

昭和基地-アイスランド共役点観測の現在的意義と将来計画

佐藤 夏雄*

Geophysical Significance on Syowa-Iceland Conjugate Observation in the Present Stage and near Future

Natsuo SATO*

Abstract: Conjugacy and non-conjugacy of auroral phenomena give us useful information on the acceleration mechanisms for auroral particles and on the generation and propagation mechanism for ULF-VLF waves. However, there have been few conjugate pair of observatories in the northern and southern polar regions. Fortunately, the conjugate point of Syowa Station in Antarctica is located in Iceland. The first conjugate campaign was carried out in 1977, 1978, and the second campaign started in 1983 in a more extended scale. This paper summarizes, some significant results for the magnetospheric physics obtained through the conjugate observation, along with a proposal of the future plan.

要旨: オーロラ現象の共役性・非共役性の観測や研究は、オーロラを発生させる荷電粒子の加速機構やプラズマ波動の発生・伝搬特性を探る上で重要な課題である。昭和基地-アイスランド共役点对は、地球上の全オーロラ帯に唯一の貴重な観測点である。この恵まれた条件を活用した諸観測研究は1977年より開始され、現在も発展的に継続されている。この論文ではこの共役点観測で得られた研究成果をまとめ、さらに、磁気圏物理学上の問題点を解決するための展望と具体的な観測計画を提案する。

1. はじめに

地球固有の磁場中で1本の磁力線に結ばれた、南北両半球の観測点を地磁気共役点と定義している。オーロラを発生させる荷電粒子の降りこみやULF-VLF帯プラズマ波動の伝搬は基本的には磁力線に沿う。したがって、共役点では互いに似た形態のオーロラやULF-VLF波動が観測されると考えられていた。しかし、最近の観測によるとオーロラやプラズマ波動のダイナミクスは、共役点付近でも必ずしも全く同じとはいえない。

オーロラ現象の共役性・非共役性の観測・研究は、オーロラ粒子の加速機構やプラズマ波動の発生・伝搬特性を探る上で重要な課題であることから、IGY (International Geophysical Year, 1957-1958) 以降、多くの研究がなされてきた(NAGATA, 1987; review)。しかし、共役点観測は地理的な理由から、限られた地域でしか実施できない。特に、現在の時点において、オーロラ帯に位置する共役観測点对は昭和基地-アイスランドの組み合わせしか存在しない(図1)。したがって、この有利な条件を活用する研究は、わが国の南極地域観測開始以来念

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



図 1 地磁気座標により、北半球地図上に南極大陸を重複させた図。オーロラ帯と南極基地名も記入した。

Fig. 1. Mapping of the Antarctic Continent onto the Northern Hemisphere, with the auroral zone and selected stations in Antarctica.

頭に置かれていたことであり、第1回目の共役点観測が国際磁気圏観測計画 (IMS) 期間中の 1977, 1978 年の夏季に実施された (SATO *et al.*, 1980). さらに 1983 年からは、共役点観測を発展すべくアイスランド大学との共同観測として、アイスランドに 3 点の通年観測点を設置した (SATO *et al.*, 1987a, b; 佐藤ら, 1984, 1985). アイスランドの 3 観測点は、南極の昭和基地、みずほ基地、ソ連マラジョージナヤ基地の共役点付近に位置している。この多点共役点観測に呼応して、ノルウェー、デンマークとの国際協力により大気球実験も 1985 年に実施した (IVELSEN *et al.*, 1987; KODAMA *et al.*, 1988). さらに、1986 年からは将来の STEP (Solar-Terrestrial Energy Program) 国際共同観測に備えた、グリーンランドでの観測も実施してきた。今後は、後述するように現在までに明らかになった磁気圏物理学上の問題点を解決するために、アイスランド国内の多点観測網を整備・充実するとともに、アイスランド国

内の高緯度，中，低緯度各地点，及び同緯度上で東西何地点かにおける観測を実施することが重要になってきた。

2. 現在までに行われた共役点観測成果のまとめ

1977年から開始された昭和基地-アイスランド共役点観測で得られた主な成果を以下にまとめてみた。

1) 可視オーロラ

地球周辺空間から電離層に降りこんでくる電子によって起こされるオーロラ活動の時間的・空間的変動は，両半球ではほぼ同時であるが，オーロラ形状の微細構造までは一致していない (MAKITA *et al.*, 1981; SATO and SAEMUNDSSON, 1987; FUJII *et al.*, 1987b). オーロラ

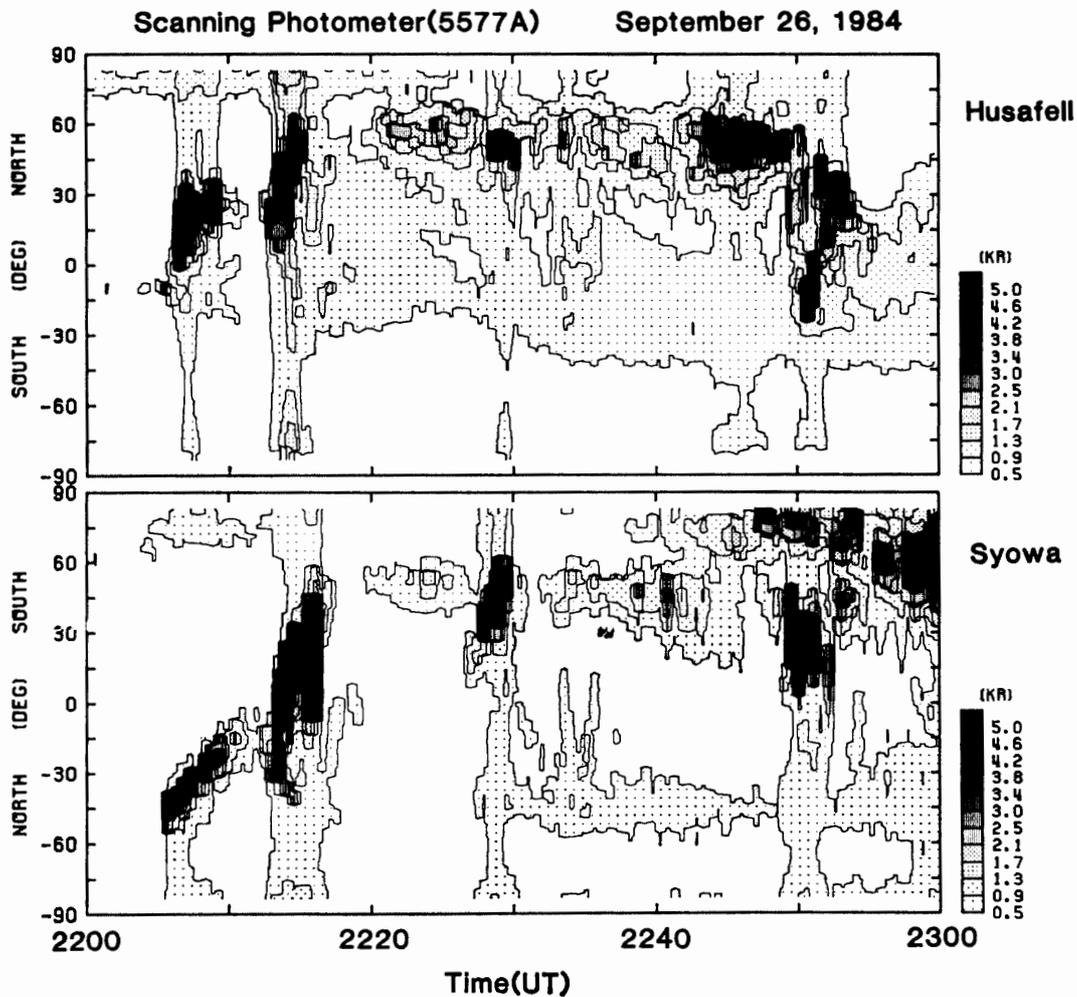


図 2 1984年9月26日に昭和基地とアイスランド Husafell で同時に観測したオーロラ 5577Å 掃天フォトメーターの観測例を示す (SATO and SAEMUNDSSON, 1987).

Fig. 2. Example of the scanning photometer display for 5577 Å auroral emissions observed simultaneously at conjugate-pair places of Syowa Station in Antarctica and Husafell in Iceland on September 26, 1984 (SATO and SAEMUNDSSON, 1987).

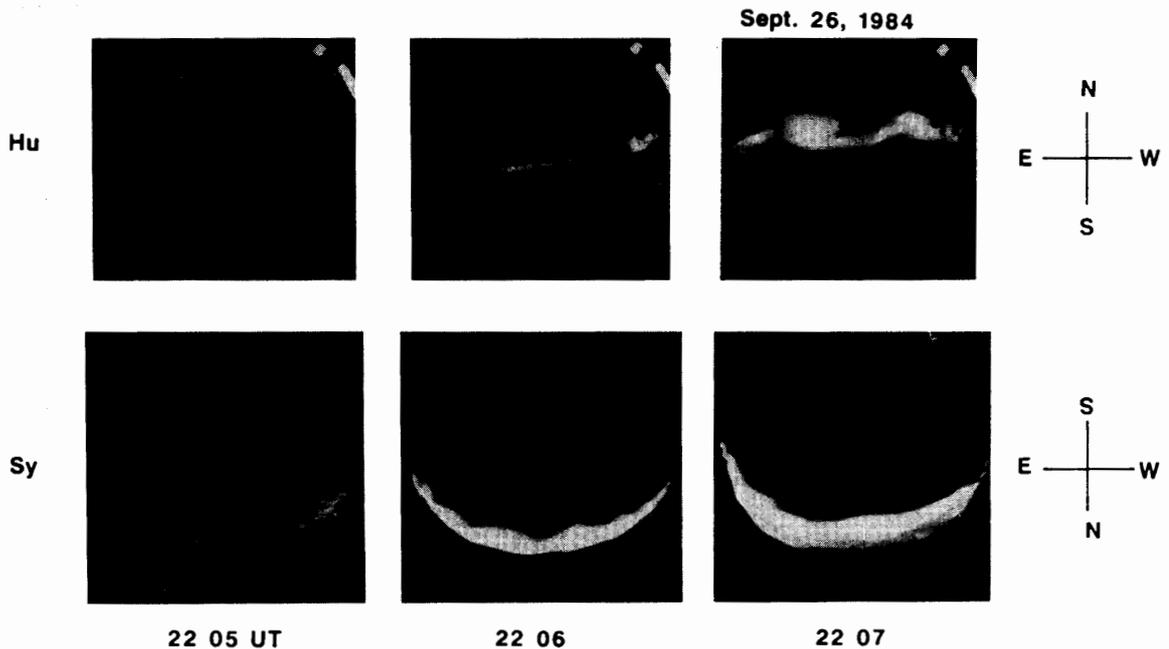


図3 共役点でオーロラを同時観測した全天カメラ写真の例 (SATO and SAEMUNDSSON, 1987).

Fig. 3. Example of the conjugate aurora observed by the all-sky camera (SATO and SAEMUNDSSON, 1987).

活動が活発な時には、東西方向へのオーロラの動きは南北半球で同じであるが、Vortex 構造等のオーロラ形態は共役点においてさえも大きく異なり、1対1の対応が見つからない場合が大部分である (FUJII *et al.*, 1987b; SATO and SAEMUNDSSON, 1987). 図2に掃天フォトメーター、図3に全天カメラの例を示した。

2) プロトンオーロラ

プロトン粒子のふりこみによって起こされるプロトンオーロラは、一般に昭和基地においてはアイスランドより明るく、かつ、低緯度側に出現している。オーロラ活動が激しい時、プロトンオーロラ強度の変動は高緯度側では共役点観測点对ではほぼ同時に起きているが、相対強度はアイスランドの方が強い。可視オーロラで共役性が乏しいような時にはプロトンオーロラにも共役性がない (SATO *et al.*, 1986).

3) パルセーティングオーロラ

光度が数秒の周期で変わるパルセーティングオーロラの形は南北両半球で類似している。パルセーティングオーロラは、オーロラ出現位置があまり動かないような場合に、南北同時に ON-OFF を繰り返すが、位置が急変化する場合には強度変化は南北で同期しておらず、むしろ ON-OFF が南北で逆位相である場合が多い (FUJII *et al.*, 1987a).

4) ELF-VLF 波動

750 Hz バンドのポーラーコーラス放射は両半球とも昼間に発生度が最大になる。しかし、

発生頻度の最大時刻は昭和基地の方が1-2時間早い。発生の季節変化は各半球の夏季に最大、冬季に最小を示す (SUZUKI and SATO, 1987)。昼間側に発生する 2 kHz バンドエミッションの季節変化は、昭和基地では 750 Hz と同じ特性を示すが、アイスランドでは大きな季節変化は認められない。また、発生頻度の最大の時間帯は、750 Hz に比べると、昭和基地では、午後側に、アイスランドでは午前側に移っている (鈴木, 1987)。2 kHz 以上の高い周波数で発生するオーロラヒスは共役点で夜間に最大となり、各半球の夏季に最小となる (SATO *et al.*, 1987a)。上記の ELF-VLF 放射の季節変化、日変化特性は、地上で観測される放射が電離層上空における日射の影響を大きく受けている事実を如実に示している。

5) Pc 1-2 地磁気脈動

周波数-時間 ($f-t$) スペクトルを用いて、Pc 1-2 脈動の共役性を統計的に解析した。その結果、昼間に発生する Pc 1-2 バンド放射 (0.1-0.4 Hz) は各半球の夏季に発生頻度が最大で冬季に最小となる。頻度が最大となる時刻は昭和基地がアイスランドより3-4時間早い。この地磁気脈動現象も日照効果を大きく受けていることが明らかになった (SATO and SAEMUNDSSON, 1989)。周波数が 1 Hz 以上の高い周波数成分を有する脈動は冬半球側で多く観測される。この脈動はプラズマポーズ付近で発生し、夜間のダクト伝搬効果により高緯度で観測されたものであると解釈される。その他のタイプの Pc 1 脈動は、一般に共役性が良い。また、これらの研究を進める段階において、 $f-t$ スペクトル上で指紋型構造 (fingerprint) をした新しいタイプの Pc 1 脈動を発見した (SATO *et al.*, 1987b)。

6) Pc 3-5 地磁気脈動

Pc 3-5 脈動の H 成分は各半球の冬季に最大、夏季に最小となる。また、この季節変化は Pc 3 帯の方が Pc 5 帯より大きい。Pc 3 は両半球とも昼頃に発生が最大となるが、Pc 5 は午前の大きなピークと夕方のサブピークが存在する。 D 成分の季節変化は、 H 成分ほど大きくない。発生の緯度分布は、Pc 5 の方が Pc 3 より高緯度側である (SAITO *et al.*, 1989)。また、共役点における観測記録に対するコヒーレンシ解析により、基本周波数 (Pc 5) の高周波成分を有する Pc 3 が含まれていることが明らかになった (TONEGAWA and FUKUNISHI, 1984)。

7) Pg 地磁気脈動

Pg 脈動の共役点観測により、この脈動は H 成分より D 成分が卓越した圧縮性電極流体波である限られた狭い地域だけに偏在して発生した場合に現れるものであり、かつ odd モードの波動であることが明らかになった。

8) Pi 2 地磁気脈動

H 成分は D 成分により振幅が大きく、かつ共役点でのコヒーレンシも大きい。 H 成分の変動は、共役点で同位相であるが、 D 成分は逆位相である。このことから、Pi 2 脈動は odd モードの固有振動であるといえる。Pi 2 の振幅は局所的なオーロラブレイクアップに直

接関係している (KUWASHIMA, 1981; SAKURAI *et al.*, 1988).

上記にまとめたように、オーロラに関する観測事実より、各半球に非対称なオーロラ粒子加速機構があることが予想され、また、プラズマ波動の統計的特性より日照が電離圏・磁気圏に及ぼす影響が大きく、波動の発生、伝搬を研究する上で共役点観測が重要であることが明らかになった。

しかし、これらの成果をあげたにもかかわらず、現状ではオーロラ現象を地球物理学上から定量的に理解できたといえる段階には達しておらず、次章に述べるように、共役点観測の現在の意義をふまえ、今後さらに共役点観測を充実させて行く必要がある。

3. 共役点観測の現在の意義

共役点における観測はオーロラ現象の発生や伝搬において、磁気圏、電離圏がいかなる役割を及ぼしているかを知る上で重要な観測手段であることは現在に至っても変わりはない。現在のように研究が進歩した段階では、ますますその重要性が認識されてきているものと思われる。以下に共役点観測という手段を用いることによる現在の意義についてまとめてみた。

1) 磁気圏内全体に起きている現象と局所的な現象との区別が観測面から可能となる。この原因を明らかにすることにより、オーロラ現象の発生機構、伝搬機構を知る手がかりがつかめる。

2) 日照効果、観測地域の固有磁場(強度、伏角、偏角)の差、磁軸と地軸のずれ等の南北半球の観測地域固有の諸条件が、オーロラ現象に及ぼす効果が今後の観測により明らかになる。この効果を明らかにすることにより、オーロラ現象の発生、伝搬機構を知る有力な手がかりが得られる。共役点における固有磁場データの日変化、年変化については ONO (1987) が詳しく計算している。

3) 南北両半球でコヒーレントな現象を時刻精度を上げて観測することにより、受信時間差を識別してその現象が引き起こされている領域を推測しうる。

4) 太陽風と地球磁気圏とのリコネクションに及ぼす太陽風磁場方向 (B_x , B_y , B_z) の影響を観測から知りうる。

5) 磁力線を1本の弦振動とみなせる地磁気長周期脈動は波動モード、共鳴条件を知る上で重要な観測手段である。

今までに得られた研究成果と、共役点観測手段の有用性をふまえ、現在の磁気圏物理学上の問題点を解決するために必要な観測方法、手段、データ解析の着眼点についてまとめてみた。

3.1. 可視オーロラ観測

1) 多点における高時間分解能の TV 観測により、オーロラの動形態を定量的に明らかに

する必要がある。この研究により、オーロラ粒子の加速、変調機構を知ることができる。

2) 共役点におけるオーロラの発光強度および発光高度の違い、発光波長の差を定量的に明らかにする必要がある。この研究によりオーロラの発光機構をさらに深く検討しうる。

3) 電子オーロラと陽子オーロラの動形態、強度差を定量的に観測する必要がある。この観測により、電子オーロラと陽子オーロラの発生・発光機構の相違が明確になる。

4) 光度変動が顕著なオーロラ(フリッカリングオーロラ、パルセーティングオーロラ)の共役点における時間変動の位相差を定量的に観測する必要がある。この観測により、これらのオーロラの発生領域、発生機構を知る手がかりが得られる。

3.2. 高エネルギー降下粒子観測

共役点におけるイメージングリオメーター、標準リオメーター網観測により、高エネルギー降下粒子のダイナミクスを明らかにする必要がある。この観測手段は、天候・日照に関係なく通年観測が可能であり、高エネルギーオーロラ降下粒子をモニター観測するのに最適である。この観測を可視オーロラと比較することにより、降下粒子の振る舞いのエネルギー依存性が明らかになる。また、統計的な解析により南北両半球への高エネルギー粒子の降下量の差異を定量的に明らかにすることができる。

3.3. オーロラジェット電流の観測

1) オーロラ発生時に電離層領域で東西方向に強く流れるジェット電流の微細構造、電流強度の季節変化・日変化等の統計的観測・解析により、沿磁力線電流を介しての電離圏-磁気圏結合の機構を明らかにしうる。

2) サブストームやオーロラブレイクアップ時のジェット電流、Pi 2 脈動、可視オーロラ、リオメーター等の共役点観測は、磁気圏に蓄積されたエネルギーを急激に放出するメカニズムを知る手がかりを与える。

3.4. Pc 1-Pc 5, Pg, Pi 2, ELF-HF 波動の汎世界的観測

1) 南北共役点を含む汎世界的な地磁気観測網により、長周期地磁気脈動の強度分布、位相分布とその共役性を観測することは、これらの波動の共鳴、伝搬機構、波動モードの決定に役立つ。

2) 長周期から短周期までのプラズマ波動強度の日変化、季節変化等の統計解析は少なくとも太陽活動の1周期にあたる12年間行う必要がある。プラズマ波動は、太陽と磁気圏の相互作用、磁気圏内の共鳴で発生しており、電磁波を通して地上で連続記録できる絶好の観測対象である。したがって、長年の統計観測・解析は太陽が地球に及ぼす影響を知る最も良いモニターである。

3.5. オーロラ電場観測

レーダー、大気球等によるオーロラ電場の共役点観測は太陽風-磁気圏の相互作用、オーロラ粒子加速等の機構を考えるうえで有力な手段である。

3. 6. 熱圏中性大気の観測

レーダー、ライダー、ファブリーペロー等の観測手段による熱圏の風・温度等の観測は、オーロラ活動が中性大気に及ぼす効果を知る上で重要である。特に、この手段を季節の異なる共役点で実施することは、南北半球の中性大気の振る舞いの相違を知る上で効果的な手段である。

4. 極域共役点観測の将来計画

極域共役点観測の有用性を生かし、かつ現在の磁気圏物理学上の問題点を解明するために、STEP 期間中に以下の新たな観測計画を実施したい。

4. 1. アイスランド国内の観測

1) 地磁気観測網強化

現在稼働中のアイスランド国内3地点の観測に加え、図4に示した地磁気等緯度・等経度線に沿った8地点においてフラックスゲート磁力計、インダクション磁力計を設置する。この観測により、ULF 波動の伝搬特性、共鳴領域の推定、オーロラジェット電流の微細構造等を明らかにしたい。

2) オーロラ降下粒子のイメージング観測

地球磁場モデルによると、1990年代には昭和基地の共役点はTjörnes付近に位置することになると予測されている(ONO, 1987)。昭和基地で実施しているイメージングリオメーター、

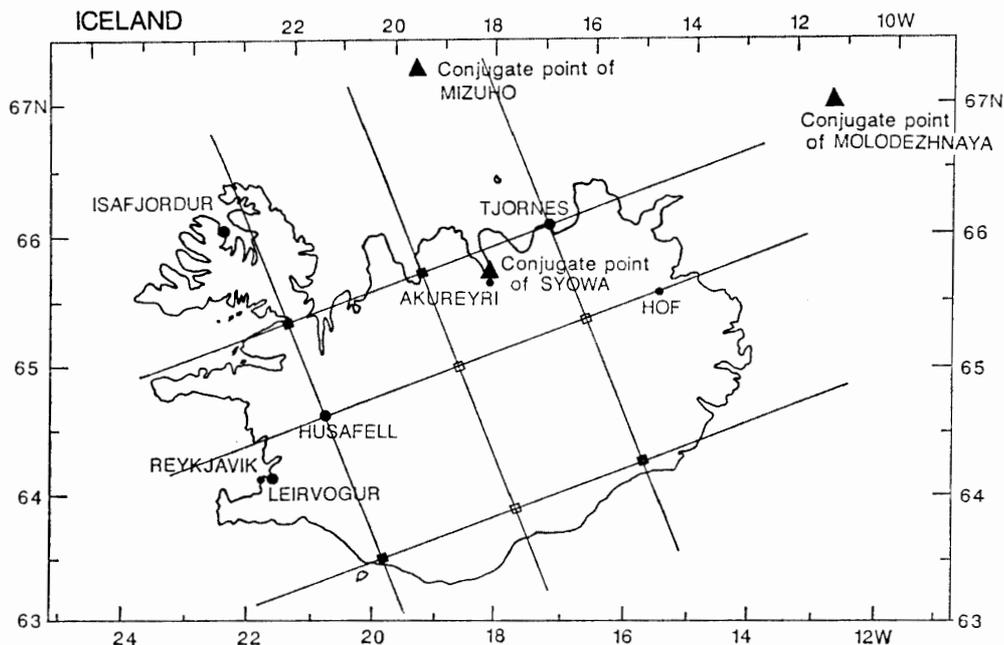


図4 アイスランド国内における地磁気多点観測網計画の観測点配置図

Fig. 4. Observing stations in a future plan for the coordinated geomagnetic network in Iceland.

CCD TV カメラ観測に呼応して Tjörnes においてオーロラ降下粒子のイメージング観測を実施したい。イメージングリオメーターは天候・日照に影響なく連続観測が可能であることから、高エネルギーオーロラ降下粒子の共役性の研究に有力な観測手段である。この観測は、昭和基地の共役点位置の日変化、年変化のトレーサーとしても役立つ可能性がある。

3) オーロラ分光観測

Tjörnes において、スキャンニングフォトメーター、固定方位フォトメーター、ファブリペロー分光器等によるオーロラの分光観測を実施したい。この観測により、オーロラの絶対強度、分光強度、熱圏中性大気の運動等の共役性を明らかにする。

4.2. アイスランド国外の極域観測

オーロラエネルギー輸送の過程を明らかにするためには、アイスランドの高緯度側に位置するグリーンランドやスピッツベルゲン、及びアイスランドと等緯度で東西に数千 km 離れた、ノルウェーやグリーンランド南端での観測が必要である(図5)。この観測は、デンマーク気象研究所(グリーンランド)、オスロ大学(ノルウェー、スピッツベルゲン)及び日本国内の関係研究者と共同により、地磁気、オーロラ TV カメラ等の観測器を設置しデータを収録する方法、及びデータ交換等による方法で実施したい。

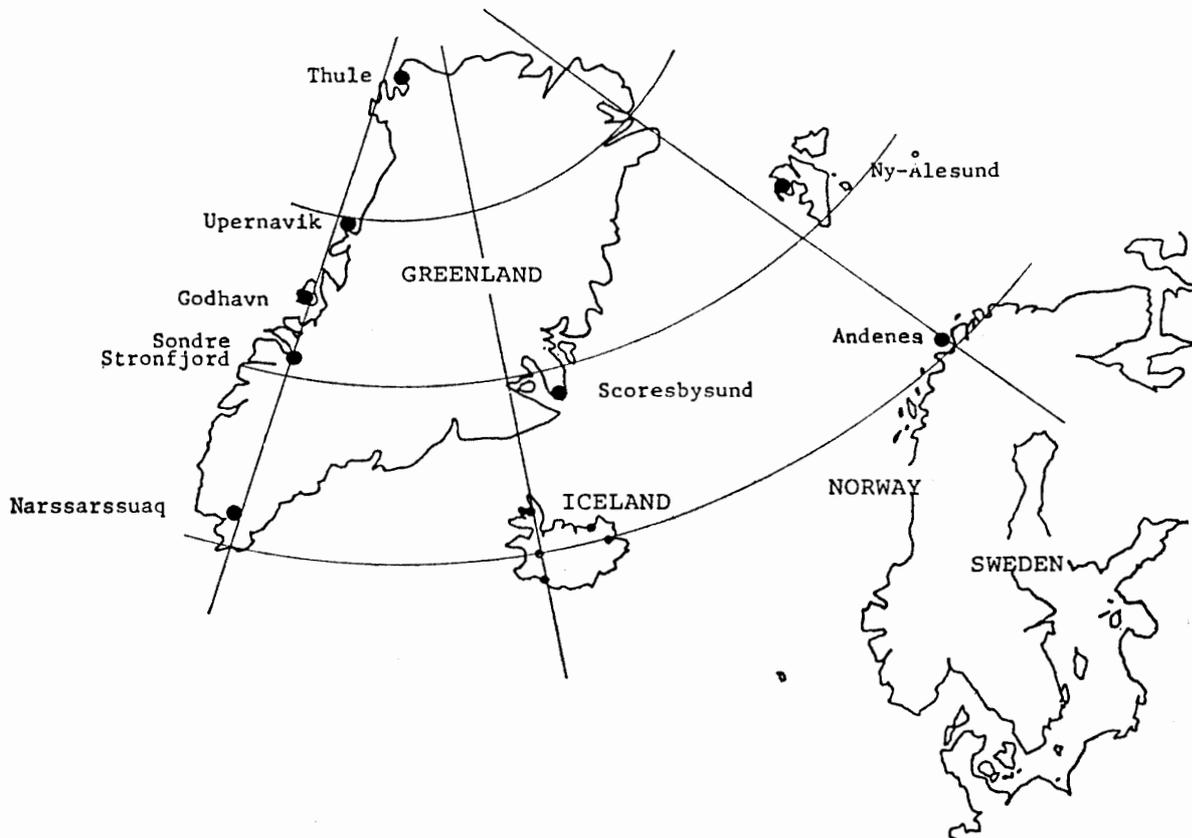


図5 アイスランド周辺地域における多点観測計画の観測点配置図

Fig. 5. Station distribution in a future plan for the coordinated auroral observation around Iceland.

4.3. アイスランド国外の中・低緯度観測

磁気圏内の共鳴で励起された長周期 ULF 波動が、中・低緯度まで伝搬する過程・機構はいまだ明らかになっていない。この課題を解決するために、アイスランドと等経度線に位置するアイルランド、スペイン、アフリカの地磁気観測所に ULF 波動観測を依頼し、データ交換を行いたい。

4.4. 南極における総合観測

STEP 期間中は既存のオーロラ現象総合観測に加え、大型短波レーダーの設置、オーロラ分光観測、無人多点観測、大気球観測を行う。

4.5. 衛星との同時観測

人工衛星はオーロラ現象を起こしている源での観測ができるよい手段である。しかし、衛星は移動スピードが早過ぎ、オーロラ現象の時間変化と空間変化とを分離して観測することは困難である。したがって、ダイナミックに変動するオーロラ現象の本質を解明するためには、オーロラ粒子加速域での衛星による直接観測と、オーロラエネルギーが消費される南北両半球地上での観測を組み合わせた同時観測が必要である。1989年2月に打ち上げられた EXOS-D 衛星との同時観測は絶好の機会である。

謝 辞

共役点観測計画の立案・実施にあたり、永田武前所長、松田達郎前所長、星合孝男所長、平澤威男教授、江尻全機教授、国分征教授、福西浩教授をはじめ、国立極地研究所内外の関係者各位のご協力に感謝します。また、アイスランドにおける観測実施・維持にあたっては TH. SAEMUNDSSON 教授をはじめ関係者の誠意、努力に感謝の意を表します。さらに、南極における観測を実施して下さった越冬隊員の皆様にも感謝いたします。アイスランドを中心とした極域共役点観測の現地調査は文部省海外学術調査(60041085, 63041130 など)により、また、国内での研究費は文部省科学研究費一般(B)(61460051 など)の援助を受けました。ここに感謝の意を表します。

文 献

- FUJII, R., SATO, N., ONO, T., FUKUNISHI, H., HIRASAWA, T., KOKUBUN, S., ARAKI, T. and SAEMUNDSSON, TH. (1987a): Conjugacies of pulsating auroras by all-sky TV observations. *Geophys. Res. Lett.*, **14**, 115-118.
- FUJII, R., SATO, N., FUKUNISHI, T., KOKUBUN, S., ARAKI, T. and SAEMUNDSSON, TH. (1987b): Conjugacy of rapid motions and small-scale deformation of discrete auroras by TV observations. *Mem. Natl Inst. Polar Res., Spec. Issue*, **48**, 72-80.
- IVERSEN, I. B., MIYAOKA, H., SATO, N., ULLALAND, S. and FUJII, R. (1987): Preliminary results from the auroral zone ionosphere observations during the AZCO balloon campaign in 1985. *Mem. Natl Inst. Polar Res., Spec. Issue*, **47**, 36-43.
- KODAMA, M., OHTA, S., YAMAGAMI, T., NAMIKI, M., NISHIMURA, J., HIRASHIMA, Y., MURAKAMI, H., OKUDAIRA, K., SUZUKI, H., MIYAOKA, H., SATO, N. and FUJII, R. (1988): Auroral X-ray image

- formings using three directional NaI (TI) telescopes at balloon altitude. Proc. NIPR Symp. Upper Atmos. Phys., **1**, 56–64.
- KUWASHIMA, M. (1981): Wave characteristics of magnetic Pi 2 pulsations in the auroral region; Conjugate relations. Mem. Natl Inst. Polar Res., Spec. Issue, **18**, 161–178.
- 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. (1987): Research of geomagnetically conjugate phenomena in Antarctic since IGY. Mem. Natl Inst. Polar Res., Spec. Issue, **48**, 1–45.
- ONO, T. (1987): Temporal variation of the geomagnetic conjugacy in Syowa-Iceland pair. Mem. Natl Inst. Polar Res., Spec. Issue, **48**, 46–57.
- SAITO, H., SATO, N., TONEGAWA, Y., YOSHINO, T. and SAEMUNDSSON, TH. (1989): Seasonal and diurnal dependence of Pc 3–5 magnetic pulsation power at geomagnetically conjugate stations in the auroral zone. J. Geophys. Res., **94**, 6945–6948.
- SAKURAI, T., TONEGAWA, Y. and SATO, N. (1988): Oscillation characteristics of Pi 2 in auroral zone; Syowa-Iceland conjugate study. Proc. NIPR Symp. Upper Atmos. Phys., **1**, 110–120.
- 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.
- SATO, N. and SAEMUNDSSON, TH. (1989): Pc 1–5 geomagnetic pulsations and 750 Hz ELF activity at ground level in the northern and southern hemispheres. Electromagnetic Coupling in the Polar Clefts and Caps, ed. by P. E. SANDHOLT and A. EGGLEND. Dordrecht, Kluwer Academic, 229–238 (NATO ASI Series C, Vol. 278).
- SATO, N., AYUKAWA, M. and FUKUNISHI, H. (1980): Conjugacy of ELF-VLF emissions near $L=6$. J. Atmos. Terr. Phys., **42**, 991–928.
- 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., FUKUNISHI, H. and SAEMUNDSSON, TH. (1984): Operation plan for the Iceland-Syowa conjugate campaign in 1983–1985. Mem. Natl Inst. Polar Res., Spec. Issue, **31**, 169–179.
- 佐藤夏雄・藤井良一・国分 征・荒木 喬・SAEMUNDSSON, TH. (1985): 1984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, **87**, 78–95.
- 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.
- SATO, N., KOKUBUN, S. and SAEMUNDSSON, TH. (1987a): Geomagnetic conjugacy of 30 kHz band auroral hiss emissions observed at $L=6.1$. J. Geophys. Res., **92**, 6159–6162.
- SATO, N., SHIROKURA, Y. and HIRASAWA, T. (1987b): Fingerprint structure Pc 1 geomagnetic pulsations. Geophys. Res. Lett., **14**, 664–667.
- 鈴木博之 (1987): 地磁気共役点における ELF-VLF 放射の統計的特性. 山形大学大学院理学研究科修士論文, 97 p.
- SUZUKI, H. and SATO, N. (1987): Seasonal and diurnal variations of ELF emission occurrences at 750 Hz band observed at geomagnetically conjugate stations. J. Geophys. Res., **92**, 6153–6158.
- TONEGAWA, Y. and FUKUNISHI, H. (1984): Harmonic structure of Pc 3–5 magnetic pulsations observed at the Syowa-Husafell conjugate pair. J. Geophys. Res., **89**, 6737–6748.

(1989年3月7日受付; 1989年5月18日改訂稿受理)