conjugate point calculated by using Tsyganenko and Usmanov's model.

ては次の 5 章で検討する。

5. 解析結果のまとめと考察

(I) オーロラ活動と地磁気変動

地磁気変動の多点観測データと昭和基地で観測したオーロラ光学観測データを用いて、オーロラの発光位置と地上で観測する地磁気三成分変動との関係を調べ、両者が良い対応関係を示すことを確かめた。特に、各観測点で記録される地磁気 H 成分の鋭いパルス状の変化や Z 成分の $\Delta Z=0$ の点または負 (正) から正 (負) への変動の転化現象が、ほぼオーロラの発光領域と一致することを確認した。オーロラの爆発的な活動 (auroral substorm) 現象が見られる時、地上多点観測より見た地磁気の変動が電離層電流の中心位置をかなり忠実に反映するという観測事実は、オーロラジェット電流が電離層の中を比較的狭い領域に集中して流れていることを示唆している。昭和基地を中心とした地磁気多点観測データの解析により次のことが明らかになった。

- ① 地磁気子午線上に沿う観測点において観測される地磁気 H 成分の変動の全体的な様相は、およそ 300 km の領域内で似かよった変化をする。
- ② しかし、 H 成分の変動の中に見られるパルスの鋭い変化は各観測点で必ずしも時間的な一致を見ず、同様に Z 成分の変動の

正負の符号の反転する時刻も必ずしも一致しない。③ ② 項の地磁気変化が観測される点は、オーロラの発光している領域と良い関係があり、特に、 H 成分の鋭い負の変動時のオーロラ発光領域に、西向きに電離層電流が流れていることがほぼ確実である。④ このことは、地上で 120 km 程度しか離していない観測点での地磁気変動データよりオーロラの最も輝度の強い活動的な領域が推定でき、オーロラジェット電流が意外に狭い領域を集中的に流れる線電流であることを示唆する。

ところで、この解析では電離層中を電流が西あるいは東向きに水平に流れているという仮定の下に、地上の地磁気多点観測データの H および Z 成分を解析してオーロラの発光領域との関係を調べた。しかし、オーロラの発光する領域は、実際には、磁力線に沿って降下してくるオーロラ粒子による沿磁力線電流 (field aligned current) の効果を反映する。したがって、地磁気 H 成分の変動値と Z 成分のゼロの点の軌跡とから、平面的な水平電流を仮定することのみによって電離層電流領域の推定およびオーロラの発光領域を同定する手法には、解析上の不十分さが存在する。沿磁力線電流の効果が、もしも、地上の地磁気三成分の変動に現れるとすると、 D 成分 (東西方向の変化) の変動に関与する可能性も考えられるが、観測される変動値とどのような関係にあるのかははっきりしない。

磁気圏と電離層を結ぶ沿磁力線電流は、電離層を水平に流れる電流と三次元電流回路を形成し、ビルケランド型三次元モデル電流として知られる電離層中の東西方向の電流 (ホール電流) に結びつくものと、BOSTROM (1964) の提唱した二重シート電流型三次元電流とに結びつくものが考えられる。二重シート電流型三次元電流モデルによれば、沿磁力線電流は、電離層の中でホール電流 (東西方向の電流成分) とこれと直角方向の南北方向に流れる電流成分 (ペーダソン電流) とに別れるが、オーロラ粒子の降り込み領域の電離層では、東西方向の電気伝導度が南北方向のそれよりも良いことからホール電流の方がペーダソン電流よりも大きいことが考えられる。したがって、オーロラ粒子の降り込み領域の電離層中では東西方向のホール電流が卓越し、これがオーロラジェット電流として地上の地磁気 H および Z 成分の変動量として観測されると理解できる。本論で示した解析結果は、 H 成分の変化が最大値を示す観測点の位置と Z 成分のゼロの点の軌跡がほぼ一致し、この位置がオーロラの強く輝いている領域とも良く合っている。つまり地上で観測される地磁気 H および Z 成分変動の大部分が、電離層中の狭い領域を流れているオーロラジェット電流によって担われていることを示唆している。ここから地上で観測される D 成分の変動量に対する沿磁力線電流の効果は、副次的な関与と考えてよいのではないだろうか。

極域のオーロラ現象を介在として電離圏と磁気圏の構造とその結合過程の解明、言い換えれば、極磁気サブストームや磁気嵐などの発生するメカニズムを理解していくうえには、磁力線に沿って流れる電流と電離層中を流れる電流の振る舞いを三次元的に調べることが重要である。人工衛星やレーダーなどの高度なりモートセンシング観測データと、オーロラ現象

を含む地上多点観測データを相補的に用いて、地上にあらわれた地磁気変動の結果に詳細な解釈を与えることが大切であろうと考える。

(II) サブストーム時の南北共役性

地上の、少なくとも 120 km 程度離れた観測点の地磁気データの比較が、電離層電流が集中的に流れている位置を見極めるのに有効であるとの (I) の結果を利用して、極磁気サブストーム時における南北の共役性を調べた。極磁気サブストーム時の発達期 (E-1^h Phase) の南北対応性は、相関係数 (r) が 0.5 前後でありあまり良いとは言えない。これに対して、爆発期 (Expansion Phase) では $r \sim 0.8$ で良い対応性が見られた。回復期 (Recovery Phase) ではやや小さい値の $r \sim 0.77$ であった。また、南極の観測点別に見たレイルボグル基地 (北半球・夏季) との相互相関では、A1 無人観測点で最も相関が良く、次が昭和基地で、高緯度側のみずほ基地がこの中では最も低かった。

ところで、表 3 は TSYGANENKO モデル (1987) を用いて、地磁気の擾乱度でレイルボグル基地の共役点がどのように変化するかを調べたものである。北半球 (夏) の共役点が、地磁気擾乱が大きくなるに伴って見かけ上高緯度側へ移る傾向が示されている。さて、図 17 の模式図で示される爆発期や回復期におけるレイルボグル基地と南極との共役性の解析結果は、もしも、地磁気が静穏状態である時にレイルボグル基地の共役点が昭和基地の低緯度側にあると仮定できれば、モデル計算による地磁気の擾乱に伴う共役点の高緯度側への移動と同センスであると解釈できる。すなわち、静穏状態で昭和基地の低緯度側にあったレイルボグル基地の共役点が、サブストームの発生に伴って高緯度側へ移り、昭和基地あるいは A1 無人観測点との対応が良くなったものと解釈することができ、この時、更に高緯度側に位置する

表 3 TSYGANENKO model (1987) に基づく地磁気擾乱度とレイルボグルの共役点位置の変化
Table 3. The conjugate point of Leirvogur Station for geomagnetic activity conditions of $Kp=0$, $Kp=3$ and $Kp=6$ in summer and winter solstice seasons in 1975 and 1995.

Date	Kp-index	Geographic coordinate		Remarks
		Latitude	Longitude	
June 20, 1975	0	-69°21'	38°10'	Conjugate point of Leirvogur toward highlatitude direction shift with magnetic disturbance
	3	-69°53'	38°59'	
	6	-70°06'	39°54'	
June 20, 1995	0	-69°22'	33°34'	ditto
	3	-69°48'	34°30'	
	6	-70°11'	35°20'	
December 20, 1975	0	-68°52'	36°43'	Conjugate point of Leirvogur toward lowlatitude direction shift with magnetic disturbance
	3	-68°51'	35°39'	
	6	-68°35'	35°28'	
December 20, 1995	0	-68°58'	32°01'	ditto
	3	-68°58'	31°04'	
	6	-68°54'	30°15'	

みずほ基地の相互相関が2点のそれよりも低い傾向にある解析結果はこの解釈を支持している。地磁気静穏時のレイルボグル基地の共役点が昭和基地の低緯度側にあるとの仮定について、観測データからその位置関係を検証することは、① 発達期の現象の共役性が相互相関を求める解析手法では $r=0.5$ 以下で信頼性に乏しいこと ② 昭和基地よりも低緯度側に観測点が無いこと等の理由で困難である。ここでは仮定に関する妥当性を IGRF モデルによりチェックする。IGRF モデル (1975) から計算される地磁気座標は、昭和基地の緯度経度が $-66.40^\circ, 70.17^\circ$ である。これに対してレイルボグル基地のそれは $65.64^\circ, 69.05^\circ$ であり、レイルボグル基地の共役点が昭和基地の低緯度側にあることを示している。すなわち、サブストーム発生時にレイルボグル基地 (北半球・夏季) との相関性が良くなる領域が A1 無人観測点や昭和基地付近であり、さらに、高緯度側のみずほ基地の共役性がこれらの地域より悪いとのここでの解析結果は、地磁気擾乱の高まりに伴って北半球 (夏季) の共役点が高緯度側にシフトする表3の結果と矛盾しない。

国立極地研究所の共役点観測の研究プロジェクトは、IMS 計画を契機に 1977 年に初期観測が行われ (佐藤ら, 1979), 1983 年から「オーロラ現象の共役点観測 (3 カ年計画)」として本格化した (佐藤ら, 1984)。佐藤らがオーロラ光学観測データを基にして推進した南北共役性の研究は、SATO *et al.* (1986, 1987) や FUJII *et al.* (1987) あるいは MAKITA *et al.* (1981) などに見られる。これらの報告の要点は、オーロラ活動の南北共役性は、① 地磁気活動の弱い静穏時に見られるアーク状やバンド状のオーロラの南北共役性は極めて良い対応を示す、② 特に、オーロラの爆発的活動の開始 (on-set time of auroral breakup) は南北とも同時性が強い、③ しかし、オーロラ嵐などの爆発過程においてはオーロラ活動の振る舞いが複雑化し南北で一对一の対応がつかなくなる場合が多い、④ それゆえ、形態の微細構造・運動形態・運動速度・輝度 などについての詳細な南北の対応性に関しては未だ必ずしも明確にされていない、というものである。筆者等の地磁気データを用いた南北共役性の解析結果では発達期 (地磁気静穏状態) に関して吟味ができなかったが、佐藤らのオーロラデータを用いた南北の共役性に関する報告で補完できる可能性がある。また、爆発期あるいは回復期における共役性については、地磁気データから見た南北共役性とオーロラデータから見た南北共役性の研究が相補的に利用できると思われるが、筆者等のここでの解析手法では、オーロラの微細構造の共役性、特に、オーロラの輝度やオーロラ光の内部構造とその運動などの共役性に関して直接的な比較は困難である。

(III) 南北共役性の地磁気地方時 (MLT) 依存特性

南北の $\Delta Z=0$ の点の軌跡の類似性を調べる解析の手法によって、共役点の MLT 依存性を調べた。オーロラ帯付近の地磁気変動の様相は、夜側の変動に比べて昼間側では比較的变化に乏しい。したがって、ここでまとめた南北共役点の地方時依存特性は、昼間側のデータ解

析数に比べ夜間側の時間帯の解析数が圧倒的に多い解析結果である。解析した結果は、① 真夜中の直前付近の時間帯 (22-00 h MLT) に北半球の共役点が南極側では最も高緯度側に存在し、真夜中 (midnight: 00 h) 過ぎから暁側 (dawn side: 06 h) へ向けて徐々に低緯度側へ移行する、② 暁側を過ぎた朝方側から昼間側 (dayside: 12 h) へかけては北半球の共役点は逆に高緯度側へ移行している、③ この高緯度側への移行傾向は、さらに夕方 (dusk side: 18 h) 過ぎの時間帯まで継続されているように思えるが昼間側の解析データ数が少ないことから不明確である、とまとめられる。

TSYGANENKO-USMANOV モデル (1982) から求めた北半球の共役点の日変化パターンは、真夜中付近で高緯度側にあり、暁側から昼間側にかけて低緯度側に移行し、さらに、夕方側から夜側へかけて高緯度側へ移行する地方時依存特性を示す。この特性は、今回の解析から求めた共役点の地方時依存性と傾向が一致している。モデルとデータ解析とが示す南北共役性の日変化の位置関係を比較すると、解析結果から求めた共役点の方が高緯度側に偏向している。この偏向の原因には、いくつかの要因が考えられようが、地球磁気圏の南北非対称性の影響を示唆していると思える。

南北非対称性には、例えば、太陽風による地球磁気圏の形成がもともと対称的に形成されないこと、あるいは、ブラジリアン磁気異常帯中にある昭和基地側の地球磁場強度がアイスランド側に比べて弱い (昭和基地の全磁力: 44365 nT, レイルボグルの全磁力: 52118 nT (ONO, 1987)) ことや、ここで用いたデータの観測期間における南北の日照時間の差などがある。このことは、南北の電離層電気伝導度に違いをもたらすことになり、オーロラジェット電流を反映する地上の地磁気データから求めた結果が、モデルとの緯度的な偏向を生み出す要因の一つとして考えられる。なお、ここでの解析では経度方向の情報が入っていないことから、経度的な変化の地方時特性が不明である。南北共役性の研究を発展的に推進させるためには、緯度的にも経度的にも南北双方で同様な多点観測網を組むことが大切である。南極側に行動的・人力的ほか種々の制約があることから無人観測の開発が望まれる所以である。

ところで、ONO (1987) のモデル計算によれば、昭和基地とアイスランドの共役点は年々移動し、1990年には昭和基地の共役点はアイスランド中央部の北の沿岸付近に到達することが示されている。ONOは、同時に共役点の季節変化および日変化特性を示し、共役点の変動が冬至 (夏至) で最大、秋分 (春分) の真夜中で最低になることを報告している。ここでの解析は、5月末から8月中旬までのデータを対象としたので、共役点の日変化が1年のうちで最も大きい期間のデータを解析したことになる。ONOが示す共役点の日変化特性 (南半球の共役点の移動を北半球側に置いた) と、ここで解析した南北共役性の地方時依存特性は同様である。ONOの指摘は、1983年から国立極地研究所が中心となって本格的な観測を開始した昭和基地-アイスランド共役観測の観測データを、定量的な視点からモデルと比較して調べることの必要性を教示している。アイスランド側で地磁気要素の絶対観測を長期的に継続でき

ば、昭和基地で定常的に測定される絶対値データと一対で、地球内部で形成される磁場の変移過程が観測事実として確かめられる可能性がありモデルとの比較は興味深い。

6. おわりに

太陽-地球空間の電磁気現象の内、地球周辺での太陽エネルギー消費過程として知られる極域のオーロラ現象に代表される地球周辺の電磁気環境は、衛星観測によるデータが広範囲かつ効率的に興味有る事実を次々と与えつつある。一方で、広大な面積に比べ圧倒的に観測点の少ない南極地域における観測活動では、行動的、人員的ほか設営的な諸条件の制約から多点観測の実現とその継続的な観測が容易ではない。めざましい技術革新の下、新しい情報が多量に提供される時代であればこそ、地上から自然現象を自らの視覚で確認しておくことは大切なことであろう。

衛星観測やレーダー等のリモートセンシング観測によるグローバルな視点と、地上からのきめ細かな視点の観測とを組み合わせることで自然現象を理解していくことが重要で、フィールドサイエンスとして、あるいは、モニタリングサイトとしての市民権を確立しつつある南極観測では、長期的展望に立脚して地上観測を着実に継続させることが大切であると思われる。特に、観測点の少ない南極域では地上に多点観測網を張り巡らすことが望まれる。可能であれば、設備・施設の充実めざましい昭和基地の観測を基軸として、みずほ基地・ドームふじ観測拠点・あすか観測拠点での無人観測によるデータ取得、およびこれらの観測拠点の中間点などに無人観測施設を配備しての観測態勢がのぞましい。その上に、南北共役性観測、南極点基地付近の地磁気多点観測や南極点基地におけるオーロラの全天イメージング観測と、昭和基地における HF レーダーの観測 (南向き 1号装置)、中山基地における超高層観測と HF レーダーの観測 (東向き 2号装置)、昭和基地における DMSP 衛星観測、昭和基地地上モニタリング観測などの研究プロジェクトが、有機的に結合できる研究の環境整備が必要であろう。発展の途にある中山基地の超高層観測は、ニーオルスンと共役関係にあることもあり、ニーオルスンにおける超高層地上観測、スバル諸島領域における非干渉散乱レーダー観測との協同観測と研究が重要であろう。さらには、グリーンランドにおけるオーロラ光学観測、カナダ北極圏の超高層多点観測などが呼応すれば経度的な情報をも入手することができる。

謝 辞

南極観測の超高層多点観測計画は、IMS 計画の一環の位置付けの下に故永田 武 元国立極地研究所長が研究代表者として企画立案し、平澤威男現国立極地研究所長の指導のもとに実行計画が練られた。本計画の具体的実践に当たっては、永田・平澤両先生とともに第 18 次南極地域観測隊・夏隊長であった国分 征現名古屋大学 STE 研究所長に惜しめないご教示と叱咤

激励をいただきました。ここに心からの謝意を表します。南極での観測活動を担ったのは、第17次隊、第18次隊 および 第19次隊の各隊長を始めとする多数の関係隊員諸氏でありました。ここに厚くお礼を申し上げます。特に、福西 浩博士、外谷 健氏、西野正徳博士、山岸久雄博士および石沢賢二氏の各位は、南極観測隊超高層部門担当隊員として本計画の遂行に南極地域において直接的且つ献身的にご尽力なされました。また、岩上直幹博士は、昭和基地におけるオーロラ光学観測をはじめとした超高層物理現象の観測を担当されました。各位に心から感謝の意を表します。データ解析に当たっては、1980年代に国立極地研究所に在籍されていた藤井良一博士に有意義な議論と多数のご教示を頂戴しました。また、南北共役性の研究観測プロジェクトを研究代表者として推進させている佐藤夏雄博士には、本報文のまとめ作業に貴重なご教示をいただきました。江尻全機博士他の国立極地研究所超高層研究グループの皆様にも、多数の貴重なご意見をお寄せいただくと同時に、本報文をまとめる機会を与えていただきました。データ解析には国立極地研究所情報処理センター（現在の情報科学センター）の計算機システムを利用させていただきました。北半球の地磁気データはWDC-C2 for Geomagnetism（京都大学理学部地磁気資料解析センター）を利用させていただきました。さらに、Tsyganenkoのモデルによる南北共役点の計算には総合科学研究大学院極域科学専攻科に在籍されている藤田裕一氏にお世話になりました。柴崎和夫博士には草稿を読んでいただきご親切な教示を頂戴いたしました。2名の匿名のレフリーからは重要な指摘を頂戴いたしました。これら多数の方々及各機関に心からなるお礼を申し上げます。

文 献

- AKASOFU, S-I. (1968): Polar and Magnetospheric Substorms. Dordrecht, D. Reidel, 280 p.
- 上田 豊 (1971): 東南極みずほ高原付近の気象状態について. 南極資料, **41**, 42-61.
- 鮎川 勝・平澤威男・国分 征 (1976): 南極における無人観測施設の設置計画. IMS シンポジウム 1976年, 東京大学宇宙航空研究所, 124-129.
- 鮎川 勝・寺井 啓・勝田 豊・吉田治郎・外谷 健・坂本純一 (1979): 南極における無人観測 (I) 無人観測装置の開発と観測結果の速報. 南極資料, **66**, 1-24.
- AYUKAWA, M. and MAKITA, K. (1984): The relationship between auroral electrojet and visual aurora. Proc. Conf. Achievements of the IMS, Graz, Austria, 379-382.
- AYUKAWA, M., HIRASAWA, T. and MAKITA, K. (1986): On the Japanese Unmanned Automatic Observatory in Antarctica and some results obtained at the observatory. J. Geomagn. Geoelectr., **38**, 201-220.
- BOSTROM, R. (1964): A model of the auroral electrojets. J. Geophys. Res., **69**, 4983-4999.
- 福西 浩 (1973): みずほ観測拠点における地磁気脈動観測報告. 南極資料, **47**, 39-45.
- FUJII, R., SATO, N., ONO, T., FUKUNISHI, H., HIRASAWA, T., KOKUBUN, S., ARAKI, T. and SAEMUNDSSON, TH. (1987): Conjugacy of rapid motions and small-scale deformations of discrete auroras by all-sky TV observations. Mem. Natl Inst. Polar Res., Spec. Issue, **48**, 72-80.
- IJIMA, T. and NAGATA, T. (1972): Signatures for substorm development of the growth phase and expansion phase. Planet. Space Sci., **20**, 1095-1112.
- KISABETH, J.L. and ROSTOKER, G. (1974): The expansive phase of magnetospheric substorms 1. Development of the auroral electrojets and auroral arc configuration during a substorm. J. Geophys. Res., **79**, 972-984.

- 桑島正幸 (1976): 南極昭和基地-内陸, 地磁気二点同時観測結果. IMS シンポジウム 1976 年, 東京大学宇宙航空研究所, 135-141.
- KUWASHIMA, M. (1976): Some characteristics of sub-storm-associated geomagnetic phenomena in the south polar region (I). *Mem. Kakioka Mag. Obs.*, **16**, 95-110.
- KUWASHIMA, M. (1978): Wave characteristics of magnetic Pi2 pulsations in the auroral region—Spectral and polarization studies. *Mem. Natl Inst. Polar Res., Ser A*, **15**, 1-79.
- 国立極地研究所編 (1976-1978): 日本南極地域観測隊第 18 次隊報告. 東京, 95-101.
- 国立極地研究所編 (1977-1979): 日本南極地域観測隊第 19 次隊報告. 東京, 117-123.
- 国立極地研究所編 (1987-1989): 日本南極地域観測隊第 29 次隊報告. 東京, 151-153.
- 国立極地研究所編 (1992-1994): 日本南極地域観測隊第 34 次隊報告. 東京, 178-179.
- MAKITA, K., HIRASAWA, T. and FUJII, R. (1981): Visual auroras observed at the Syowa Station—Iceland conjugate pair. *Mem. Natl Inst. Polar Res., Spec. Issue*, **18**, 212-225.
- NAGATA, T. and KOKUBUN, S. (1962): An additional geomagnetic daily variation field (S-field) in the polar region on geomagnetically quiet day. *Rep. Ionos. Space Res. Jpn.*, **16**, 256-274.
- NAGATA, T., HIRASAWA, T., AYUKAWA, M. and FUKUNISHI, H. (1976): Multipoint ground observations around Syowa Station, Antarctica by means of Unmanned and Automatic Observatories. *Mem. Natl Inst. Polar Res., Spec. Issue*, **6**, 44-51.
- 南極地域観測統合推進本部編 (1968-1970): 日本南極地域観測隊第 10 次越冬隊報告. 66-69.
- 南極地域観測統合推進本部編 (1971-1973): 日本南極地域観測隊第 13 次隊報告. 95.
- 西尾文彦・楠 宏 (1975): みずほ高原の基盤・表面地形および積雪の体積について. *南極資料*, **54**, 42-48.
- ONO, T. (1987): Temporal variation of the geomagnetic conjugacy in Syowa-Iceland pair. *Mem. Natl Inst. Polar Res., Spec. Issue*, **48**, 46-57.
- SAKA, O., SATO, N. and UCHIDA, S. (1990): Development of unmanned magnetometer stations for use in Antarctica. *Antarct. Sci.*, **2**, 355-361.
- 佐々木浩 (1974): 東南極みずほ観測拠点における地上気象観測. *南極資料*, **50**, 21-28.
- SATO, N. and SAEMUNDSSON, TH. (1987): Conjugacy of electron auroras observed by all-sky cameras and scanning photometers. *Mem. Natl Inst. Polar Res., Spec. Issue*, **48**, 58-71.
- 佐藤夏雄・勝田 豊・鮎川 勝・福西 浩・平澤威男 (1979): 昭和基地—アイスランド地磁気共役点観測. *南極資料*, **64**, 146-158.
- 佐藤夏雄・福西 浩・国分 征・SAEMUNDSSON, TH. (1984): 1983 年アイスランドにおけるオーロラ現象の共役点観測報告. *南極資料*, **81**, 102-119.
- SATO, N., FUJII, R., ONO, T., FUKUNISHI, H., HIRASAWA, T., ARAKI, T., KOKUBUN, S., MAKITA, K. and SAEMUNDSSON, TH. (1986): Conjugacy of proton and electron auroras observed near $L=6.1$. *Geophys. Res. Lett.*, **13**, 1368-1371.
- TSYGANENKO, N.A. (1987): Global quantitative models of the geomagnetic field in the cislunar magnetosphere for different disturbance levels. *Planet. Space Sci.*, **35**, 1347-1358.
- TSYGANENKO, N.A. and USMANOV, A.V. (1982): Determination of the magnetospheric current system parameters and development of experimental geomagnetic field models based on data from IMP and HEOS satellites. *Planet. Space Sci.*, **30**, 985-998.
- 山田知充 (1974): 昭和基地沿岸からみずほ観測拠点に至る地域の気象状態について. *南極資料*, **50**, 1-20.

(1997 年 12 月 22 日受付; 1998 年 1 月 30 日改訂稿受理)