

共役点観測の将来計画

佐藤 夏雄*

Future Problems of Geomagnetic Conjugate Observations

Natsuo SATO*

Abstract: Observations of geophysical phenomena at geomagnetic conjugate-pair stations are important for studying the physical processes that occur in the magnetosphere and yield the relevant upper atmospheric phenomena. Significant and feasible conjugate experiments in the near future are, 1) Observations of several “standard” geophysical phenomena at the network of stations distributed widely in latitude and longitude around the conjugate area in both the northern and southern hemispheres, 2) Coordinated observations by using rockets, low-altitude polar-orbiting satellites, geostationary satellites and station nets on the ground, 3) Active experiments, *e. g.*, VLF wave injection into the magnetosphere from Mizuho Station in the auroral zone, and 4) Magnetic field line tracing by means of barium plasma injection.

要旨: 地磁気共役点観測は、地球の電離圏、磁気圏で起こっている超高層現象の、発生から伝搬までの一連の物理的過程を知る上で重要な観測手段である。この共役点観測を将来さらに有効に生かすには、1) 地上多点観測網の充実、2) 多点観測とロケット、衛星等による立体観測、3) 地上から VLF 波投入による active 実験、4) 人工雲による磁力線トレーシング、等を積極的に行う必要がある。

1. はじめに

地球周辺の宇宙空間で観測される地磁気変動、ELF・VLF 波動、オーロラ粒子等の超高層現象は、地球に磁場があるがゆえに生起されている。また、これらの現象の多くは、地球の磁力線に沿って伝搬する性質を持っている。したがって、磁力線に沿った共役点で観測することは現象の発生、伝搬特性を知る上で重要であり、IGY 以降いくつかの観測が実施されてきた。しかし、共役点観測を行う際最も難しい問題は、地理的条件である。オーロラ帯は高緯度に位置するため、北半球でも南半球でも観測点が少ない上、北極圏は

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

表 1a 地磁気共役点对の南半球側観測点

Table 1a. Conjugate-pair stations in the southern hemisphere.

No.	Station name	Geographic		Geomagnetic		Computed dip	L-value
		Lat.	Long.	Lat.	Long.		
S1	Vostok	-78.50	106.90	-89.18	87.99	-78.3	73.03
S2	Little America	-78.20	197.80	-74.05	312.00	-79.2	12.71
S3	Macquarie Island	-54.50	159.00	-61.07	243.15	-79.0	5.31
S4	Campbell Island	-52.60	169.20	-57.38	253.26	-75.8	4.03
S5	Scott Base	-77.90	166.80	-79.01	294.63	-82.2	32.60
S6	Byrd Station	-80.02	240.47	-70.58	336.07	-73.8	7.06
S7	South Pole	-89.98	00.00	-78.49	00.09	-74.1	12.72
S8	Eights	-75.23	282.83	-63.80	355.29	-66.4	3.88
S9	Syowa Station	-69.03	39.60	-69.68	77.64	-65.5	6.10
S10	Mirny	-66.55	93.00	-77.02	146.81	-76.5	19.79
S11	Kerguelen	-49.35	70.22	-57.33	127.97	-67.4	3.66

表 1b 地磁気共役点对の北半球側観測点

Table 1b. Conjugate-pair stations in the northern hemisphere.

No.	Station name	Geographic		Geomagnetic		Computed dip	L-value
		Lat.	Long.	Lat.	Long.		
N1	Alert	82.50	297.60	85.86	168.00	85.8	305.94
	Thule/QANAQ	77.50	290.80	89.00	357.55	85.6	263.45
N2	Baker Lake	64.30	264.00	73.74	315.31	86.0	14.79
N3	Cape Wellen	66.20	190.10	61.81	237.01	75.0	4.58
	Kotzebue	66.90	197.50	63.71	242.16	76.1	5.17
	College	64.85	212.10	64.60	256.48	76.6	5.39
N4	Anchorage	61.23	210.13	60.95	258.13	73.8	4.11
	Farewell	62.50	206.10	61.33	253.46	74.0	4.24
N5	Resolute Bay	74.69	265.00	82.96	289.18	89.1	93.39
N6	Geat Whale River	55.27	282.22	66.58	347.36	81.0	6.92
	Churchill	58.75	265.90	68.66	322.80	83.4	8.56
N7	Frobisher Bay	63.80	291.40	75.30	00.70	82.7	14.49
N8	Ottawa	45.40	284.40	56.80	351.52	75.2	3.62
N9	Reykjavik	64.10	338.10	70.18	70.70	76.0	6.21
N10	Murchison Bay	80.05	18.20	75.21	137.46	82.0	17.46
	Longyearbyen	78.20	15.70	74.36	130.94	85.4	169.92
N11	Borok	58.03	38.97	53.01	123.17	72.8	2.87
	Sogra	62.80	46.25	56.38	131.70	75.8	3.63

大部分が海であることから、両半球の観測点が共役点の関係になることはきわめて少ない。表1に、ほぼ共役点に相当する観測点の地理・地磁気座標を示した。日本の観測基地である南極の昭和基地の共役点はアイスランドのレイキャビック付近であり、オーロラ帯の共役点对としては世界中で最も好条件の一つである。しかも、南極での基地を維持することは大変な困難を伴い、IMS 期間中にオーロラ帯での共役点地上観測を実施したのは日本だけである。表1に示した共役点において実際に観測した主な内容は、Byrd-Great Whale (VLF・ULF)、Eights (Siple)-Roberbal (VLF・ULF)、Macquarie Island-College (オーロラ、地磁気 CNA, X 線)、Kerguelen-Sogra (ULF, オーロラ)、Syowa-Reykjavik (地磁気, ULF, VLF, オーロラ) 等である。Syowa-Iceland における ELF・VLF エミSSIONの共役点観測結果は佐藤他(1979)が示したように、local time やエミSSIONの種類により共役性が異なるという興味深い結果が得られた。今後さらに詳しい総合的な解析を進めることにより、重要な情報が得られるものと思われる。

2. 将来計画

2.1. 地上多点観測

地上観測の利点は長期間同じ地点で連続的にデータ収録ができることである。したがって1点の観測であっても、地磁気変動、ELF・VLF 波動、オーロラ等の現象を総合的に観測することにより、現象の相互間の関係、動き、時間的变化等の詳しい解析および日変化、季節変化等の統計解析を行うことができ多くの成果を上げてきた。図1に南北両半球に対称的に出現したオーロラの典型例を示す。

上記した地上観測の利点をさらに生かすには、地上の観測点を多くし、現象の受信時間差、スペクトル強度差、波動の偏波(polarization)等の緯度および経度依存性を明らかにすることが重要である。現在多点観測網が整備されつつあるが、総合観測を行っている所はまた非常に少ないが、地上多点的観測点網を共役点観測に使用できれば、さらに大きな利点を得ることができるであろう。

実現可能な地上多点共役点観測点網として昭和基地—アイスランド共役点对がある。現在使用できる観測点として、南半球では昭和基地—みずほ基地—A₁ 無人観測点—A₃ 無人観測点(1979年に設置予定)の緯度方向のチェーンと、東西方向には A₂, A₄ 無人観測点(計画中)とソ連のマラジョジナヤ基地と南ア連邦のサナエ基地等が使用できる。昭和基地周辺の観測点網を図2に、南極大陸周辺での超高層観測基地を図3に示す。

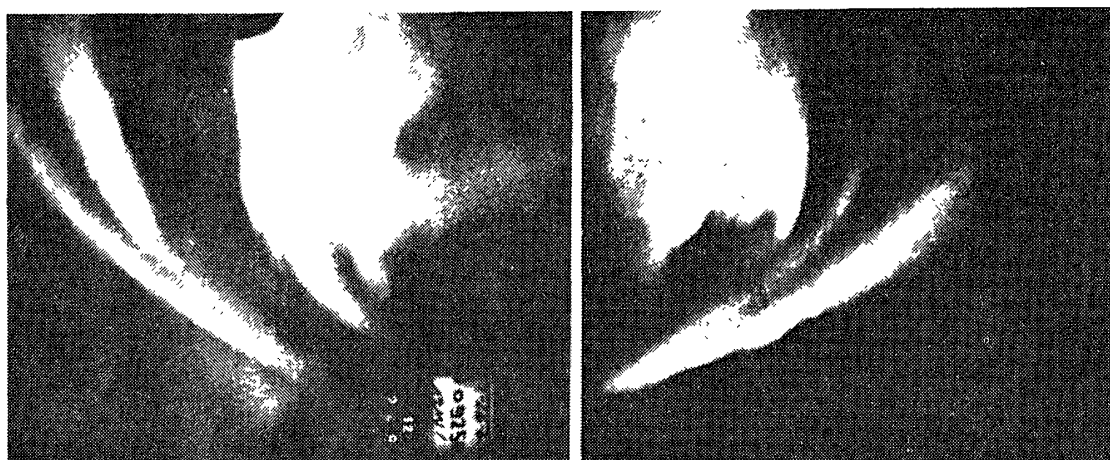


図 1 南北両半球に対称的に出現したオーロラの典型例 (STENBAEK-NIELSEN *et al.*, 1972)

Fig. 1. Typical example of conjugate multiple band aurora observed with a narrow-field camera aimed 15° above the west horizon (STENBAEK-NIELSEN *et al.*, 1972).

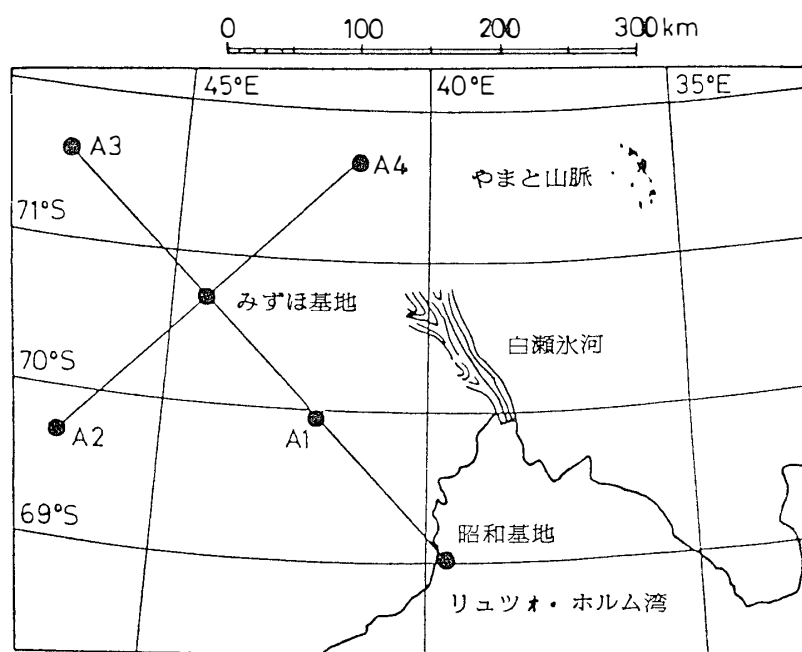


図 2 昭和基地周辺の観測点網. $A_2 \sim A_4$ は計画中

Fig. 2. The network of stations distributed around Syowa Station in latitude and longitude.

北半球側では、アイスランドの島内にチェーンを張る（すでにイギリスの ORR グループが地磁気脈動の観測を 1977 年に行った）。この子午面に沿ってグリーンランドまで延長すればさらに有効になる。グリーンランドの西側には、E. F. CHRISTENSEN のグループによる polar cap からオーロラ帯までの地磁気のチェーンが 確立されており、相互のデータ

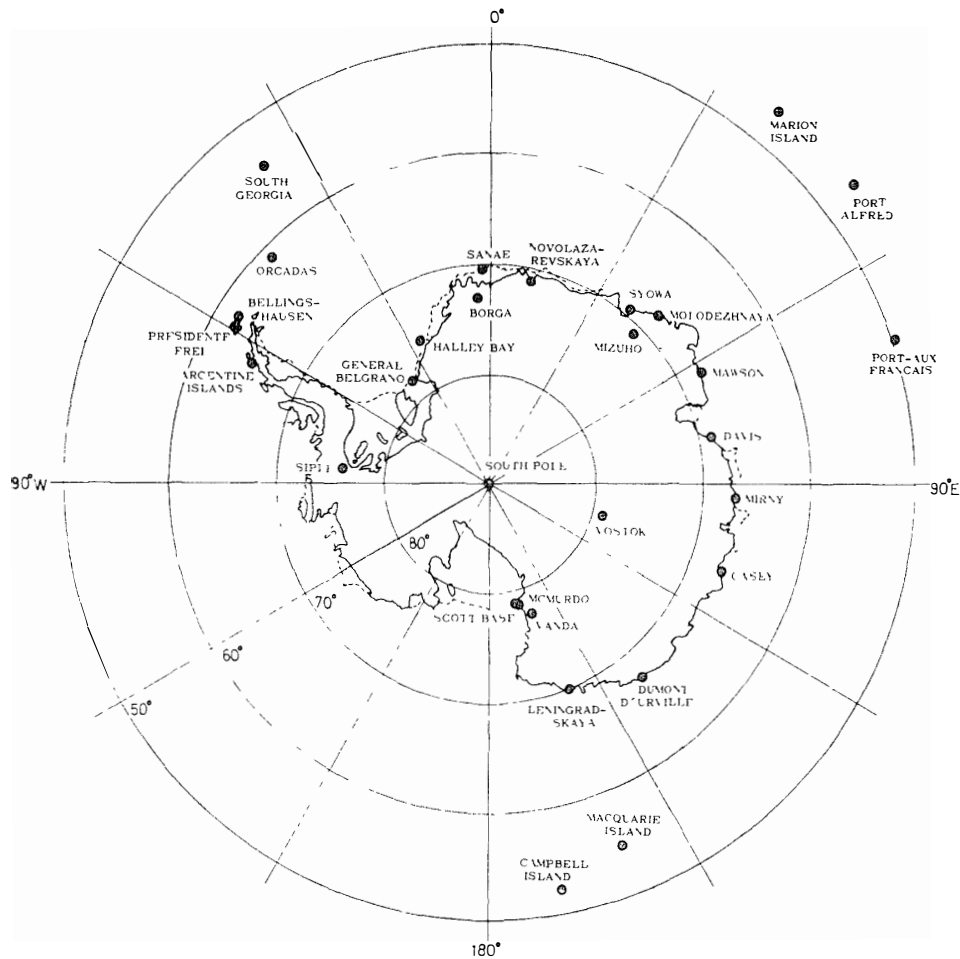


図 3 南極大陸周辺での超高層観測基地

Fig. 3. Location of upper atmospheric observatories in Antarctica.

交換を行うことにより興味深い結果が得るものと思われる。さらに東西方向のチェーンとして、スカンジナビア半島にある多数の観測点（図 4）が利用できる。以上述べたように、観測点網としてはかなり恵まれた条件にあるため、共同観測，データ交換を積極的に行う必要がある。また，データ解析の能率を上げるために，記録は規格化されたデジタルデータ方式にする必要がある。さらにまた，特殊な観測だけでなく，昭和基地で行っているような総合観測を行う必要があると思われる。

2.2. 地上観測点網とロケット・衛星等による立体観測

2.1. で記した 地上の共役点を含む 子午面・東西方向観測点網の利点をさらに有効に生かすには，ロケット・衛星等により，現象の発生源付近での直接観測も同時に行う必要がある。地上・ロケット・衛星による立体観測は，発生源付近の情報，伝搬経路内の情報，

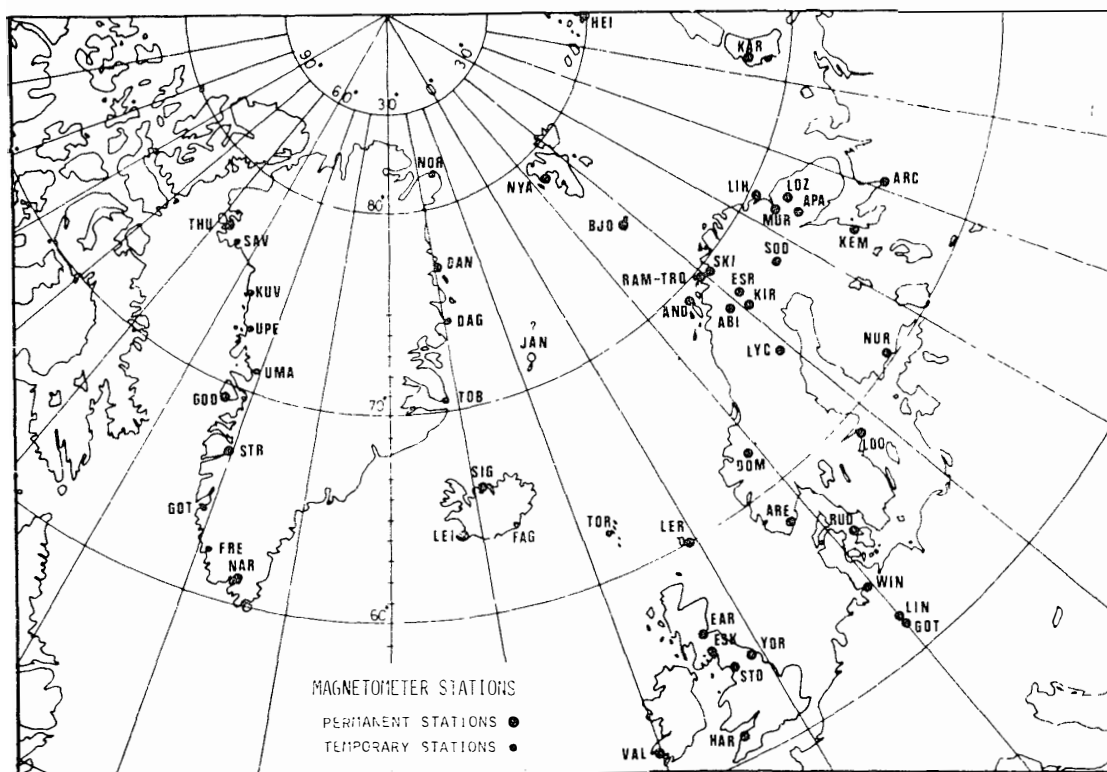


図 4 スカンジナビア半島，グリーンランド周辺での地磁気観測点網

Fig. 4. The network of magnetometer stations distributed widely in latitude around Greenland and Scandinavia.



図 5 昭和基地と地磁気共役点を結ぶオーロラの立体観測の模式図

Fig. 5. Schematic diagram of simultaneous observations on rockets, low-altitude polar-orbiting satellites, geostationary satellites and on the ground at Syowa-Iceland conjugate-pair.

および地上にもたらす影響等の現象の流れが理解でき、現象の本質を探る上で最も有効な観測手段である。この目的のため、図5に示したように、IMS 期間の1976年から昭和基地では地上多点観測に加え、ISIS-1, 2, EXOS-A の受信、S-210, S-310 ロケットの打ち上げ、さらに、昭和-アイランドの磁力線を結ぶ赤道付近に位置した、ヨーロッパの衛星 GEOS との立体観測が実施された。この立体観測の実施により、多くの成果が得られるものと期待されている。この立体観測をさらに成功させるためには、経度方向に異なった位置に数個の静止衛星を打ち上げることが望ましい。

2.3. VLF 波の active 実験

南極の Siple 基地において、長さ 22.1 km 供給電力 100 kW の送信機で VLF 波を送信し、この VLF 波が共役点でどのように観測されるかという active 実験を、Stanford 大学のグループが1973年より積極的に行っている。この実験の主たる目的は、磁気圏の中で、VLF が最も活発に起こっているプラズマポーズ付近に、人工的な VLF 波を投入することにより、磁気圏プラズマと波の相互作用を実験しようとするものである。Siple 基地の共役点はカナダ東部の Roberbal であり、Siple から送信された VLF 波、およびこれにより発生した VLF 波を受信することができる。図6に示したように、この実験により多くの興味深い結果が得られている (HELLIWELL and KATSUFRAKIS, 1974)。このような active 実験をプラズマポーズ付近だけでなく、オーロラ帯で行えば、オーロラ粒子

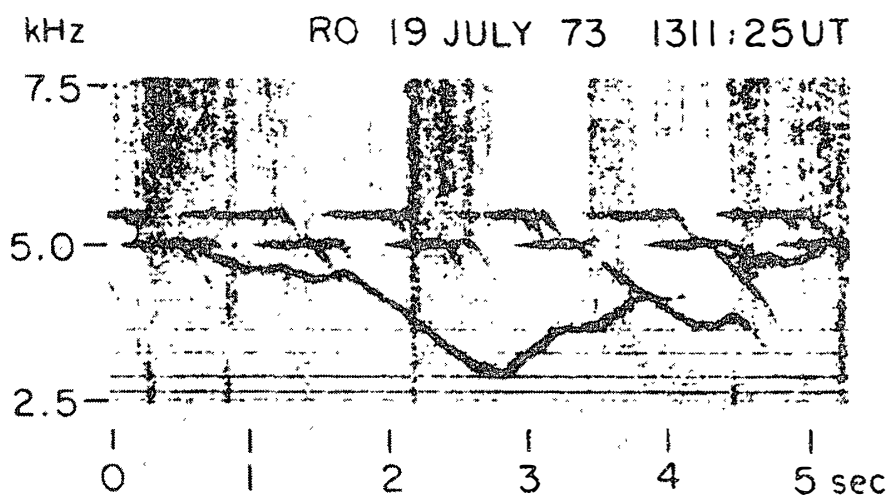


図6 南極の Siple 基地より送信した VLF 波を共役点の Roberval で受信した active 実験の例 (HELLIWELL and KATSUFRAKIS, 1974)

Fig. 6. Examples of VLF wave injection into the magnetosphere from Siple Station, Antarctica (HELLIWELL and KATSUFRAKIS, 1974).

と VLF 波動の相互作用に関する重要な情報が得られるであろう、特に、朝方の脈動オーロラに伴うオーロラコーラス発生時に、VLF の active 実験を行い、共役点で VLF 波とオーロラを観測すれば、脈動オーロラのメカニズムを探る手がかりが得られるであろう。オーロラ帯での VLF の active 実験は 1965 年に南極の Byrd 基地において、33.6 km のダイポールアンテナを用いてすでに行われた。しかし、共役点ではこの VLF 波動を観測することができなかった。この原因として、アンテナの Q 値が小さかったことや、高緯度であったことなどが考えられる (HELLIWELL and KATSUFRAKIS, 1974)。高緯度では、VLF 波がホイスラーモードとしてダクト伝搬可能になる 1000 km までの電離層内で、送信された波が大きな減衰を受ける可能性がある。また、この領域で主に観測されるコーラスエミッションの周波数は 0.3–2 kHz であるため、送信周波数 (3–30 kHz) が高過ぎたとも思える。この原因を詳しく調べた上、オーロラ帯での active 実験が可能となれば、2000 m の氷の上にある南極のみずほ基地に送信局を設け、アイスランドで受信すればよい。この VLF 波の active 実験は、昭和—アイスランドの共役点对を有効に利用するための重要な手段であると思われる。

2.4. 人工雲による磁力線トレーシング

2.4.1. 電離層内での観測

オーロラ出現時にバリウム雲を放出する実験を行えば、オーロラとバリウム雲の動きの様子から、オーロラの動きの中で局所電場による部分を分離することができる (図 7)。また、このような観測を共役点で行えば、オーロラの大規模な形態変化、微細構造の形態変化についての南北両半球での対称、非対称の原因が、電離層付近の局所電場によるものか、磁気圏内に起因するものかを区別でき、オーロラ形態の研究に大変役立つものと思われる。

2.4.2. 磁気圏内での観測

高度 500 km 付近から磁力線に沿って高速のバリウム流を放出する。放出されたバリウム流は磁力線に沿って拡散し、それが太陽光に照らされて光り、磁力線の形を浮き上がらせることができる。磁力線を浮き上がらせ、目で見ることができるのは、磁気圏の現象を解明する上できわめて有利な実験となる。この方法を用いると、1) 磁力線全体の動きから電離圏、磁気圏の電場が求まる、2) 磁力線に沿ったバリウム雲の運動から磁力線に沿う電場の大きさを求めることができ、オーロラ粒子の加速機構を解明する上で重要な情報が得られる、3) バリウム雲の動きから磁気圏内に存在する波動の性質を知ることができ

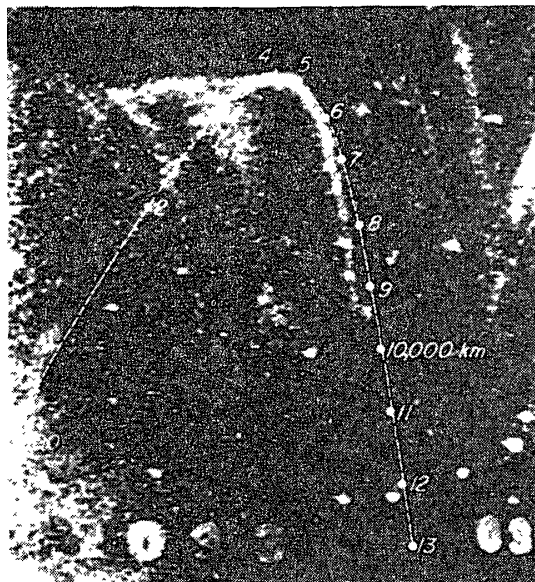


図 7 アラスカ上空の高度 540 km から放射されたバリウム流による磁力線トレーシングの実験 (WESCOTT *et al.*, 1975)

Fig. 7. Example of magnetic field line tracing by means of Barium plasma injection (WESCOTT *et al.*, 1975).

る。したがって、バリウム雲を磁力線に沿って共役点まで到達させて、その動きを連続的に観測することにより、また、オーロラ運動、地磁気変動等の地上観測結果と比較することにより、オーロラに対する電離圏、磁気圏内の電場の役割が分かり、オーロラ粒子の加速領域やその機構が大いに解明されるであろう。

3. お わ り に

共役点観測は、超高層現象の発生から伝搬までの物理的過程を捕えるために今後も重要な観測手段である。また、共役性も、単なる磁力線のトレーシングから求められた共役点という出発点だけでなく、南北両半球の地球物理的な条件の相違を明らかにし、オーロラ粒子、地磁気脈動、ELF・VLF 波動等の現象に応じて、異なった共役性の議論が必要となってくるであろう。

文 献

- HELLIWELL, R. A. and KATSUFRAKIS, J. P. (1974): VLF wave injection into the magnetosphere from Siple Station, Antarctica. *J. Geophys. Res.*, **79**, 2511-2518.
- 佐藤夏雄・勝田 豊・鮎川 勝・福西 浩・平沢威男 (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.

- STENBAEK-NIELSEN, H. C., DAVIS, T. N. and GLASS, N. W. (1972): Relative motion of auroral conjugate points during substorms. *J. Geophys. Res.*, **77**, 1844–1858.
- WESCOTT, E. W., STENBAEK-NIELSEN, H. C., DAVIS, T. N., MURCRAY, W. B., PEEK, H. M. and BOTTONIS, P. J. (1975): The $L=6.6$ Oosik barium plasma injection experiment and magnetic storm of March 7, 1972. *J. Geophys. Res.*, **80**, 951–967.

(1978年6月10日受理)