

南極における超高層観測用無人観測施設
—IMS 期間 (1976-1978) の地上多点観測—鮎川 勝¹・巻田和男²・山岸久雄¹・石沢賢二¹・佐藤夏雄¹Unmanned Observatory for Auroral Physics Study on the
Antarctic Continent
—Multipoint Ground-based Observations during the
IMS Period (1976-1978)—Masaru AYUKAWA¹, Kazuo MAKITA², Hisao YAMAGISHI¹,
Kenji ISHIZAWA¹ and Natsuo SATO¹

Abstract: The International Magnetospheric Study (IMS) was carried out for three years from 1976. The Japanese Antarctic Research Expedition (JARE) participated in this IMS project. The main purpose of the IMS project in JARE was the synthetic observation of polar magnetic substorms. In order to study polar magnetic substorms, a multipoint ground observation network was planned around Syowa, including unmanned stations. In the construction of an unmanned observatory system in Antarctica, there have been difficulties, such as insufficient information about environmental conditions, the construction support capability, power supply and others. During the IMS period, the U.S.A., former Soviet Union, Australia and the United Kingdom also started to develop unmanned observation systems. In this report, we describe the development of a JARE unmanned observatory for upper atmosphere physics and also the scientific results.

要旨: 国際磁気圏観測計画 (IMS: International Magnetospheric Study) は、1976-1978 に実施された。この IMS 計画では、磁気圏嵐の発生機構の解明が焦点の一つであったことから我が国の南極観測もこの国際観測計画に参加した。日本の南極地域における IMS 計画は、「極域嵐の総合観測研究プロジェクト」として企画立案され、この研究プロジェクトを構成するひとつの柱に地上多点観測計画が位置づけられていた。南極におけ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を目的とした。南極の地上多点観測網による観測は日本の観測隊に限らず外国隊でも計画されたが、各国とも有人基地の増設は予算、派遣人員および設営面などの困難から無人観測所の設立を検討した。南極における超高層無人観測は、厳しい環境条件、設営支援能力の制限、施設への要求機能および設計等の基本資料が不十分なため困難が見込まれたが、IMS 計画を契機にして、米国、ソ連 (当時)、豪州国、英国および日本などの国々を中心に南極地域における超高層観測用無人観測の敷設計画が本格化した。本報

¹ 国立極地研究所. National Institute of Polar Research, 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.

告は、日本の観測隊が実施した超高層観測用無人観測施設の開発と運用経過をまとめ、併せて、地上多点観測で得られた地磁気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と地磁気共役点の日変化特性などを現象論として述べる。

1. はじめに

太陽エネルギーが宇宙空間へ大量に放出される現象のひとつに太陽フレアーが知られる (大林, 1970)。太陽フレアーの発生により、速さ約 1000 km/s 程度のプラズマ雲が太陽から放出され、これが地球周辺の外圏大気場で磁気圏嵐 (magnetospheric substorm) をはじめとする種々の擾乱現象を引き起こす原因になっている。磁気圏嵐のひとつに、極域に発生する超高層擾乱現象として極域嵐 (polar substorm) がある。極域嵐は、AKASOFU (1968) によれば、aurora substorm, polar magnetic substorm, ionospheric substorm, atmospheric substorm, X-ray substorm, proton aurora substorm, VLF emission substorm および micropulsation substorm などの極域超高層擾乱現象としてまとめられている。これらの極域超高層擾乱現象の因果関係は、未だ必ずしも明らかにされているとはいえないが、磁気圏嵐の結果として互いに密接に関連して発生することが確認されている。それゆえ極域嵐の観測と研究は、磁気圏嵐の発生機構の解明という太陽—地球空間物理学の研究に関する重要な役割を分担している。

磁気圏嵐の発生機構の解明には、磁気圏嵐の伝搬過程における物理状態の情報を取得しつつ、その結果の現れである極域嵐の諸現象を精密に観測することが必要であり、① 太陽エネルギーの供給領域としての、惑星間空間と磁気圏境界領域および磁気圏内における物理的状态の観測、② 太陽エネルギーの消費領域としての、極域電離圏における諸物理量の直接観測、③ 極域嵐の諸現象の南北両域にわたる広範囲かつ密な地上からの観測が重要である。特に、これらの観測を総合的に、立体的に、同時に実施しうる観測体制の整備が、磁気圏嵐の発生機構の解明に最も効果的な情報を与えるものと考えられる。今から約 20 年前に計画された国際磁気圏観測計画 (IMS: International Magnetospheric Study, 1976-1978) では、この磁気圏嵐の発生機構の解明にも焦点があてられたことから、我が国の南極観測も IMS 計画に参加した。

日本の南極地域における IMS 計画は、表 1 に示す「極域嵐の総合観測」研究プロジェクトとして企画立案され、地上多点観測計画はこの研究プロジェクトを構成するひとつの柱であった。南極におけ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を目的とした。南極の地上多点観測網による観測は、日本の観測隊に限らず外国隊でも計画されたが、予算、派遣人員および設営面など南極観測に共通する制約によって、有人基地の増設が困難である情勢から無人観測所の設立を検討した。南極における無人によ

表 1 昭和基地周辺における IMS 観測計画一覧表

Table 1. Japanese upper atmospheric research programs during the IMS period in Antarctica.

Method of observation	Purpose of the investigation	Item of observation and instrument
Ground-based observations at Syowa and Mizuho Stations	For the detailed study of the physical structure of the polar substorm	SYOWA Aurora : All sky camera, Auroral zenith photometer, Multicolor geomagnetic meridian scanning photometer, High sensitive TV camera with filters, VHF auroral radar Geomagnetism : Fluxgate and Induction magnetometers Ionosphere : Vertical incidence ionosonde, Riometer VLF emissions : Narrow band intensity recorder, ELF hiss recorder, Chorus recorder, Tape recording for wide band Detection of arriving direction of emissions
		MIZUHO Aurora : TV camera Geomagnetism : Fluxgate and Induction magnetometers Ionosphere : Riometer VLF emissions : Narrow band intensity recorder, Tape recording for wide band
Multipoint ground observations around Syowa Station	For the study of space-time development of the auroral and magnetic substorms	UNMANNED Geomagnetism : Fluxgate and Induction magnetometers Ionosphere : Riometer Others : Meteorological data (temperature, wind velocity, etc)
Balloon experiment at Syowa Station	For the direct measurement of the auroral X-rays etc at an altitude of about 30 km	Auroral X-rays, Local electric field, Ozone concentration, etc
Sounding rocket experiment at Syowa Station	For the direct measurement of auroral phenomena at an altitude of max 200 km	Auroral particles, Auroral visible light, Electron temperature, Auroral ultraviolet and infrared radiations, VLF emissions, Electron and Ion densities, Electric and Magnetic fields, Ozone concentrations, etc
Reception of polar orbiting satellite data at Syowa Station	For the obtain physical informations from the magnetosphere by polar orbiting satellites	ISIS and NOAA satellites : Top-side sounder, Ion mass-spectrometer, VLF emissions, Low energy particles, Ion probe, Visible and Infrared radio meter, etc
Magnetospheric conjugate point experiments (Japan-France joint campaign)	For the study of polar substorm conjugacy	Reykjavik : Fluxgate and Induction magnetometers, VLF detector, Riometer, Auroral TV camera, Scanning photometer, etc GEOS : Geosynchronous satellite observation SYOWA : Sounding rocket, Balloon and Ground-based observations (Aurora, Geomagnetism, Ionosphere, VLF-ULF emissions)

る超高層科学観測は、厳しい環境条件、設営支援能力の制限、施設への要求機能および設計のための基本的資料が不十分などにより困難度が見込まれたが、IMS計画を契機にして、米国、ソ連（当時）、豪州国、英国および日本などの国々を中心に南極地域における超高層観測用無人観測の敷設計画が本格化した。

2. 南極における無人観測の歴史

極域における無人自動観測の試みは、国際地球観測年（IGY: International Geophysical Year, 1957-1958）の頃に、南極域においては豪州国と米国が、また、北極域においてはソ連（当時）と米国が気象観測を行ったのが最初である。SMITH and JENNY（1968）の報告によれば、オーストラリア南極観測隊（ANARE: Australian National Antarctic Research Expedition）は、ルイス島（Lewis Is.: $66^{\circ}06'S, 134^{\circ}22'E$ ）とチック島（Chick Is.: $66^{\circ}47'S, 121^{\circ}00'E$ ）に気象観測用のセンサー（気圧、気温、風向および風速）を配備し、マッコーリー基地（Macquarie St.: $54^{\circ}30'S, 158^{\circ}56'E$ ）およびウィルクス基地（Wilkes St.: $69^{\circ}00'S, 120^{\circ}00'E$ ）へデータをテレメトリー伝送して無人気象観測を実施している。この無人気象観測の電力供給は、電池と充電用の風力発電機で構成されたが、強いブリザードにより風力発電機が破壊し、電池の完全放電や時刻信号の偏向などの不具合が発生した。風力発電機の使用や破壊などに関する詳細な記録は残っていない。同じ時期、アメリカ隊では、ロス氷棚（Ross Ice Shelf: $81^{\circ}30'S, 175^{\circ}00'W$ ）とスケルトン氷河（Skelton Glacier: $78^{\circ}35'S, 161^{\circ}30'W$ ）の末端付近の2カ所で短期間の無人による気象観測を実施したが、長期の無人観測の実現には電力供給の手法が課題として残った。アメリカ隊は、1962年から1966年にかけて、マクマード基地（McMurdo St.: $77^{\circ}51'S, 166^{\circ}37'E$ ）近くのミナブラフ（Minna Bluff: $78^{\circ}31'S, 166^{\circ}25'E$ ）やブロックトン基地（Brockton St.: $78^{\circ}45'S, 174^{\circ}40'W$ ）の周辺で、電力供給システムに放射性同位体（Sr-90）を利用しての無人気象観測を実施した。これらの無人による気象自動観測の試みでは、いずれも時刻信号のずれ、センサーおよびハードウェア類の凍結などの事故が発生して必ずしも十分な観測が行われたわけではなかった。

日本南極地域観測隊（JARE: Japanese Antarctic Research Expedition）でも、ANAREやアメリカ隊が無人気象観測の試みをした同じ時期に、昭和基地（Syowa St.: $69^{\circ}00'S, 39^{\circ}35'E$ ）の周辺で自動気象観測を行っている。JARE-3は、昭和基地の南東約100kmの南極大陸氷床上（ $69^{\circ}20'S, 41^{\circ}23'E, \sim 1500\text{ m a.s.l.}$ ）に長期自記気象計を設置し、1959年4月から11月までの約7カ月間、同地点の風向、風速、気温データを無人により観測した。この観測記録は、時刻表示に難点が見られたが、冬期の大陸斜面下降帯の環境の様相を知る手がかりを与えた（日本学術会議、1960）。

JARE, ANAREおよびアメリカ隊の無人気象観測システムは、いずれも時刻信号がずれることが報告されており、無人による観測システムにとって、高精度の時刻信号の確保と安定

した電力供給源の確保が大切であることが示唆されている。

その後、無人観測ステーション設立のための技術的な開発研究は、IGYの経験を踏まえて、米国が最も積極的かつ大規模に取り組んだ足跡が見られる。スタンフォード大学工学系の研究グループは、①放射性同位体を利用する電源、または、それと同等かそれ以上の信頼性をもつ電力供給法の検討、②低消費電力、小型軽量および信頼度の高い、電子部品およびエレクトロニクスの開発、③人工衛星の通信回線を利用して、南極の無人観測基地とアメリカ本国（研究所または大学の研究室）あるいは有人基地経由で本国とを結ぶ通信技術の検討、などを大きな技術的課題にかかげて、南極における無人観測システムの開発研究を提案した（SMITH and JENNY, 1968; JENNY *et al.*, 1969）。JENNY等の提案は、米国科学財団（NSF: National Science Foundation）の極地研究委員会で採択され、1972年1月からマクマード基地の近辺でUGO（Unmanned Geophysical Observatory）開発計画が実行に移された。このUGOシステム開発計画では、まず、①UGOシステムの科学的、技術的データを有人基地（マクマード基地）経由でINTELSAT通信衛星を介して本国へ直接伝送する試験、②UGOの電力供給源としての風力発電機およびプロパン燃料を用いた熱発電機の性能試験、などが行われた。UGOシステムの試験運用の電力は、マクマード基地の電源系統から提供された。試験運用は、1972年1月から1973年1月まで順調に行われたが、1973年2月にマクマード基地内で発生した電源系統の事故によりUGOシステムが損傷し中止された（SITES, 1973a, b）。CHIVERS and AXFORD（1973）やWILLARD *et al.*（1973）は、UGOシステム試験運用期間中のリオメーターと地磁気脈動観測の初期結果を報告している。その後、アメリカ隊は、1975年に南極点のアムンゼン・スコット基地（Amudsen-Scott St.: 90°S, 0.00°）の近くで、プロパン燃料による熱発電システムを電力供給源とする無人観測システムで気象観測（気圧、気温、風向、風速）を試みている（SITES and PETERSON, 1975）。

ANAREの無人観測システムの開発は、1974/75シーズンから無人による超高層物理観測の完全実施を目標に計画された。ANAREは、1971年5月に有人基地であるケーシー基地（Casey St.: 66°18'S, 110°32'E）の南東約90kmの南極大陸氷床上に試作無人観測装置を設置した。この無人観測システムでの試験観測では、時刻表示が不正確、観測機器の一部が動作不良などの不具合が発生し、無人観測システム開発に関する技術的な種々の検討課題を提供した（NEW ZEALAND ANTARCTIC SOCIETY, 1971a; BIRD and HUMPHREYS, 1972; AUSTRALIAN ACADEMY OF SCIENCE, 1972; BIRD and SULZBERGER, 1976）。ANAREでは、その後、試作無人観測システムの運用を継続させながら、電気回路の改善、データ収録法の変更および観測項目の増加などの開発研究をすすめ、1974年まで超高層無人観測を発展的に維持した。ANAREの無人観測システムの開発では、安定した電力供給源の確保がむづかしいことから低消費電力の観測機器の開発研究に重点がおかれた傾向が見られるが、この無人観測システムによる超高層物理現象の観測結果の詳しい報告は未だ見られない。BIRD and SULZBERGER（1976）に

気象観測結果の一部が報告されている。

ソ連（当時）の南極における超高層物理研究用無人観測は、米国および豪州国の無人観測開発と同じ時期に計画・実施されている。第17次ソ連南極観測隊がミールヌイ基地（Mirny St.: 66°33'S, 93°01'E）とボストーク基地（Vostok St.: 78°28'S, 106°48'E）の間に地磁気変動観測を目的として敷設したことが NEW ZEALAND ANTARCTIC SOCIETY (1971b) に紹介されている。ソ連（当時）は、この時期、将来の無人自動観測設備の電力供給源として、放射性同位体の崩壊現象を利用した熱発電機システム ITEG (Isotopic Thermoelectric Generator) の開発に取りかかっている。KHARIN (1974) の報告によれば、1970年および1971年にマラジョージナヤ基地（Molodezhnaya St.: 67°40'S, 45°51'E）の近くのビスコー山（Mt. Biscoe）周辺、昭和基地近くの大陸氷床上（69°50'S, 39°30'E）およびロア・ボードワン基地（Roi Baudouin St.: 70°26'S, 24°19'E）の近辺などで ITEG の野外試験を実施している。ソ連（当時）は、この野外実験を基礎として IMS 計画期間の地磁気無人多点観測計画につなげている。

英国、ニュージーランドおよび日本などの国々の南極観測隊では、IMS 計画が始まってから無人による超高層科学観測を実施することになる。英国は、1977年にハレー・ベイ基地（Halley Bay St.: 75°35'S, 26°15'W）の南南西約110kmの地点（76°30'S, 27°48'W）に自然電波（ELF/VLF）観測用の無人受信システムを敷設し、データはハレー・ベイ基地へテレメーター送信して記録している（MATTHEWS *et al.*, 1979）。ニュージーランド国は、スコット基地（Scott Base: 77°51'S, 166°45'E）から約5km離れたアライバル台地（Arrival Heights）で無人によるオーロラ全天カメラ写真、地磁気脈動および電離層吸収観測などを実施したとの報告がある（NEW ZEALAND NATIONAL COMMITTEE FOR ANTARCTIC RESEARCH, 1978）。

3. 日本の超高層無人観測施設の開発研究

3.1. システム開発の背景と経過

日本の南極における超高層用無人観測は、表1に示した、①昭和基地およびみずほ基地（Mizuho St.: 70°42'S, 44°20'E）の有人による超高層総合観測、②無人観測を含む昭和基地周辺における地上多点観測、③昭和基地におけるロケットおよび大気球による観測、④昭和基地における人工衛星（ISIS 及び NOAA）受信観測、⑤昭和基地—GEOS（Geostational satellite/ヨーロッパ共同体）—アイスランドとの同時観測などの IMS 期間中の観測計画の一環として南極大陸氷床上に四つの無人による超高層物理観測拠点の建設が企画された。

南極域における無人による超高層物理観測システムの開発には、耐厳寒、耐強風、耐降雪および電力供給源、簡素な建設手段などむつかしい問題が包含される。著者のひとりである鮎川は、システム開発に際して、①安定した電力供給の方法、②科学観測機器類の保護方法（特に保温）、③長時間の記録方法、④正確な時刻表示法、⑤科学観測機器類の低消費電力化と小型軽量化、⑥科学観測機器類の低温特性の向上、⑦簡素な建設作業など7項目の検討す

べき課題を提起した。これらの課題は、極域科学研究分野の総合観測として編成される JARE のオペレーションなかで、実行しうる可能条件の算定 (feasibility study) が基本的に重要で、予算の許容範囲、輸送能力、建設要員と建設方法 (例えば、8 名以下の小人数・素人建設集団・建設用重機の欠如) および許容建設期間 (最大 1 週間) が限定されるなどの制約を考慮し検討されなければならない。更に、無人観測の建設予定地の過酷な自然環境、例えば、最低気温約 -60°C 、年平均気温約 -30°C 、想定される最大風速約 40 m/s 、年平均風速約 10 m/s 、積雪の年堆積量 $10\text{--}50\text{ cm}$ (上田, 1971; 山田, 1974; 佐々木, 1974; 西尾・楠, 1975) などに耐えうる無人観測システムであることが要求される。JARE の無人観測システムの開発は、これらの基本的な検討課題のうち、科学観測機器の低温動作性能・許容消費電力などに関する設計基準を与えるために、機器類の保護環境と電力供給手法の調査検討を先駆けた。

機器類の保護環境の検討は、冷凍倉庫を利用したの発砲スチロール材などの熱伝導基礎実験が最初に行われ、1975 年 10 月にプロトタイプ of 無人観測施設 PUGO (Prototype unmanned geophysical observatory) が製作された。PUGO は、南極の厳しい自然環境から観測機器類や電池類を守護する保温箱、保温ヒーター用の電力源としての小型風力発電機、地磁気変動三成分観測器、時刻較正器および熱ペン記録器などで構成され、1975 年 11 月に日本を出発した JARE-17 により昭和基地に搬入された。IMS 計画 2 年次に当たる JARE-18 は、実用型無人観測施設 UMUGO (Utility Model Unmanned Geophysical Observatory) を作成して、1977 年 1 月に昭和基地とみずほ基地を結ぶ地磁気子午線上のほぼ中間点の大陸氷床上の地点 ($69^{\circ}47'S, 41^{\circ}35'E, 1470\text{ m a.s.l.}$, named A1, 以後 A1 点と称す) に建設した。この UMUGO システムは、観測を始めた約 1 カ月後の 2 月末に電源系統の事故により消失した。JARE-18 は、無人観測施設の配置計画を変更して、PUGO を A1 点に設置して 1977 年 5 月末から 8 月下旬までの約 3 カ月間地磁気三成分変動記録を取得した (国立極地研究所, 1976-1978; 鮎川ら, 1979)。JARE-19 は、UMUGO 改良型の新無人観測施設 NDUGO (New Design Unmanned Geophysical Observatory) を 1978 年 1 月に A1 点に建設した。NDUGO は、小さな故障を繰り返しながらも 1980 年 1 月まで順調に稼動し、無人による超高層科学観測のデータ収録に成功している (国立極地研究所, 1977-1979)。著者等が試みた日本隊の無人観測システムへの風力発電機の実用化は、IMS 計画以後、南極域気水圏観測計画 (POLEX-South) に引き継がれ、1979 年から 1981 年にかけて気水圏研究グループが気象無人観測施設の保温熱源用の電力として小型風力発電機を採用している。しかし、この小型風力発電機は南極の厳しい環境下で機能保持が困難で、南極での運用機種として不適當であることが指摘された (大畑・勝田, 1983)。

南極における自然科学研究分野の観測計画は、地球の環境問題が取りざたされている今日、今後さらに調査域の面的な拡大を必要とするであろう。しかし、一方では、近年の南極条約の環境保護議定書の締結による国際的な南極環境保護の監視体制が強化される動向か

ら、広大な南極域の面積に比べて圧倒的に観測点が少ない南極観測の実状にもかかわらず、観測点の数を有人基地として増やすことはむつかしい情勢が存在する。したがって、極域科学の立場から要請される南極域の多点観測は、無人観測施設を含めた多点観測網による展開が、環境保護の立場からも極めて大切な視点であると指摘できる。特に、オーロラに伴う諸現象を研究対象にする超高層科学観測では、地磁気共役点観測を南北両地域で緯度的にも経度的にも面的に拡大しての地上観測の重要性が増大してきていることから無人観測拠点の敷設による観測の実行が必要である。著者等がIMS期間に提唱した無人観測システムは、今後の極域嵐研究の発展に重要な役割を果たしていくものとする。

3.1.1. 多点観測網設置計画

オーロラ活動に代表される極域嵐の空間的・時間的な発達過程を精密に調べることは、地球周辺の電磁気環境と磁気圏電離圏の物理過程を明らかにするうえで極めて重要である。地上多点観測は、その極域嵐の空間的・時間的な発達過程の情報を詳細に得るための効果的な観測手段のひとつであるが、高い代価や設営的支援および環境保護の立場などの観点から有人基地の増設は必ずしも推奨できない。IMS計画の一環としてのJAREの地上多点観測網は、二つの有人基地（昭和基地およびみずほ基地）とみずほ基地を中心とした四つの無人観測拠点の設置により計画された（NAGATA *et al.*, 1976）。日本隊の計画した地上多点観測の配置図を図1に示す。図に示される四つの無人観測拠点は、みずほ基地を中心として地磁気の緯度経度線を約150 km離れた点に位置し、それぞれA1点～A4点と呼称する。

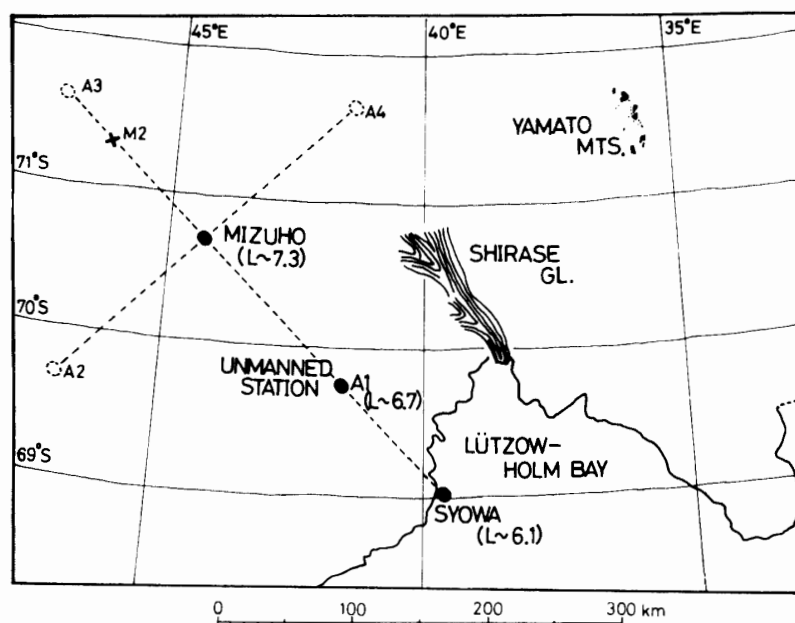


図1 昭和基地周辺の地上多点観測網

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

3.1.2. 無人観測システムの配置予定地の環境条件

1983年7月22日、ボストーク基地 (Vostk St.: 78°28'S, 106°48'E) で、地球上で観測された最も低い温度 -89.2°C が記録され、南極大陸氷床上の内陸部が厳しい低温環境にあることが知られる。日本隊が無人観測システムの配置を予定するみずほ基地周辺の年平均風速と年最大風速は、それぞれ約 10 m/s 、約 25.4 m/s である。また、年平均気温と年最低気温は、それぞれ -30°C 、 -56.4°C (その後、JARE-26で -61.9°C を記録)である。降雪が堆積していく形態は、表面地形に強く依存することが一般に知られるが、みずほ基地周辺のような斜面下降風帯における堆積は、風によって雪面が削割されサスツルギ (sastrugi) と呼ばれる雪面模様がつくられる。サスツルギは、風上側に鋭く尖った稜線をもち、風下側になだらかに伸びる形状をもつことからその周辺の卓越風向を知ることができる。西尾・楠 (1975) によれば、A1 無人観測点付近の1年間の平均的な積雪の堆積量は $10\text{--}50\text{ cm/year}$ と見積もられる。無人観測システムの開発では、これらの気象条件の中で科学観測機器類が安全かつ確実に動作できる環境条件を整えることが要求される。

3.1.3. 基礎低温実験と無人観測装置の試作

JARE型の無人観測設備の開発に先立ち、その基礎的な設計資料の取得を目的として冷凍倉庫で基礎低温実験を行った。基礎低温実験の結果は、発砲スチロールを主たる断熱材質に用いた保温箱に僅かな熱源を設けることで、年平均気温 -30°C の低温環境から科学観測機器を保護し、その安定な動作を保証する環境が提供できる可能性が示唆された (鮎川ら, 1979)。

著者等は、基礎低温実験結果の示唆に基づき、科学観測機器類と電源用電池 (空気積層1次電池) の動作環境を確保するために二つの保温箱を作成した。そして、保温箱ヒーターの電力供給源として、無人観測システムを配置する予定地域の年平均風速 10 m/s に着目し、最も現実的で実現性のある自然エネルギーの利用、すなわち、風力発電機の活用をシステムに取り入れた。ここでの風力発電機の機種は、発電性能と予算的条件および建設作業の簡便度などを勘案して選定され、試作無人観測システム PUGO としてまとめられた。PUGO システムは、小型風力発電機 (Wincharger 1222H 型, DC12 V, 200 W)、保温箱 -A, -B、科学観測機器類 (地磁気変動三成分観測器、熱ペン型長時間記録器および時刻校正用受信器) で構成された。

PUGO は、株式会社ミサワホーム総合研究所の低温環境実験室において、①低温状況下における風力発電機の動作性能試験 (風洞実験)、②保温箱の保温性能試験および耐積雪試験、③風力発電機による保温用の電力供給試験、などに関して約 -30°C の低温環境で実験を行った。低温環境実験室内における PUGO の総合的な環境性能試験の模式図を図2に示す。一方、科学観測機器等のエレクトロニクス系統は、冷凍倉庫 (-20°C) 内で約1週間の連続動作試験を行って低温動作性能が確認された。PUGO システムの各種環境性能試験の結果

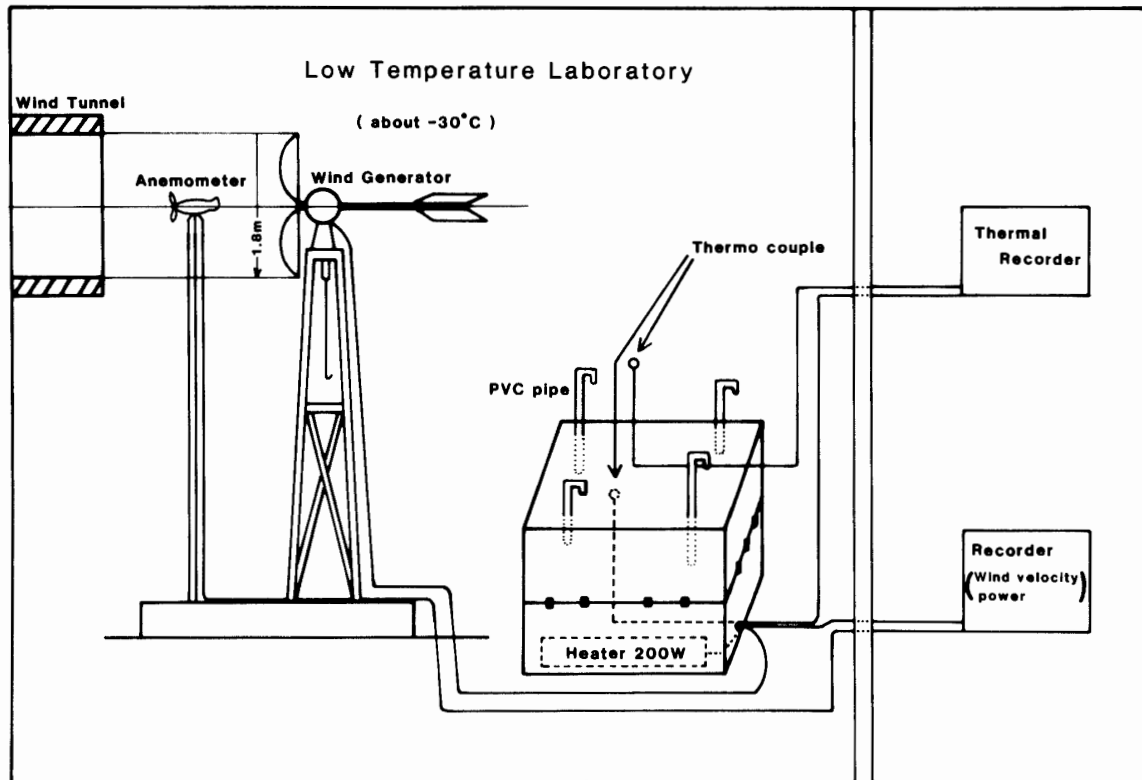


図 2 低温環境試験室における試作無人観測システムの環境テスト

Fig. 2. Environmental test of the proto-type unmanned observatory in a low-temperature room.

は、南極の厳しい自然環境の中で科学観測機器が安定して動作し、無人による観測記録の取得の可能性が高いことを示唆した(鮎川ら, 1979)。

3.1.4. JARE 型無人観測施設 (UMUGO) の概要

JARE-18 は、PUGO システムの各種環境性能試験の結果を基にして、JARE の内陸部における設営支援能力を勘案しての JARE 型の実用無人観測施設 UMUGO (Utility Model Unmanned Geophysical Observatory) を考案した。UMUGO システムは、建設作業の簡便さが抜群のパネル式市販冷凍庫を観測小屋 (大きさ: 1800 L × 1800 W × 2070 H) に利用し、風力発電機 (定格: 1.0 kW) と鉛-希硫酸反応の 2 次電池を組み合わせた浮動充電方式を電力供給システムに取り入れた。3.2 節で電力供給源である風力発電機について詳細に述べる。一方、観測関係は、地磁気変動三成分 (H, D, Z) 観測器、地磁気脈動二成分 (X, Y) 観測器、電離層吸収 (CNA) 観測器などの超高層科学観測装置類と、気温・雪温・風向・風速および気圧などの気象要素の観測装置類で構成された。図 3 に UMUGO システム構成の概略図を示す。観測機器類の保温対策は、観測小屋の中に各機器の大きさに見合った保温区画棚を設け、それぞれの区画に板状ヒーターを配備して、サーモスタットとパワー継電器の組み合わせで温度制御を行うことを考えた。図 4 に UMUGO システムに設けた電源系統と温度制御回路の概略図を示す。図 4 の破線で囲まれる A-G は、科学観測機器の独立した保温室を示し、それ

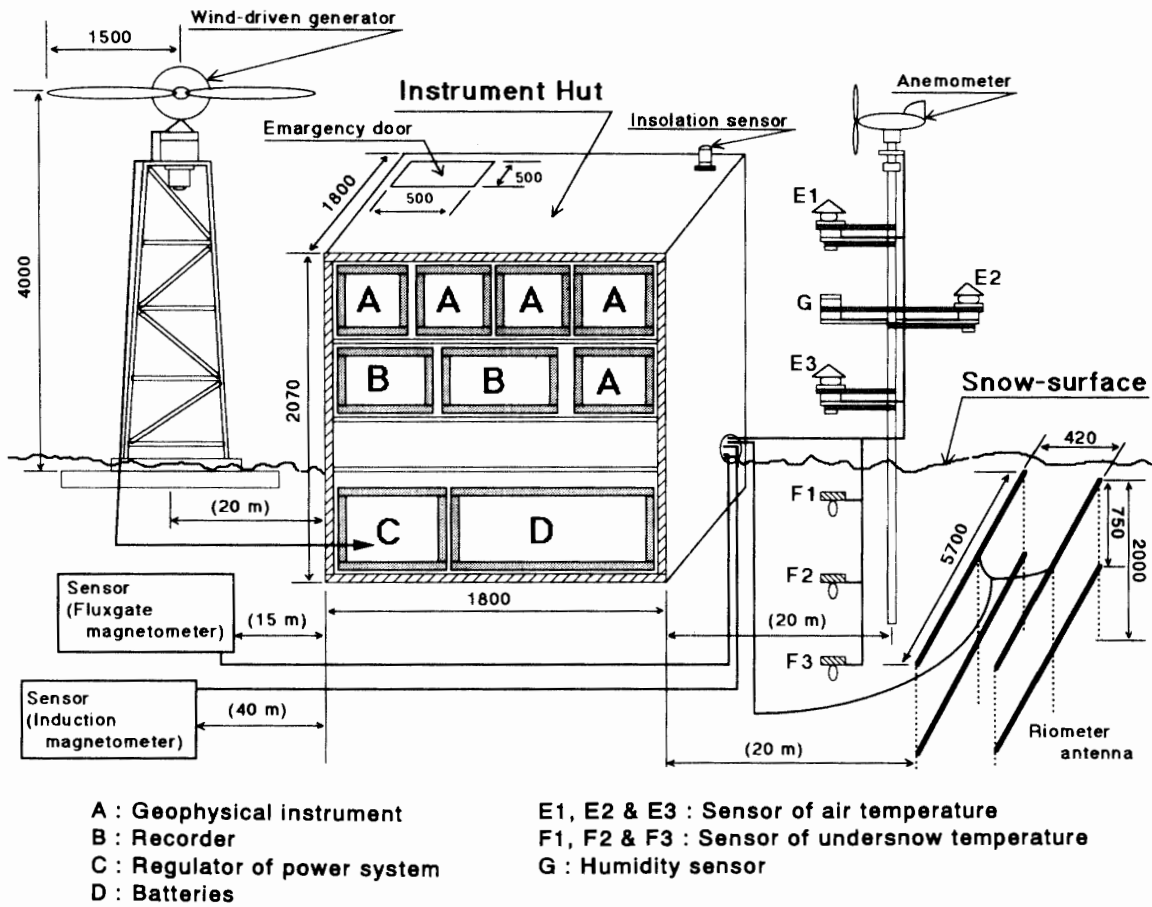


図 3 実用化無人観測施設の構成図 (第 1 号施設)

Fig. 3. Configuration of Utility Model Unmanned Geophysical Observatory (UMUGO/the first system of JARE-type).

それぞれのサーモスタットの温度設定値にしたがってヒーターが ON-OFF する。このように、温度制御を各観測機器類ごとに細分化したことは、①各機器類の低温動作特性が異なる、②厳しい南極環境における風力発電機の動作機能確保が未経験、③それ故、電源容量の安全確保に不確実性が含まれる、④観測系統の一斉不良の事故発生の防御策、などを配慮しての工夫であった。UMUGO システムは、1977 年 1 月に JARE-18 によって昭和基地の南東約 120 km の南極大陸氷床上 (本文図 1 の A1 点) に設置され順調な観測を開始した。

3.2. 電力供給源の検討

南極における無人観測のための電力供給源の確保は、技術的に解決されねばならない最も大きな課題である。この技術的課題には、多数の研究者達により提案と開発試験が行われた経緯があり、すでに、風力発電機、太陽電池、プロパンガス燃料式熱発電機、各種一次電池、液化燃料電池および放射性同位体式熱発電機などが運用または試行されている (JENNY *et al.*, 1969; 伊藤ら, 1974; BIRD and SULZBERGER, 1976; MATTHEWS *et al.*, 1979)。これらの電力供

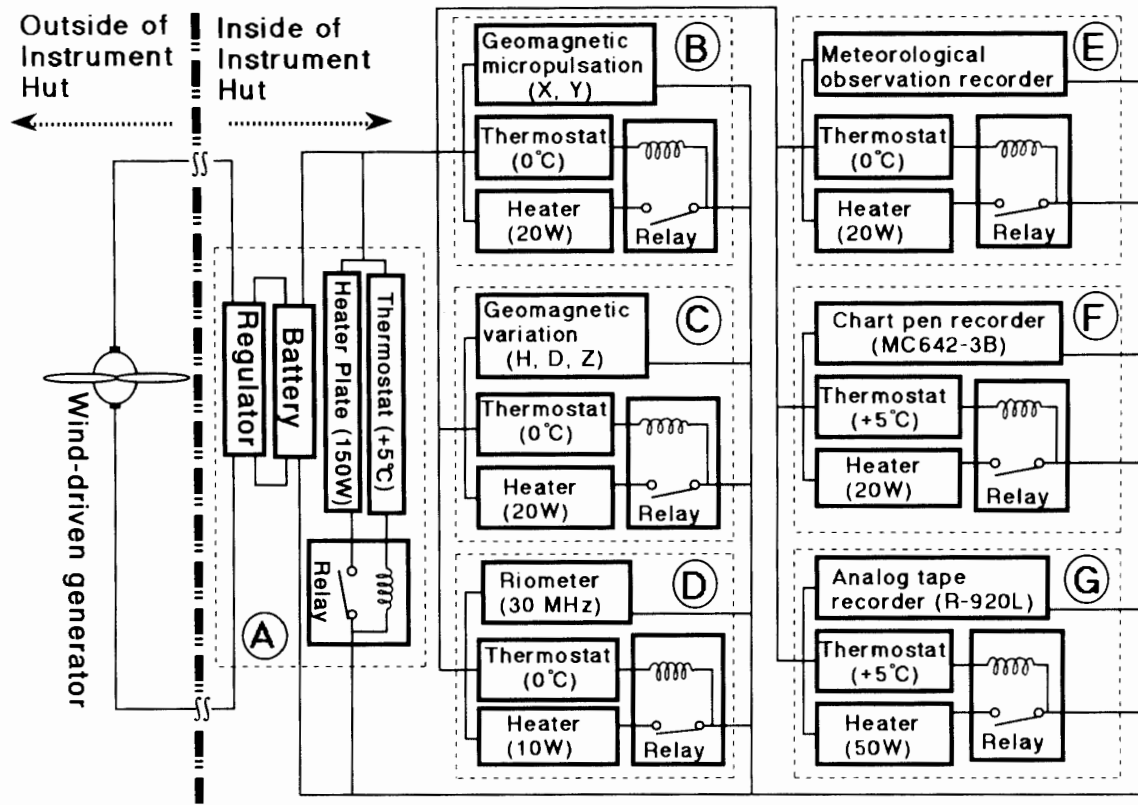


図 4 実用化無人観測施設 (UMUGO) の温度制御ブロックダイアグラム
 Fig. 4. Block diagram of temperature control system in instrument hut of UMUGO.

給方式のうちで、極低温、強風、地吹雪などが絶え間ない環境にある南極における JARE の無人観測用電力供給源を検討した。無人による確実な電源確保の方法は、放射性同位体式熱発電機 (RITG: Radio Isotope Thermo-electric Generator) 方式が最も高い信頼性が見込まれたが、RITG は自然環境保護と安全確保の両面から放射線漏れ防止に万全な対策が必要で、安全対策が二重三重に施されるシステムになり複雑な敷設作業が要求される欠点があった。プロパンガス燃料式熱発電機や液化燃料電池による電力供給方式は、例えば、3 カ月以上の長期間にわたる無人運用に際してプロパンガスまたは液化燃料の自動制御による補給方法が困難度の高い技術的な問題であった。太陽電池は、信頼度の高い電源方式と考えられるが、無人観測システムが最も熱源を必要とする南極の冬期に、太陽放射が失われるので電力供給源の役割を果たさないという欠点があった。これらに対して、風力発電機はクリーンな自然エネルギーの利用であることから、南極の環境汚染に影響を与えず、また、敷設後の運転経費が保守部品のほかに不必要であることが見込まれるなどの利点がある。さらに、南極みずほ高原地域のような斜面下降風帯では、卓越風向がほぼ一定 (A1 点付近の卓越風向は概ね東風、年平均風速約 10 m/s) であることから、電気的には効果的な発電動作が見込まれ、また、機械的には風向変化に追従する動作が少ないことから寿命の伸展が期待できるなどの利点が

ある。このことから、JAREの超高層無人観測システムの電力供給源に風力発電機を採用し、電力供給システムとして風力発電機と2次蓄電池の組み合わせ方式、すなわち、浮動充電方式を取り入れることにした。ところで、風力発電機は、IMS計画が実行に移される準備期間内では、それ自身を開発研究するには時間的、経済的に困難な点が見込まれたことから、すでに、寒冷地における風力発電機利用の先進国であったヨーロッパ諸国の実績を調査することにより実質的な対応策を検討した。風力発電機の選定には、観測機器、記録装置類および保温用ヒーターなどの電力需要量を満足するような定格出力を具備することが第一条件で、併せて、建設に必要な設営支援がJAREのオペレーションで許容できる範囲にあることに留意して検討を行った。北半球アルプス山岳地帯で豊富な運用実績を積んだスイス製の風力発電機がJAREのオペレーションで許容できる適当な機種として選んだ。しかし、システムの電力需要量に見合う風力発電機の選定という第一条件は、実際には各機器の設計見積もりと、風力発電機の輸入手続きに要する日数、観測隊の出発日、などの兼ね合いがシステム構成の全体をまとめあげる進捗日程の中で必ずしも調和しえなかったことから不確定要素が包含された形で準備作業が進められた。

3.2.1. 風力発電機の性能と安全機能システムの構成

JARE型超高層観測用の無人観測UMUGOシステムの電力供給源は、風速が約3 m/sで発電をはじめ、約10 m/sの継続風の下で定格出力が約1.0 kWの特性曲線をもつ水平軸型の風力発電機（スイス製、Elektro GmbH. Winterthur, WV-15G型）を用いることにした。図5にWV-15G型風力発電機の風速一回転数・出力特性を示す。この風力発電機は、ヨーロッパ山岳地帯のアルプス山系で多用され、低温および強風下での風力発電機の機能と安全動作が運用実績として確認されているスイス・Elektro GmbH.社のカタログ製品である。WV-15G型風力発電機の回転部は、長さ約1.5 mのブレード2枚で回転翼を構成し、これを発電機回転軸に取り付けて直径3 mの受風面で風エネルギーを回転力に変換させる簡単な構造で成る。ブレードの取り付け部は、風速が約10 m/sを越える強風時には遠心力を利用する可変ピッチ機構により、回転数を一定に保持する自動制御機構が具備されている。この自動制御は、風速が11-30 m/sの範囲で有効に機能するように設計され、風速の高まりに応じてブレード面が傾き、風圧を受けるブレードの面積が減少するように工夫されている。また、WV-15G型風力発電機プラントには、このほかに30 m/sを超えるような強風や突風時あるいは電池の過充電などの保護対策として、発電機の回転を停止させる別の安全装置が組み込まれている。安全装置の機能は、風力発電プラントに設計上の安全値を越えるような状態が発生した時、風向に対してブレード回転面を強制的に平行（現象的にはブレード回転面と尾翼面との角度が90度になる）に傾けて発電を停止させる。この安全装置の動作による発電停止は、定時的（6時間ごと）なタイマー信号により自動的に解除されるか、または、手動で解除させることができる。安全装置の動作機能が解除されれば、風力発電機は再び発電機能を

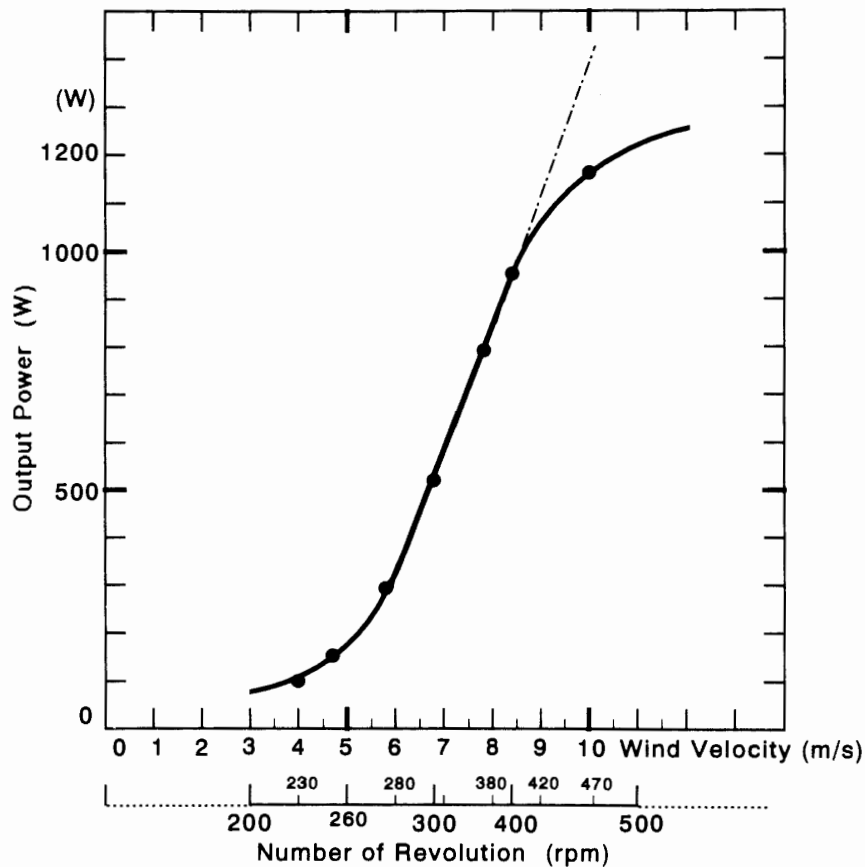


図 5 WV-15G 型風力発電機の実出力特性

Fig. 5. Output characteristics of WV-15G type wind-driven generator.

回復してバッテリーへの充電を再開するシステムとして構成されている。

図 6 は、WV-15G 型風力発電機プラントがシステム構成として具備している各種の安全対策を簡潔に示した機構図である。図の一点鎖線で囲まれる部分は、プラントの自動制御系の主要回路でスイッチパネルと呼ばれる。スイッチパネルは、風力発電機 W の起電流が発電機のスリップリングから整流回路を経て 2 次蓄電池 (BAT. N-200×6) に流れる浮動充電方式が示され、また、システムの安全機能の系統が、① 過充電防止回路、② 過電流防止回路、③ 強風突風対策、④ その他、などで構成されていることがわかる。風力発電機 W と制御モーター M を結ぶ破線は、システムが備える安全機能が働いた時、制御モーター M が X 方向に回転して尾翼心棒を強制的に折り曲げる働きをする巻き上げワイヤーロープを表している。尾翼心棒が強制的に折り曲げられると、風力発電機の回転翼面が風向に対して平行になるように工夫されているので、風力発電機は発電を停止してシステムを保護する。図 6 を参照してシステムの安全対策の動作機能を説明する。

① 過充電防止機能

過充電防止の対策は、ツェナーダイオード (ZD: Zener diode) の動作特性を利用している。

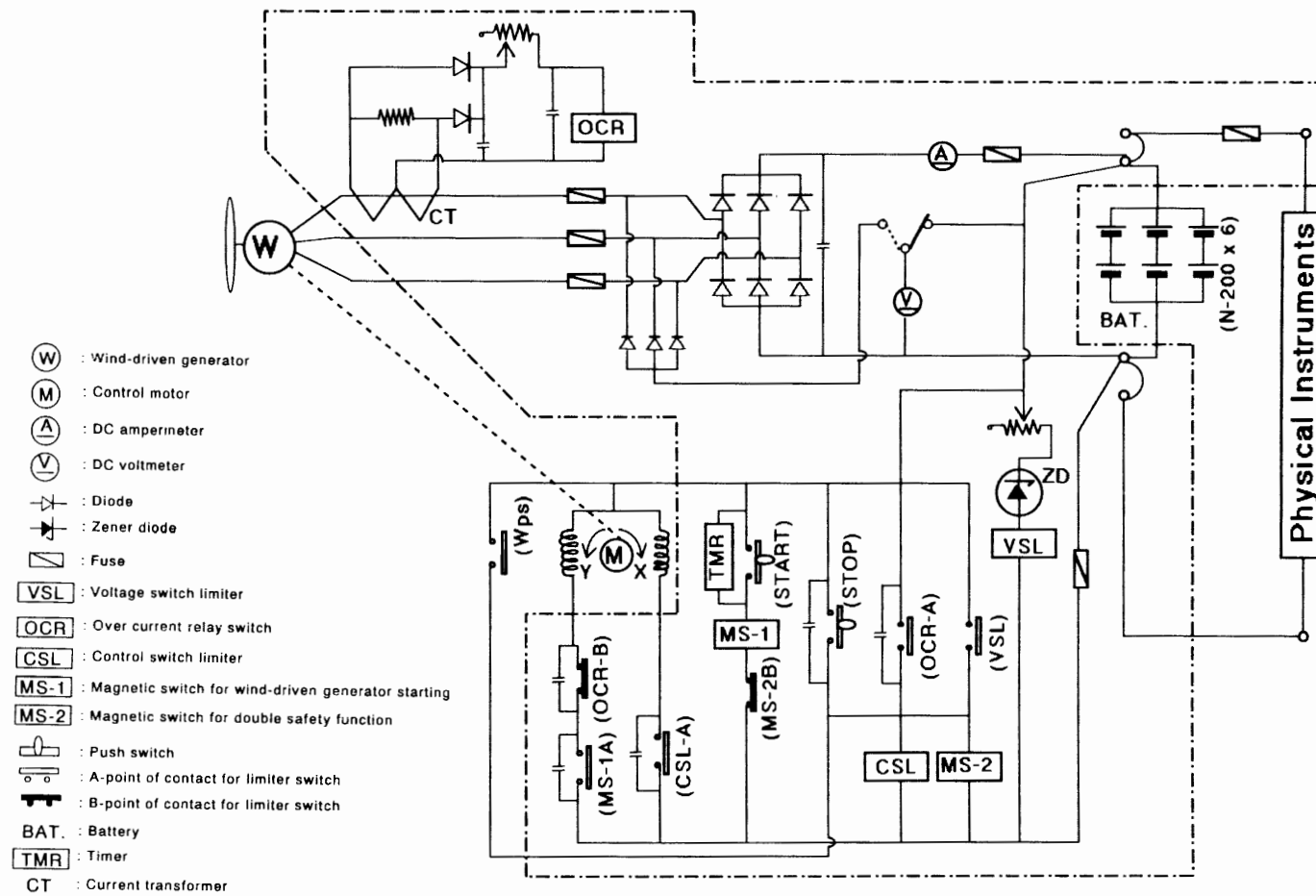


図 6 風力発電機プラントのシステム構成図
 Fig. 6. System configuration of the wind-driven generator plant.

図6に示すZDには、2次電池(BAT.)の端子電圧が30Vを越えると導通する規格値のツェナーダイオードが用いられている。(イ)充電が進みBAT.の端子電圧が30Vを超過するとZDが導通し、電圧制限継電器VSLのコイルに電流が流れVSLのA型接点が閉じる。(ロ)VSL-A接点が閉じると、風力発電機の動作制御継電器MS-2と回路制御継電器CSLのコイルに電流が流れ、MS-2のB型接点を開放し、同時にCSLのA型接点が閉じる。(ハ)CSL-A型接点が閉じることにより、制御モーターMはX方向に回転する(ロ項のMS-2B接点の開放は、制御モーターMをY方向へ回転させる回路が開回路であることを保証する)。(ニ)制御モーターMがX方向へ回転すると、図6の破線で示すワイヤーロープが巻き上げられ、風力発電機の尾翼取り付け部を強制的に折り曲げて、プロペラ面と風向が平行になるように動作して発電機能が停止する。(ホ)風力発電機の発電機能は、6時間ごとに5分間の接点を閉じるタイマー信号(TMR)で自動的に復帰するか、あるいは、押しボタンスイッチ(START)により手動で復帰させることができる。発電機能の復帰動作は、タイマー装置(TMR)または手動スイッチ(START)が導通することにより、風力発電機の動作制御継電器MS-1に電流が流れ、MS-1のA型接点が閉じる。(ヘ)MS-1Aが閉じることにより、制御モーターMはY方向に回転する。(ト)制御モーターMがY方向に回転すると、尾翼取り付け部の折り曲げに作用しているワイヤーロープが巻きもどされてプロペラ面と風向が対面しプロペラが回転して発電機能を回復する。

② 過電流防止機能

過電流防止機能は、主回路の短絡事故、あるいは、強風や猛烈な嵐時にシステム安全機能が不具合で主回路に過電流が流れる事故などに対処して、プラントの破損を防ぐ安全対策である。図6に示す変流器CTを介して過電流を感知すると過電流制御継電器OCRが働き、OCRのA型接点が閉じ、B型接点が開放される(OCR-B接点の開放は、制御モーターMをY方向へ回転させる回路が開回路であることを保証する)。このOCRは、風力発電機からの主電流が約34Aを越えると動作する。OCRのA型接点が閉じることにより、風車発電機の動作制御継電器MS-2と回路制御継電器CSLのコイルに電流が流れ、MS-2のB型接点を開放し、同時にCSLのA型接点が閉じ、この後、過充電防止と同様な順序で安全機能が動作して、制御モーターMをX方向へ回転させ風力発電機の発電を停止させる。発電機能の回復は、①項の過充電防止機能の(ホ)から(ト)と同様の過程で行われる。

③ 対強風時における安全機能

システムには、風力発電機設備の設計上の安全値を越える突風・強風などの安全対策として図6に示す風圧スイッチWpsが具備されている。風圧スイッチWpsが動作すると、動作制御継電器MS-2と回路制御継電器CSLのコイルに電流が流れ、以後、①項と同様な順序で安全機能が働き風力発電機の動作を停止させる。風圧スイッチWpsは、風速が20-25m/s有効に働く接点スイッチである。

④ その他

WV-15G 型風力発電機プラントの安全制御は、既に説明してきたように、ブレード取り付け部の可変ピッチ機構による自動制御機構（風速 11-30 m/s の範囲で有効に動作する）と制御モーターの回転力を利用しての機械的機構による自動安全装置（過充電防止策、過電流防止策、対強風策）があるが、これらの他に手動伝道装置（hand gear）も具備されている。手動伝道装置では、風向とブレード回転面との角度を 0-90 度までの任意の角度に設定できるので、風車発電機の点検・調整作業または各種性能試験を行う場合に有効である。この装置は、風力発電機のタワー下部に取り付けられた小箱の中に組み込まれ、回転歯車、回転心棒、スプロケット付きのワイヤロープ（180mm）および手回し用取っ手（クランク）などで構成される。

3.2.2. 風力発電機の性能試験

JARE 用に選定した風力発電機の実性能を確認することを目的に、電動機で WV-15G 型風力発電機を回転させて、その出力を測定する手法で各種特性試験を実施した。図 7 は無負荷試験の結果で、白丸は発電機の R-S 間の線間電圧（交流出力電圧: Eac）、黒丸はシリコンダイオードにより全波整流した直流出力電圧（Edc）を示している。直流出力電圧（Edc）と交流出力電圧（Eac）の関係は、 $E_{dc} = (E_{ac} - E_{si}) / \alpha$ の関係式で表される。ここに、Esi はシリコンダイオードの電圧降下、 α は交流電圧と直流電圧の整流変換係数である。3 相全波整流の α 値は 0.74、この整流体の Esi 値は約 1.5 V して与えられるので、図 7 に示す WV-15G 型風力

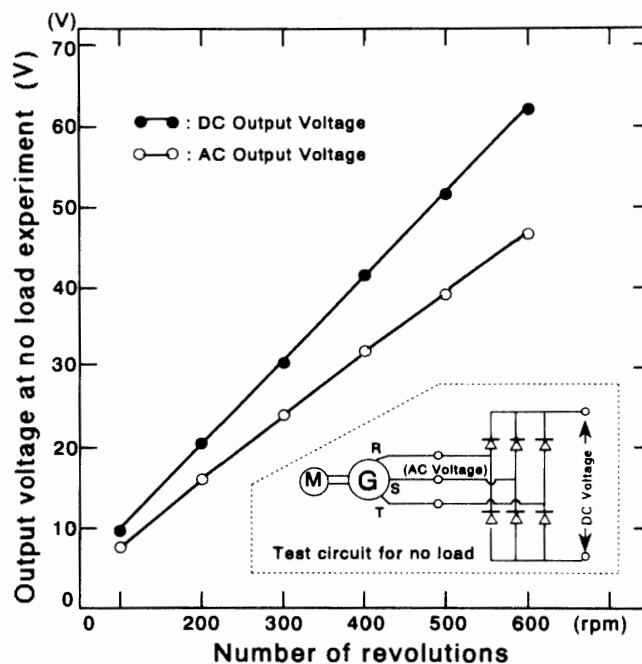


図 7 WV-15G 型風力発電機の無負荷特性

Fig. 7. Characteristics without load of wind-driven generator (WV-15G type).

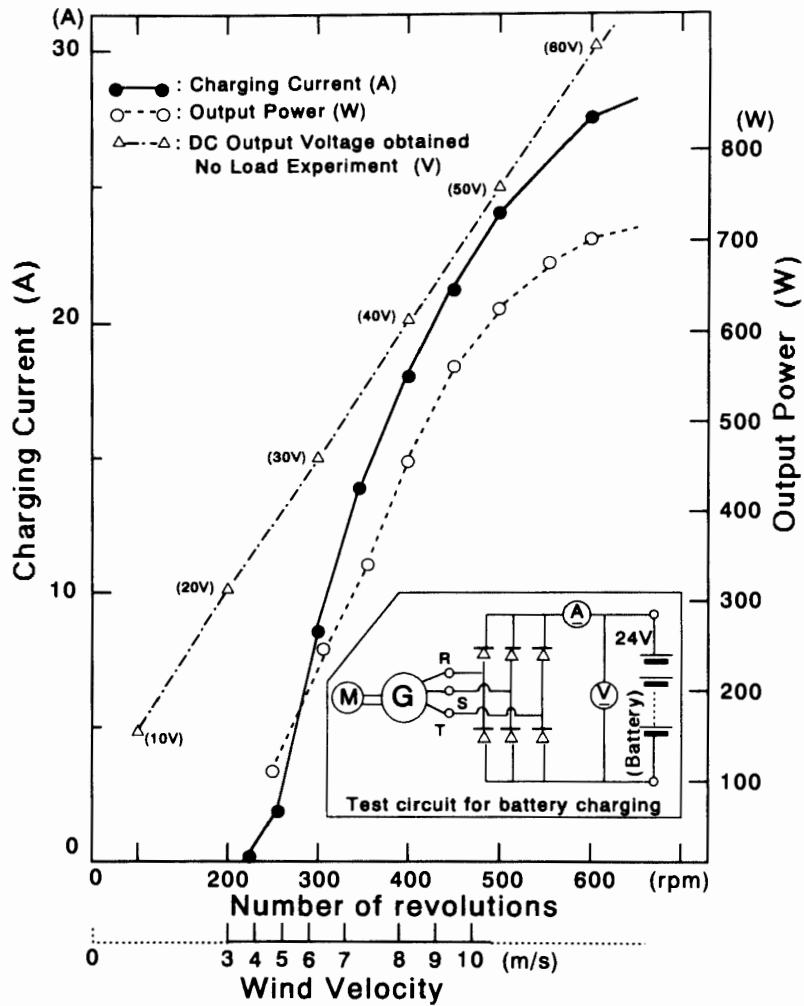


図 8 WV-15G 型風力発電機の充電特性

Fig. 8. Characteristic curve of the wind-driven generator for battery charging.

発電機の無負荷特性は、直流出力電圧 (E_{dc}) と交流出力電圧 (E_{ac}) の関係式をほぼ満足している (例えば、回転数 600 rpm; $E_{ac} = \sim 47$ V, $E_{dc} = \sim 62$ V. 回転数 300 rpm; $E_{ac} = \sim 24$ V, $E_{dc} = \sim 30$ V). このことは、実験回路とシリコン整流体が正常であると評価される. 図 7 の破線で囲んだ部分に示す実験回路に、蓄電池または抵抗負荷を接続して発電機の充電特性と抵抗負荷時の出力特性を調べた.

図 8 に充電特性試験の実験回路とその計測結果を示す. 横軸には発電機の 1 分間の回転数 (rpm) が示されるが、その下段にスイスエレクトロ社の資料に基づいた発電機の回転数に相当するおよその風速の値 (m/s) も参考として付記してある. 縦軸には充電電流 (A) と直流出力 (W) の大きさを目盛り、それぞれの計測値は黒丸と白丸で示される. 充電特性試験の結果は、発電機の回転数が約 220 rpm (風速 ~ 3.8 m/s に相当する) に達した時、僅かに充電電流が流れ始め、回転数が約 250–480 rpm (風速約 4.5–10 m/s) の範囲で直流出力がほぼ直線的に増加している傾向が見られる. また、風速が 10 m/s と想定される回転数 480 rpm では、約

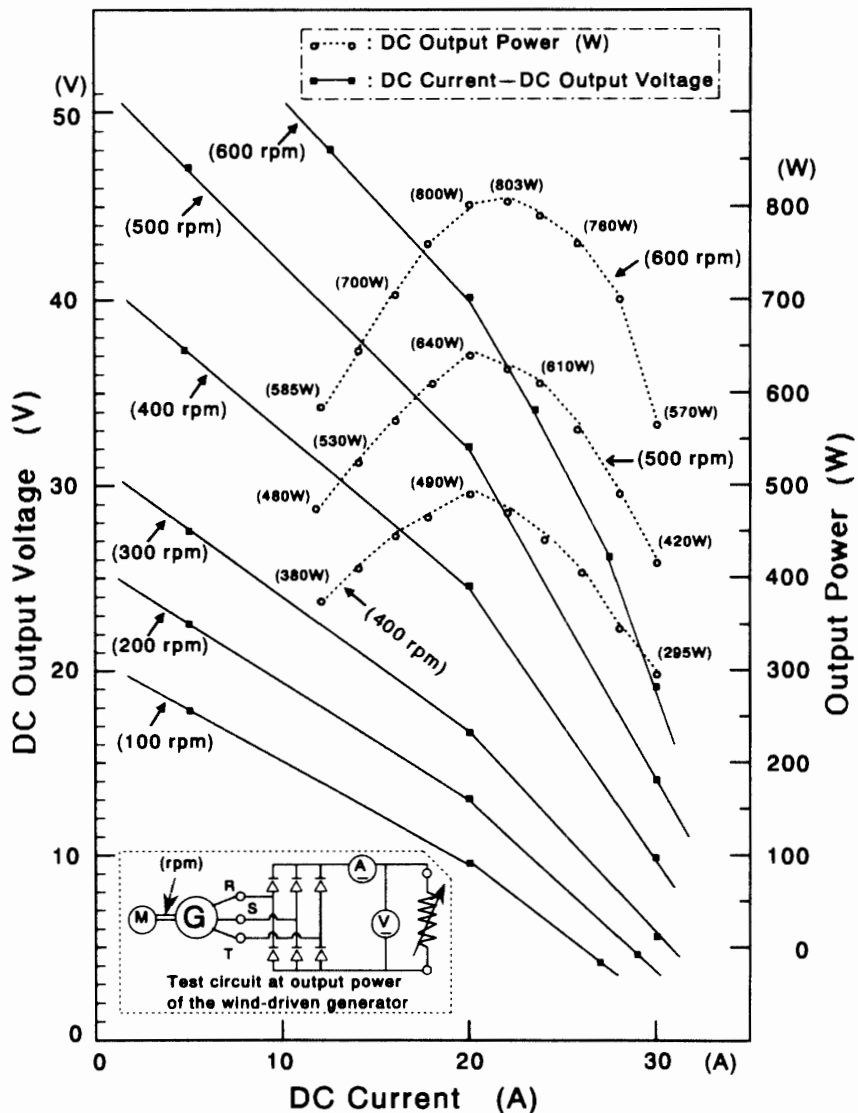


図 9 WV-15G 型風力発電機の抵抗負荷特性

Fig. 9. Characteristics of output power obtained by resistive load experiment for wind-driven generator.

580 W の直流出力が計測された。

抵抗負荷時の出力特性試験の結果を図 9 にまとめた。実験は図の左下隅の破線で囲まれる部分に示す実験回路で行った。電動機 M により発電機の回転数を 100 rpm ごとの間隔で一定に保持しながら、抵抗負荷の可変に応じた出力電流 (A) と出力電圧 (V) の関係を計測した。図の黒丸の実線は、回転数別に見た出力電流—電圧の特性である。白丸を太い破線で結んだ特性曲線は、電流と電圧の関係から求めた回転数ごとの直流出力の特性曲線である。この出力特性曲線によれば、回転数が 400 rpm (風速は約 8.2 m/s に相当する), 500 rpm (風速約 11-2 m/s) および 600 rpm (風速 ~20 m/s) における出力の最大値は、それぞれ約 490 W, 640 W および ~800 W である。

表 2 風力発電機の出力特性の比較

(我々の実験による出力値とメーカーの公表する出力値)

Table 2. Comparison of the output characteristics of wind-driven generators (comparison between the output value obtained by our experiment and the published value of the ELEKTRO company in Switzerland).

Number of revolution (rpm)	Wind velocity (m/s)	Output power obtained by experiments (W)		Characteristics (W) of output power (ELEKTRO has been published)
		battery charging	resistance circuit	
200	3			70
230	4			100
260	5	110		175
280	6	195		320
320	7	280	340★	590
380	8	410	450	860
420	9	510	520	1050
500	11	620	640	1220

★ : at 300rpm

被試験機の発電性能 (図 8 および図 9) は、スイスエレクトロ社が提示している WV-15G 型風力発電機の風速一回転数・出力特性より劣っている。表 2 には、ここでの特性試験から得た発電機の回転数 (rpm) に対する出力容量 (W) と、スイスエレクトロ社が示す WV-15G 型風力発電機の性能 (図 5) とを比較してまとめた。表 2 によれば、実験で求めた計測値は、図 5 の WV-15G 型風力発電機の風速一回転数・出力特性のおよそ 1/2 である。この実験値とカタログ提示値の性能の違いについて発電機製作メーカーに問い合わせた。スイスエレクトロ社は、発電機の電機子方式の違いがここでの性能差異の主たる原因であるとの見解を示した。すなわち、スイスエレクトロ社がカタログ等で提示している性能は、界磁式 WV-15G 型発電機 (ソレノイドを流れる電流によって作られる磁界を回転導体が横切り起電力をえる方式) の特性性能であり、これに対して JARE 用に供給した WV-15G 型風力発電機の電機子方式は永久磁石式発電機であるとの釈明回答がもたらされた。永久磁石式 WV-15G 型発電機は、界磁式に比べて低温性能が 10-25% 良いという見積もりがスイスエレクトロ社の技術資料の見解である。著者等は、発電機を用いた蓄電池充電の自動制御には、自動車蓄電池の充電システムなどに見られる界磁式発電機の方が充電制御が容易であると考えていたが、スイスエレクトロ社では「南極域 (約 -55°C の低温環境) での使用」という運用場所を重要視した結果、界磁式発電機よりも低温特性に優れ、また、北極域で既に運用実績がある永久磁石式発電機を JARE 用風力発電機に供給したとの理由を述べた。発電機の性能試験の結果から、発注側と受注側の思惑の違いが露見することになったが、① 南極への船積み輸送に関する物資集積のタイムリミット、② 永久磁石式 WV-15G は低温特性が優性、③ 永久磁石式 WV-15G は北極域の使用で安全機能システムの動作が確認されている (① は発注側の事情、② と③ は受注側の事情)、などにより、JARE が南極に搬入した風力発電機は永久磁石式の

風力発電機プラントであった。

3.2.3. 風圧スイッチ (Wps) の除去

図6の機構図で示した WV-15G 型風力発電機プラントが具備する各種安全機構は、著者のひとり鮎川の立ち会いの下に国内試験を行い正常に動作することを確認した。しかし、風力発電機の尾翼部を機械的に屈伸させることでシステム機能の安全運用を自動制御する方法は、南極域における無人運用を想定すれば、その復帰動作の確実性に不安が残った。著者等は、自動車などの蓄電池充電システムで取り入れられている電気回路による自動的な充放電制御法へのシステム変更を検討した。それには、搬入された風力発電機が永久磁石式であったことから電池電圧を監視しながら自動的に充放電を調整する自動電圧調整器などの設計製作が必要であった。

著者が WV-15G 型風力発電機プラントに取り付けようと考えた安全回路は、図10に示すようなトランジスタによる差動増幅回路を応用した高低電圧検出リレー回路ある。この電圧比較回路で、電池電圧を監視しながら適当な定格値のサーモスタットとを組み合わせることで観測小屋などの室内温度を自動制御させようと考えた。しかし、トランジスタ差動増幅回路の製作とこれに伴う制御方式の全面的な改造作業およびその動作確認に要する実験作業の日程は、時間的・労力的・予算的に対応が不可能な状況（南極への船積み輸送に関する物資集積のタイムリミットと、安全機能システムの全面的な改造作業の日程が整合しない）があり、安全制御システムの根本的な改良を断念した。

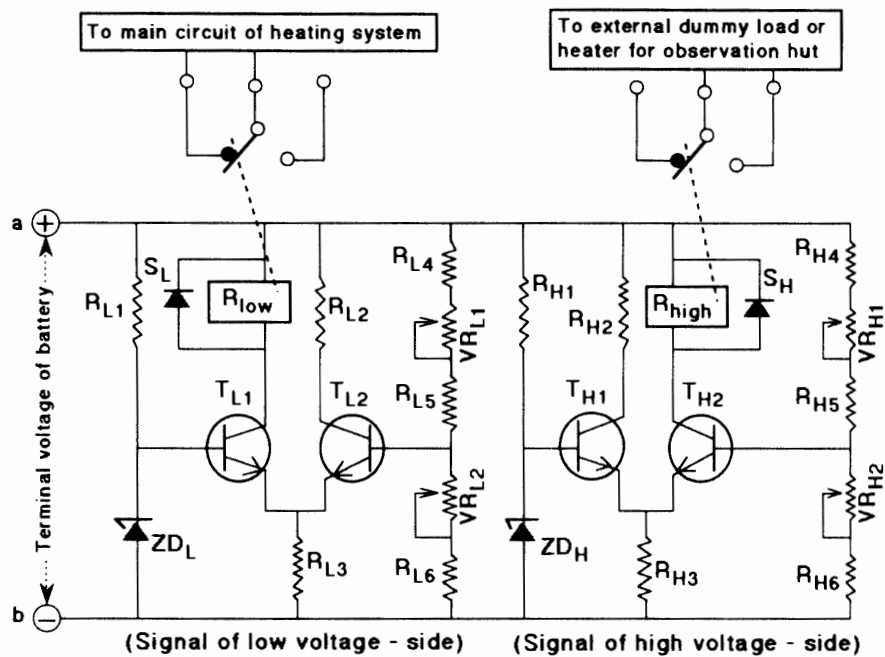


図10 高低電圧検出リレー回路の一例

Fig. 10. An example of a relay circuit for detecting high-low voltage.

そこで、尾翼部の機械的屈伸による復帰動作の不安材料を減少させる方向として、プラントの安全運用が損なわれないことを条件に風力発電機の尾翼部が、機械的に屈伸する動作の機会を少なくすることを考えた。その方策のひとつがプラントが具備する風圧スイッチ (Wps) の除去である。風圧スイッチ (Wps) を除去しようと考えた根拠は以下の通りである。

- ① 風圧スイッチ Wps は、風速が 20-25 m/s で有効に働く接点スイッチであるが、山田 (1974) および佐々木 (1974) などの報告によれば、無人観測施設の設置予定地域で予想される風速は ~20 m/s に達することは稀である。また、風速が 20-25 m/s に達したとしてもその継続時間は瞬間的であることが予想される。
- ② 従って、Wps による安全制御機構を取り外しても、風力発電機への過負荷は風速の高まりに応じてブレード面が傾く可変ピッチ機構により解消される可能性が高い。
- ③ もし、② 項の可変ピッチ機構によっても風力発電機が過負荷状態に陥るような強風が継続するような事態が発生した時には、過電流防止機構 (OCR) によりプラントの安全装置が動作し風力発電機の発電機能を停止させるであろう。
- ④ プラントの安全確保が風圧スイッチ (Wps) 以外の防止機能が働くことによって未然に防げる可能性が高ければ、風圧スイッチ (Wps) の必要性は低い (風力発電機の尾翼部の機械的な屈伸は、寒極地での運用では復帰動作に信頼性が危惧される)。
- ⑤ 尾翼部の復帰動作に確実性が高いことを仮定しても、プラントの安全装置が働いて風力発電機の発電が一旦停止されると、その自動復帰の動作開始は 6 時間ごとに繰り返し発信しているタイマーからの接点信号を待つ必要がある。したがって、プラントが自動復帰するタイマー信号の待ち時間の最大は 6 時間後であり、もしも、風圧スイッチ Wps が動作するような強風 (風速約 20 m/s 以上) と、タイマー信号の発生タイミングが周期的に合致するような事態が繰り返されるようなことが起これば、風力発電機は停止状態を持続し続けることになる。このことは、電力供給源を絶たれた蓄電池が完全放電・凍結し、結果的に科学観測機器類の動作停止につながる。

南極大陸氷床上に設置した超高層科学観測用無人観測施設の初期運用では、電力供給プラントに組み込まれた自動制御機構の全体的な動作が必ずしも良好に機能せず、順調に観測記録が取得されたわけではなかった。自動制御機構の動作不良の原因は、観測小屋の室内温度と保温制御機構、電池温度と充電効率、電池容量と負荷容量、風速と変動およびその頻度、降雪と日照と外気温の関係、無風状態の発生タイミングと継続時間などなどの様々な事柄が、複合的・相乗的に影響し合うために明確に特定することが困難である。市販の風力発電機プラントを利用した超高層無人観測施設の南極での実運用では、観測小屋の爆発大破事故をはじめとして種々のトラブルを繰り返し経験したが、トラブルの多くは、風力発電機プラントが具備していた尾翼部の屈伸による機械的な制御機構の動作不調に誘因されたものと考えられた。JARE では、プラントの自動制御を機械的な制御方式から電気的なシステム制御の方式への改良が検討された。自動制御方法の改良作業は、最終的には JARE-19 が蓄電池の充放電を電圧比較回路と自己保持継電器との組み合わせにより自動制御する方法に改良し、

図 6 で示した風力発電機プラントの自動制御を撤去した (1978 年 9 月 6 日)。この改良以後、超高層用無人観測施設は JARE-19 から JARE-20 に観測を引き継いだ 1979 年 1 月 11 日まで順調に稼働して地磁気 H および D 成分、地磁気脈動 X および Y 成分、施設管理データ (電池端子電圧、風力発電機の発電電圧および室温などの監視データ) を正常に記録した (国立極地研究所, 1977-1979)。このことは、南極大陸氷床面上における無人観測施設の浮動充電設備として、市販の風力発電機と低温性能に優れた蓄電池とを組み合わせた電力供給システムが、充放電制御方式を改良することにより十分機能する可能性のあることを示唆している。留意すべき点は、無人観測施設を敷設した後の保守・運用の管理を適切に継続しつづける観測体制が重要である。IMS 期間中に確立した JARE の超高層無人観測施設の電力供給システムの概要を 3.3 節に述べる。

3.3. IMS 期間中に確立した JARE の超高層無人観測設備の電力供給系統 (蓄電池の型式と充放電方式の改良)

無人観測の観測機器や記録装置などの電源は、充放電が可能な二次電池を使用した。市販されている一般的な二次電池には鉛蓄電池やニッカド電池 (Ni-Cd cell) が知られるが、JARE の超高層無人観測施設では、低温特性に優れ比較的低廉な N-200 型鉛蓄電池 (ユアサ電池株式会社製) を選択して用いた。ユアサ N-200 型鉛蓄電池の低温特性は、低温下で 30 A 連続放電を継続させた時、 -20°C では約 3 時間、 -30°C では約 2.3 時間まで電池機能が保証され (図 11 参照)、また、その電解液の凍結温度はユアサの技術資料によれば -35°C である。N-200 型蓄電池の形状と重量は、 $521\text{L} \times 278\text{W} \times 267\text{H mm}$ および 57.5 kg であり、南極の内陸部における作業性を考えた時、隊員一人が人力で取り扱える限度に近い形状と重量である。直流電源系統は、この N-200 型鉛蓄電池を 2 直列—3 並列に連結し、電気容量が約 600 AH で、端子電圧が 24-29 V の範囲で運用する制御回路を付加して構成した。無人観測システムの開発では、安価で低温特性に優れた蓄電池の調査・選定作業と並行して、蓄電池の充放電効率の良否に影響する低温環境からの防御対策として電池を保温する工夫をしている。

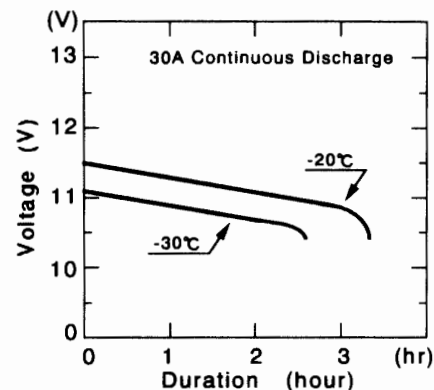


図 11 鉛蓄電池 (ユアサ N-200 型) の低温特性
Fig. 11. Temperature dependence of discharge
(battery type: YUASA N-200).

UMUGO (無人観測 1 号装置/JARE-18) では、図 3 のシステム概要で示したように観測小屋の床下に蓄電池を設置してその保温対策を考えた。この床下への電池収納は、南極大陸の内陸部への物資輸送の軽減をも配慮した電池の保温対策であったが、① 風力発電機プラントの安全装置が動作不良を起こしたことにより、② 蓄電池が過充電となり、③ 過充電による蓄電池からの発生水素ガスが観測小屋に充満し、④ この水素ガスに継電器等が動作する際に発生した火花が引火して、⑤ 観測小屋が爆発大破する事故を起す原因となった。しかし、一方で、この UMUGO システムの爆発大破事故の経験は、無人観測の敷設地域が風力発電機を利用した電力供給源で無人観測の電力需要を十分に賄える風況環境にあることを教示した。

NDUGO (無人観測 2 号装置/JARE-19) では、観測小屋と蓄電池を分離してそれぞれを別系統で保温し、さらに、蓄電池の過充電防御対策として余剰電力をダミー負荷で外部へ放出させること、電池保温箱内からは継電器ほか火花発生源の可能性のある電気回路の撤去などのシステム改造が施された。すなわち、NDUGO では、蓄電池が観測小屋と切り離なされて電池保温箱に収納され、蓄電池の端子電圧や観測小屋の内部温度を監視するセンサー信号の指示に連動する継電器の働きによって、電池保温箱内の板状ヒーターの容量が自動制御されるシステムが構成された。このシステム構成により、蓄電池からの水素ガスの発生と自動制御用の継電器接点の火花発生との隔絶が計られた。

科学観測機器および記録装置は、電圧変動の少ない安定した電力供給が要求されることから各観測機器側でそれぞれ DC/DC コンバーターを設けて N-200 型蓄電池と接続される。2 直列—3 並列で構成した N-200 型蓄電池の電源容量 (600 AH) は、科学観測機器類の消費電流の総和が約 10 A と見積もられていたもので、もしも、無風状態が継続して蓄電池への充電作用が全く行われなかったとしても、約 2.5 日間の観測が可能な容量で準備したものである。これは、無人観測の敷設地域が斜面下降風帯であることから、蓄電池に 2.5 日分程度の電源容量を見積もっておけば、2.5 日以内には無風状態が解消されて、風力発電機から蓄電池への電力の供給が再開されるであろうとの予測を勘案した容量値でもある。

図 12 は、IMS 期間中に確立した JARE の超高層無人観測設備の最終的な電力供給システムの自動制御回路である (国立極地研究所, 1977-1979)。図の破線で囲まれる A-circuit は、蓄電池の端子電圧が下限設定値 V_L (24 V) 以下に低下した時に機能し、B-circuit は上限設定値 V_H (29 V) 以上に上昇した時に機能する電圧比較回路を形成している。C-circuit に示される継電器の接点“(MAIN)”および“(TEMP)”は、A-および B-circuit で監視している電池の端子電圧と観測小屋の室内温度の制御設定値を感知して、充放電 (X-Y) あるいはヒーター回路 (V-W) の接続を変える。蓄電池 [BAT. (N-200×6)] とヒーター H_1 (180 W) および H_2 (180 W) は、電池保温箱内に配備され、その他の制御システムは観測小屋に設置されている。観測小屋に取り付けた保温用ヒーター H_3 の定格値は 250 W である。いま、図 12 のように継電器 MAIN (以後、継電器 M と称す) の接点“(MAIN)”が X 側で回路が放電モード

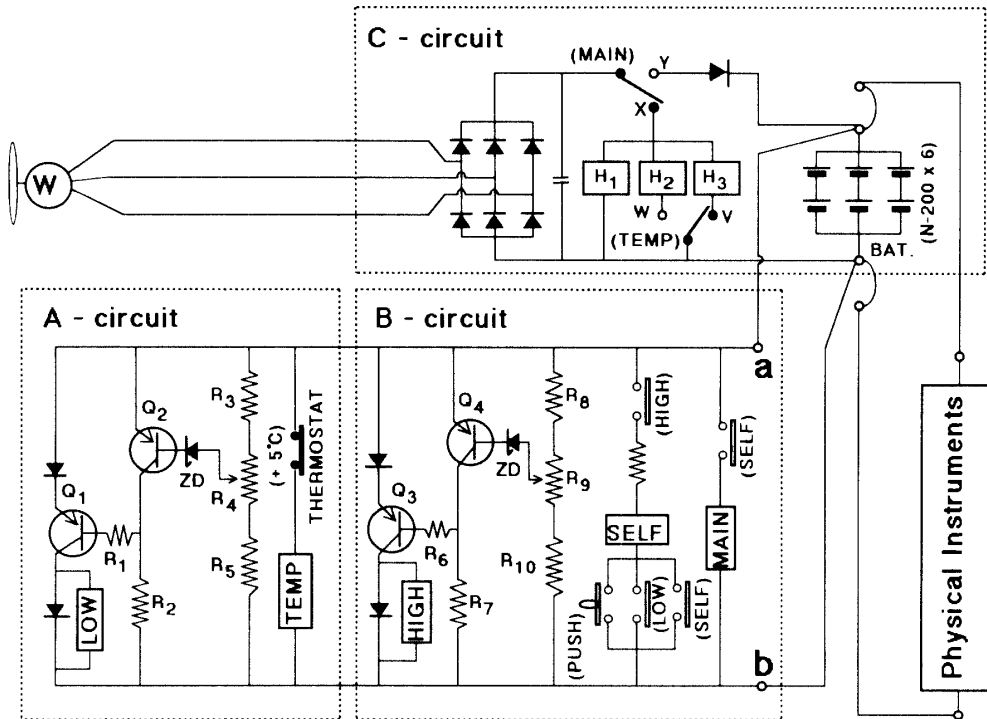


図 12 IMS 期間中に確立した電源システムの自動制御回路

Fig. 12. Automatic control circuit of power supply system established during IMS period.

である時、蓄電池の端子電圧は負荷容量に応じた時間経過で低下し、下限設定値 V_L (24 V) 以下になると継電器 **LOW** (以後、継電器 L と称す) が導通してその接点“(LOW)”が閉じる。この時、継電器 **HIGH** (以後、継電器 H と称す) の接点“(HIGH)”は既に閉じている状態であるから、継電器 L の接点“(LOW)”が閉じると同時に継電器 **SELF** (以後、継電器 S と称す) に電流が流れその接点“(SELF)”が閉じる。継電器 S の接“(SELF)”が閉じることによって継電器 M が導通し、その接点“(MAIN)”は X 側から Y 側に接続を変え電力供給システムは充電モードになる。電力供給システムが充電モード (Y 側) である時、風力発電機の発電出力が負荷の消費電力より十分に大きな値で時間が経過すれば、蓄電池の端子電圧は充電の進行とともに上昇する。充電が進行して、蓄電池の端子電圧が下限設定値 V_L (24 V) 以上に上昇すれば継電器 L の導通は解消されその接点“(LOW)”は開放になる。この時、継電器 S は自己保持されるので継電器 M の接点“(MAIN)”は Y 側を維持して充電モードが継続する。この状態で充電が進み、蓄電池の端子電圧が上限設定値 V_H (29 V) 以上に上昇すると、継電器 H の導通が解消されてその接点“(HIGH)”が開放される。継電器 S は、継電器 H の接点“(HIGH)”が開放されると、導通が解かれその接点“(SELF)”も開放になる。継電器 S の接点“(SELF)”の開放は、継電器 M の導通を解消し、その接点“(MAIN)”が X 側に変わり電力供給システムが放電モードになる。このように、改良された無人観測システムの電源システムでは、充電が十分に行われ、電池電圧が上限設定値に達すると蓄電池と風力発電機が切り

離され、発電機出力は暖房用ヒーターで消費し、これに対して、蓄電池の放電が進み端子電圧が下限設定値に達すると、暖房用ヒーター回路が遮断し、風力発電機は蓄電池に接続されて充電が開始される。この繰り返しサイクルで電源系統は自動制御される。なお、制御回路が放電モード(X側)である時、観測小屋の室内温度が $+5^{\circ}\text{C}$ を越えると、サーモスタットと継電器 **TEMP** の動作でヒーター回路が H_3 (観測小屋: 250 W) から H_2 (電池保温箱: 180 W) に切り替わり、電池保温箱の暖房が $H_1 + H_2$ (360 W) に強化される。また、B-circuit の (PUSH) スイッチによるマニュアル操作は、継電器 H が導通している条件の下(電池端子電圧が上限設定値 29 V 以下) で有効である。この充放電自動制御法では、弱風日など風力発電機の発電出力が小さい期間には、蓄電池が十分に充電されないため充電モードが長時間継続し、暖房用ヒーターへの通電が閉ざされ、観測小屋や電池保温箱などの室内温度が低下する可能性がある。

3.4. 観測小屋と電池保温箱

図 13 は、南極大陸氷床上の A1 点に建設された超高層無人観測施設の景観写真である。図の向かって右側に風力発電機とその鉄塔、左後背部に観測小屋と電池保温箱が配置され、中央部の後方に見える小さなアイスドームは観測用センサーの埋設地である。A1- 無人観測施設の配置と主風向との関係を図 14 に示した。図 14 に示される無人観測施設の位置関係は、

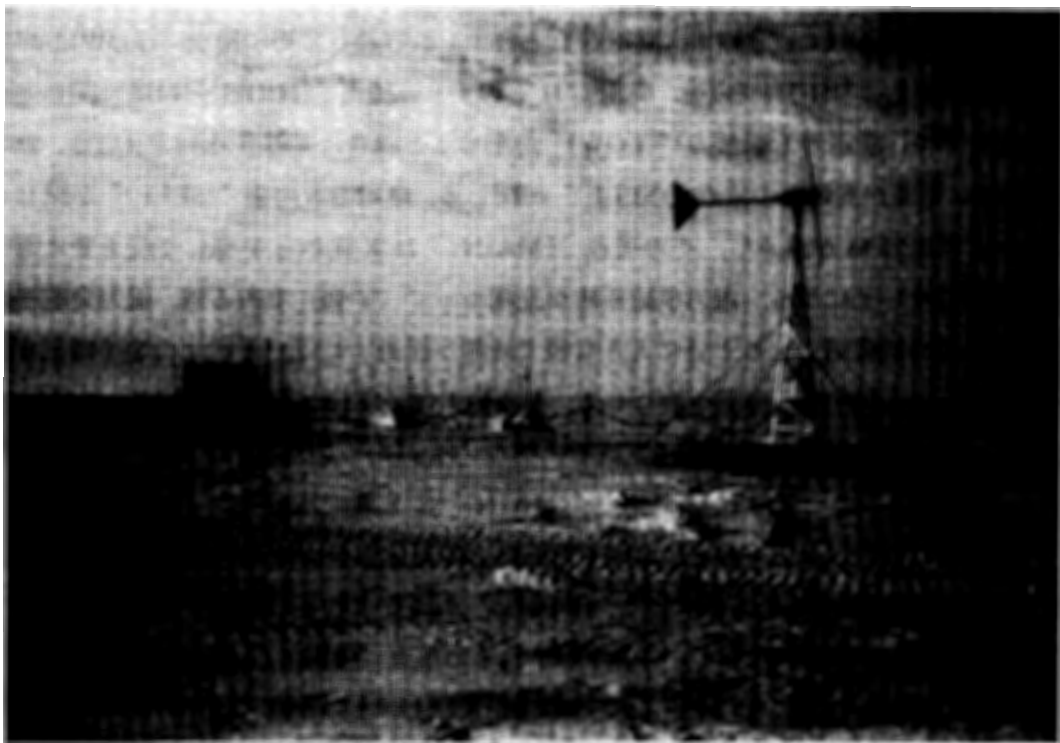


図 13 無人観測 A1 点の景観写真

Fig. 13. Unmanned observatory on the Antarctic ice.

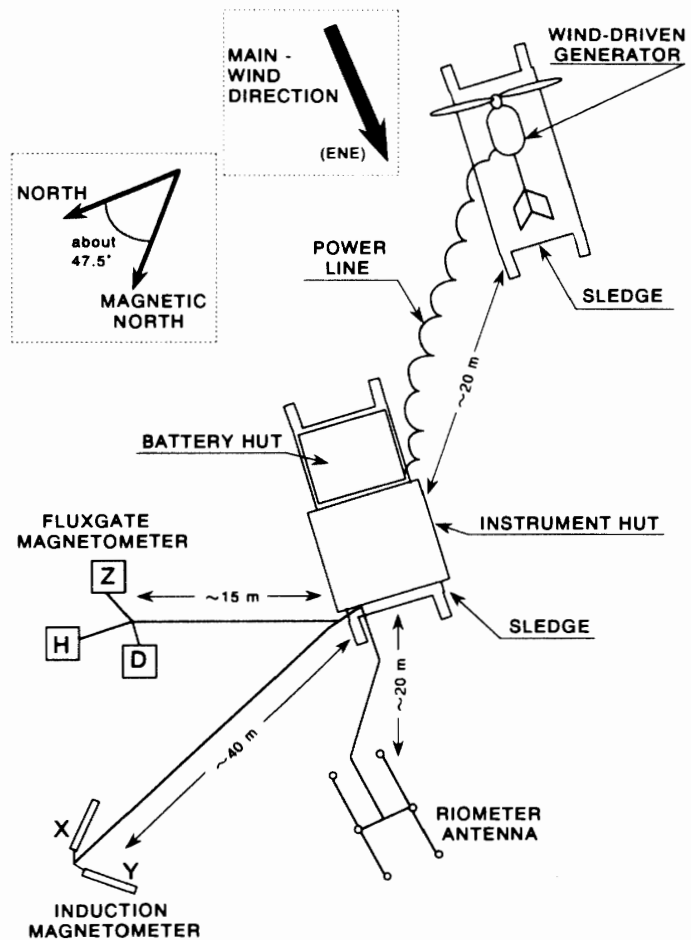


図 14 無人観測 A1 点の配置図

Fig. 14. A sketch map of the A1-unmanned observatory.

東北東からの風が卓越する A1 点の風向や、電氣的ノイズ発生源の可能性の高い風力発電機と観測器センサー類とを可能な限り離して配置してある。観測機器のセンサー部は、観測小屋の北あるいは北西方向へ 10 から数 10 m 離れた地点の雪面下に設置され、信号ケーブルで観測小屋内に導いてアンプ系および記録系に接続する。風力発電機は、観測小屋の東南方向約 20 m の地点に設置されている。センサー部を除く施設は、建設現場の整地作業量の軽減化と、施設の撤収あるいは観測点の変更（例えば、IMS 計画以後の継続観測に対処するため、維持保守に容易な H ルート沿いへの移設）などに備え中型 2 トンそりの上に建設された。

観測小屋は、硬質ポリウレタンの発泡断熱材を主たる構造材にして、その内外装を厚さ 0.8 mm の塩化ビニール鋼板で覆った厚さ 100 mm のパネル形式の部材で構成されている。その外形寸法は 1800 L×1800 W×2070 H である。壁パネルの 1 枚は、770 W×1600 H の外開きドアを出入口用に取り付け、また、天井パネルには非常脱出口として 500 mm 四方の内開きドアを取り付けた。図 15 に観測小屋の構造概観図を示す。

電池保温箱のパネル部材は、内外装をベニヤ合板で覆った厚さ約 85 mm の発泡スチロール（断熱材）で構成され、その外形寸法は 1470 L×1320 W×665 H である。電池保温箱には、

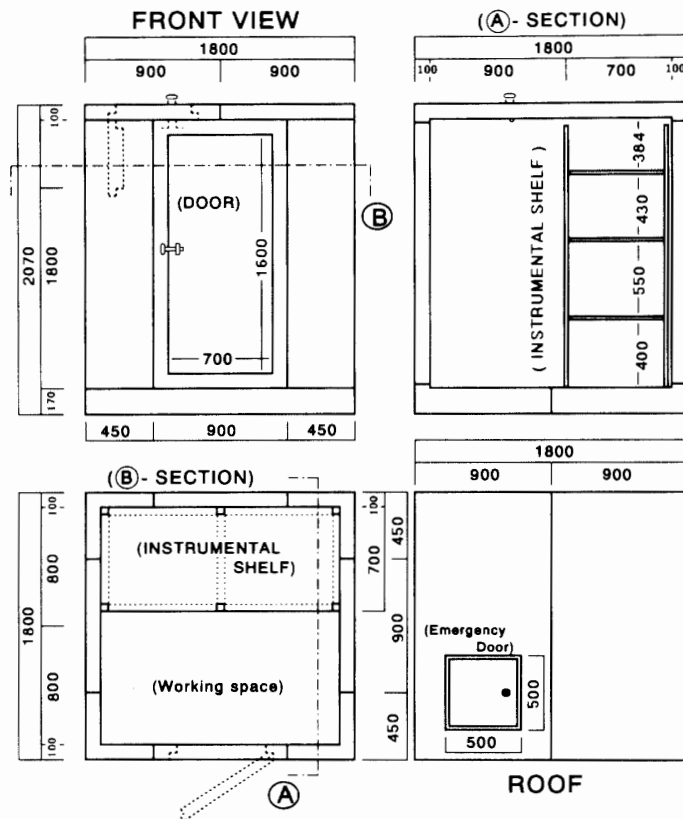


図 15 観測小屋の構造概観図

Fig. 15. A general view of observation hut structure.

水素ガスの排気対策として、床パネルに直径 50 mm の空気流通孔を、また、地吹雪の吹き込み防止を配慮したポリ塩化ビニールパイプ (直径 30 mm) 2 本を天井パネルに取り付けた。水素ガス排気対策の通気孔は、一方で電池保温箱内の暖房効果と相対するので排気扇などを設けない自然排気の形態をとっている。

3.5. 観測装置

観測機器と記録装置などの観測システム系は、観測小屋の内部に木材で適当な仕切りを設けた観測機器棚に据えつけ、また、そのセンサー部 (フラックスゲート磁力計、インダクション磁力計およびリオメーターのアンテナ系) は、地吹雪などによる静電気ノイズを避けるために雪面下約 1m に埋設した。時刻信号発生装置と磁気テープレコーダーは、環境温度が氷点下になると正常な動作を持続することが難しくなるが、これらを除く観測システムの機器類は -30°C の低温性能が設計上の仕様である。表 3 は、A1 無人観測拠点に敷設した超高層物理関係の観測項目の一覧表である。記録取得方法は、チャート記録と磁気テープによる記録の 2 種類があり、指定した記録速度で運用できれば、どちらも 3 カ月強の記録容量を有している。したがって、この無人観測施設の通年連続観測には、A1 点に 3 カ月ごとに内陸旅行隊を派遣して、記録システムのチャート紙および磁気テープを交換する必要がある。時刻信号は、 10^{-8} 秒/日の安定精度をもった標準時刻発生器によって与えられる。図 16 に観測システムのブ

表 3 超高層観測項目の一覧表

Table 3. Table of upper atmospheric physics observations conducted lay the unmanned observatory.

Observation Item	Instrument	Measure Frequency Range	Record Form	Record Speed
Geomagnetic Variations (H-, D-, Z-components)	Fluxgate Magnetometer	DC ~ 0.1 Hz	Analog magnetic tape recorder (R-950L)	0.019 cm/s
			Heat pen recorder (MC642-3B)	30 mm/hour
Geomagnetic Micropulsations (X-, Y-components)	Induction Magnetometer	0.001 ~ 2.5 Hz	Analog magnetic tape recorder (R-950L)	0.019 cm/s
Cosmic Noise Absorption	Riometer	30 MHz	Analog magnetic tape recorder (R-950L)	0.019 cm/s

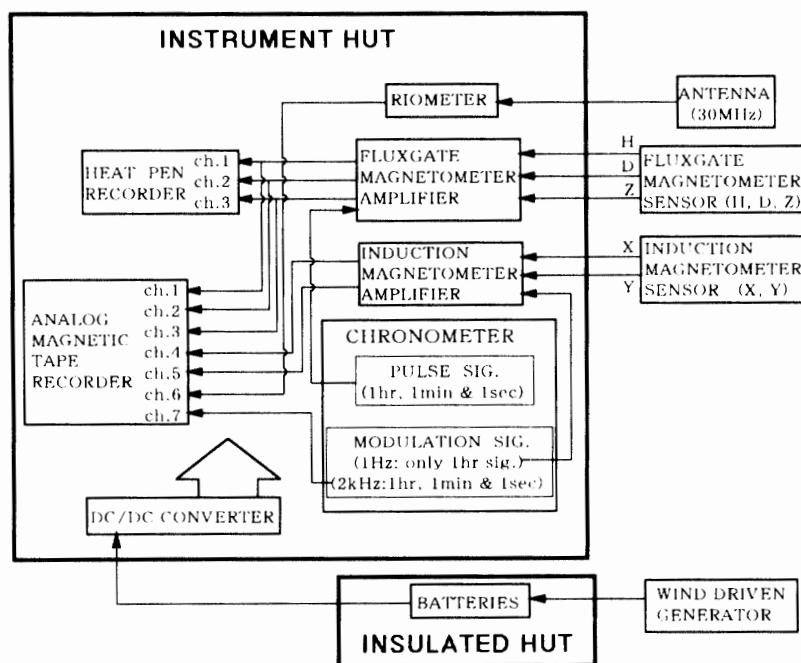


図 16 観測機器類のブロック系統図

Fig. 16. Block diagram of scientific equipment at the unmanned observatory.

ロックダイヤグラムを示す。

3.5.1. 超高層用科学観測機器

(1) フラックスゲート型磁力計

地磁気変動観測に用いた磁力計は、低温性能や回路部品の高信頼性に留意した無人観測用の Model 768 ラックスゲート型磁力計 (株式会社測機舎製) である。この磁力計の主要部は、密閉型円筒架台 (水平セットのレベル調整が可能) に納められた 3 方向 (X 軸・Y 軸・Z 軸)

に直交する三つのセンサー，センサー駆動用周波数発振器，位相調整器および直流増幅器などで構成される．南極大陸氷床上での無人による観測計画であることから，消費電力の軽減化，電源変動の許容範囲，動作温度範囲，信号ケーブルの耐寒性および設置作業の容易性などの仕様を厳密に規定した．無人観測仕様の Model 768 フラックスゲート型磁力計の性能概要を以下に示す．

測定要素: H 成分 (南北変動成分), D 成分 (東西変動成分), Z 成分 (鉛直変動成分)

測定感度: 4 nT/mm

測定範囲: 2000 nT/5 V

消費電力: +24 V, 180 mA

電源変動の許容範囲: +20 ~ +33 V

(運用電源電圧は, +12 V, -12 V, +5 V の 3 系統; 蓄電池の端子電圧 ~ +24 V を DC/DC により +12 V, -12 V, +5 V に変換している)

地球磁場打消回路: H および Z 成分とも 9500-55000 nT

(打消磁場選択ダイヤル付き: ① 55000-27050 nT ② 28246-18454 nT

③ 19000-14004 nT ④ 14317-11283 nT ⑤ 11485-9447 nT)

校正回路: (a) 手動切替 1000 nT (5 段切替スイッチ, 200 nT/1 段)

(b) 自動切替 -200 nT (外部からの接点信号を受けることにより 3 成分とも -200 nT の校正信号を出力する)

動作温度範囲: -30°C ~ 30°C

信号ケーブル: 24 芯ジュンフロンケーブル 100 m (-50°C 低温用ケーブル)

(2) インダクション磁力計

誘導型磁力計は, 2 本のピックアップコイルセンサーとその直流増幅器とで構成される．ピックアップコイルは, 高透磁率材料のミューメタル棒 (長さ約 1 m, $\mu \approx 24000$) に, 直径 1 mm の薄エナメル被覆銅線を約 10000 回巻き付けたもので, これをポリ塩化ビニール製の円筒ケースに入れてセンサー部を形成した．ピックアップコイルの出力感度は, 0.1 nT/s の磁場強度の変動が約 1.5 μ V の誘導電圧に相当する．ピックアップコイルセンサーは, 観測対象である地磁気脈動の周波数範囲 (0.001-2.5 Hz) で, ほぼ一様な出力感度を示す周波数特性をもっている．塩ビ円筒で被覆された 2 本のセンサー部は, 地磁気脈動変化の南北成分 (X 軸) と東西成分 (Y 軸) の変動がピックアップできるような方向に直交させて, 雪面下約 1 m に埋設した．鉛直変動成分については, 長さ約 1 m のピックアップコイルセンサーを雪面下 1 m 以下に垂直に設置することが困難であることから観測は計画されなかった．性能の概要を以下に示す．

測定要素: X 成分 (南北変動成分), Y 成分 (東西変動成分)

測定感度: 0.1 nT/s \approx 1.5 μ V

測定周波数範囲: 0.001~2.5 Hz

増幅器利得: 120 dB

消費電力: +24 V, 50 mA

測定温度範囲: -30°C ~ 30°C

(3) リオメーター

電離層を通過して地上に到達する宇宙電波雑音の強度変動を測定して、相対的に電離層電子密度の変動に関する情報を得ることを目的としてリオメーターを設置した。リオメーターは、低消費電力(+12 V/100 mA)、小型軽量化(大きさ: 20×20×20 cm, 重量: 3 kg)および設置作業の簡便化などが計られた La Jolla Sciences, INC. (米国) 製のカタログ製品を使用した。La Jolla 製リオメーターは、2本のダイポールアンテナキット(30 MHz 受信)とソリッドステート電機部品でコンパクト化した小型軽量の電気制御系で構成される。電気制御系の主要部は、RF 切替えスイッチ、受信回路、較正信号および駆動信号発信系(位相検出部、積分回路、RF 切替えタイミング発信部)などで形成される。較正信号は、4段階(-1, -2, -3 and -4 dB)の電圧レベル信号が毎正時に56秒間自動的に繰り返し出力され、システムの時刻マークを兼用している。アンテナは、2本の半波長ダイポールとともに約80 cmの垂直下方に長さ約5.5 mの水平反射用銅線を付属している。

3.5.2. 記録器と時刻発生器

記録系統は、磁気テープレコーダーとペンレコーダーとの2系統から成り、磁気テープレコーダーにはFMアナログ磁気テープレコーダー(R-950L型, TEAC製)を、ペンレコーダーには低温環境での収録機能が優れる放電型の熱ペンレコーダー(MC 642-3B型, 渡辺測器製)を用いた。

R-950L型磁気テープレコーダーは、テープ速度0.019 cm/sで収録する時、DCから2.5 Hzまでの範囲で収録感度が一樣な周波数特性をもち、また、そのS/N特性は終端部で40 dBが確保される。R-950L型磁気テープレコーダーの使用概要は以下の通りである。

使用磁気テープ: スコッチ 888 (1/2 inch, 4800 feet)

最大収録時間: 2133 時間 (記録テープ速度 0.019 cm/s)

消費電力: +24 V/2.5 A

記録チャンネル数: 7-チャンネル

(内訳: 1ch. 地磁気 H 成分, 2ch. 地磁気 D 成分,
3ch. 地磁気 Z 成分, 4ch. 地磁気脈動 X 成分,
5ch. 地磁気脈動 Y 成分, 6ch. リオメーター,
7ch. 時刻信号)

熱ペンレコーダーは、図16のブロックダイアグラムが示すように地磁気三成分変動を記録するために用いられ、数カ月ごとの記録紙交換および機器の保守点検時には超高層現象の

情報を観測現場で直接的に監視することができるので、作業時に機器の正常動作を確認するのに便利である。熱ペンレコーダーは、記録方法が熱ペンと記録紙間の放電を利用していることから、インク式レコーダーに比べて、低温環境における長期間の連続観測に適している。MC 642-3B 型熱ペンレコーダーの使用概要は以下の通りである。

有効記録紙幅: 250 mm

記録速度: 30 mm/h

記録紙の長さ: 80 m

最大収録時間: 2666 hours

動作温度範囲: $-30^{\circ}\text{C} \sim 30^{\circ}\text{C}$

消費電力: $+18\text{ V}/670\text{ mA}$, $-18\text{ V}/100\text{ mA}$

無人観測システムにおける時刻信号は、 $5 \times 10^{-8}\text{ s/day}$ の精度で長期間安定した振動を繰り返す水晶体 (FX-58X) の振動数 1 MHz を基準信号に用いた標準時刻発生器 (クロノメーター) から、安定かつ正確な時刻が記録システムに供給される。標準時刻発生器の出力は、リレーの接点信号、 $+5\text{ V}$ のパルス信号および周波数 1 Hz と 2 kHz の変調信号などの 3 種類の信号から成る。この 3 種類の出力信号は、図 17 に示す形態で標準時刻を表示する。消費電力は、通常の運用時に $24\text{ V}/0.25\text{ A}$ で、デジタル時刻表示 (ディスプレイ) を点灯させると約 6 倍の $24\text{ V}/\sim 1.5\text{ A}$ である。

3.5.3. 気象観測器

JARE-18 の超高層物理無人観測施設では、施設周辺の環境データ (気温、気圧、風向風速、湿度、雪温、日射量および観測小屋の内部温度) を取得する目的で自動自記気象計が設置さ


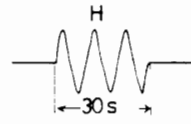

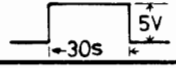

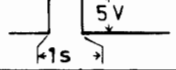
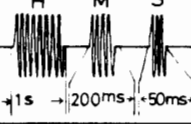

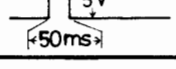
	Relay signal	Pulse signal	Modulation signal
Form of day signal	 make contact in 70 s	—	1 Hz (only hourly sig. service) 
Form of hour sig.	 make contact in 30 s		
Form of minute sig.	 make contact in 1 s		2 kHz (hr, min. & sec. signals) 
Form of second sig.	 make contact in 50 ms		
Remarks	load is less than DC 1A	—	out put level is variable in less than 2 V _{p-p}

図 17 標準時刻発生器の信号形態

Fig. 17. Standard time generator signal format.

表 4 気象観測項目の一覧表

Table 4. Table of meteorological observations conducted lay the unmanned observatory.

Observation item	Type of sensor	Range of measurement	Remarks
Wind direction & Wind velocity	Windmill type direction of wind anemometer	direction: 360° velocity : ~50 m	★ Record method : Digital cassette tape ★ Record volume : about 4 months (record it every just time) ★ Power consumption : 24V, 350mA (every just time) 24V, 1mA (ordinary) ★ Size of equipment : 300 x 300 x 300 mm ★ Weight of equipment : 7 kg
Temperature	Crystal type thermometer	-70°C ~ +30°C	
In the deep snow temperature	Crystal type thermometer	-70°C ~ +30°C	
Indoor temperature	Crystal type thermometer	-70°C ~ +30°C	
Atmospheric pressure	Crystal type barometer	750 ~ 1050 hPa	
Insolation	Crystal type pyrheliometer	0 ~ 100 cal/cm	

れている。この装置は、センサー部、データ変換部、データ収録部、電源部および観測柱などで構成される。センサー部は、図3で示したように、観測柱に取り付けられた、風向風速、気温および湿度センサーと、雪温測定用の雪面下の温度センサーがあり、また、観測小屋には、屋根上に日射計、室内に気圧計と室温測定用の温度センサーなどがある。これらの各種センサーからの信号は、データ変換部に導かれ、それぞれ定められたフォーマットのデジタル信号に変換され、標準時刻信号器からの時刻信号とともにデータ収録部に送られる。データの取り込みは、毎正時にカセット磁気テープレコーダーにデジタル記録される。表4に気象観測系のセンサーの種類と性能を示す。

4. 無人観測施設の開発と運用のまとめ

4.1. 超高層無人観測施設の全体構成

超高層物理無人観測施設の構成は、電力供給源としての風力発電機、蓄電池を保護する電池保温箱、観測機器や記録器などを設置する観測小屋および雪面下に埋設された各種センサー類から構成される。超高層科学観測の機器類は、フラックスゲート型磁力計、誘導型磁力計およびリオメーターの3種類である。観測小屋の内部温度は、板状ヒーターとサーモスタットとの組み合わせで余剰電力を利用して0°Cから30°Cに自動制御されるように基本設計された。しかし、南極での運用では実際に発電される電力と負荷との兼ね合いから、室温が+5°C以下である時に限り板状ヒーターに通電される仕組みに変更した。無人観測施設での観測データは、記録速度の遅いアナログ磁気テープレコーダーおよび熱ペン型チャートレ

コーダーで集録する。テープレコーダーおよびチャートレコーダーの記録容量は、記録速度をそれぞれ 0.019 cm/s および 30 mm/h で集録すれば約 3 カ月間である。したがって、通年連続観測データを取得するには、3 カ月ごとに磁気テープあるいはチャート紙を交換する必要がある。A1 点の無人観測施設の全体構成は図 14、観測機器類のブロック系統図は図 16 に示される。

4.2. 無人観測施設の運用経過概要

1977 年 1 月、実用無人観測施設 (UMUGO) の初号機が南極大陸氷床上の A1 点 (69°47'S, 41°35'E, 標高 1470 m) に設立された。無人観測 A1 点は、日本の南極観測の二つの有人観測基地である昭和基地 (69°00'S, 39°35'E) とみずほ基地 (70°42'S, 44°20'E) を結ぶ地磁気子午線上のほぼ中間点の南極大陸氷床上に位置する。この地域は、IMS 期間中に欧州共同体が打ち上げる科学衛星“GEOS”が静止する位置と、地球磁力線で結ばれるポイントに当たることが予想されたことから衛星高度と地上多点観測網との長期同時観測の実現が期待されていた。しかし、“GEOS”衛星が静止軌道にのらなかったため、衛星高度と地上多点観測網との長期的な同時観測は実現しなかった。一方、A1 点の超高層無人観測施設も、1977 年 2 月、運用開始約 1 カ月で観測小屋が爆発大破する事故を起こしている。爆発事故の原因は、過充電により蓄電池から発生した水素ガスにリレー接点が動作した時の火花が引火したものと推定された。蓄電池の過充電は、風力発電機の発電作用に十分な風況が A1 点付近に継続しつづけたことに対して、発電プラントの自動制御システムの機能動作が不調であったためであろうと考えられた。1977 年 5 月末から 8 月末までの約 3 カ月間は、試作無人観測装置 (PUGO) を A1 点で運用し無人観測を継続した。1978 年 1 月に A1 点に再建した無人観測施設 (NDUGO) では、蓄電池は観測小屋から分離され電池保温箱が新たに作られた。そして、風力発電機プラントの自動制御システムは、同年 9 月に電圧比較法による自動制御に改良された。IMS 期間中の超高層無人観測施設は、この風力発電機と蓄電池間の充放電システムの改良により長期連続観測の安定的な運用形態が確立した。その後、NDUGO は、IMS 計画の終了とともに南極における保守体制の確保が困難となり、その運用の継続が危ぶまれたが JARE-20 (1979 年) の越冬全期間と JARE-21 (1980 年) に引き継いだ 1980 年 1 月 7 日まで順調に稼働して A1 点での無人によるデータ集録に成功している。

4.3. 観測結果の概要

A1 点における無人観測データの集録は、JARE-18 の実用型無人観測施設 (UMUGO) により 1977 年 1 月 18 日から 2 月 20 日頃までの約 1 カ月が最初である。UMUGO は、爆発事故が発生する直前まで、初期の設計構想を満たす形で無人により観測データを良好に集録していた。UMUGO の爆発大破事故の発生日は、テープレコーダーの磁気テープ使用量とその集

録データの再生により 1977 年 2 月 20 日頃と判明している。JARE-18 では、A1 無人観測拠点を継続して確保するために 1977 年 5 月末に試作無人観測装置 (PUGO) を A1 점에設置して、南極大陸氷床上での無人によるデータ集録の現実的な対応を図った。PUGO は、日照が閉ざされた南極の厳冬期にあたる 8 月末までの約 3 カ月間、順調に稼動して地磁気三成分変動データを集録した。

JARE-19 は、電源系統に改良を加えた NDUGO を 1978 年 1 月 20 日に A1 점에設置して、25 日から無人による観測データの集録を開始した。しかし、観測開始直後から少なくとも 3 日間以上継続したと思われる無風または弱風日の存在により、風力発電機が発電機能を失して蓄電池が完全放電・凍結し、データ集録は不首尾であった。NDUGO は、1978 年 9 月に蓄電池の交換と電源系統の改良・再調整が行われ無人による観測を再開している。この時点より以降、NDUGO システムは 1980 年 1 月まで順調に稼動して、地磁気変動三成分および地

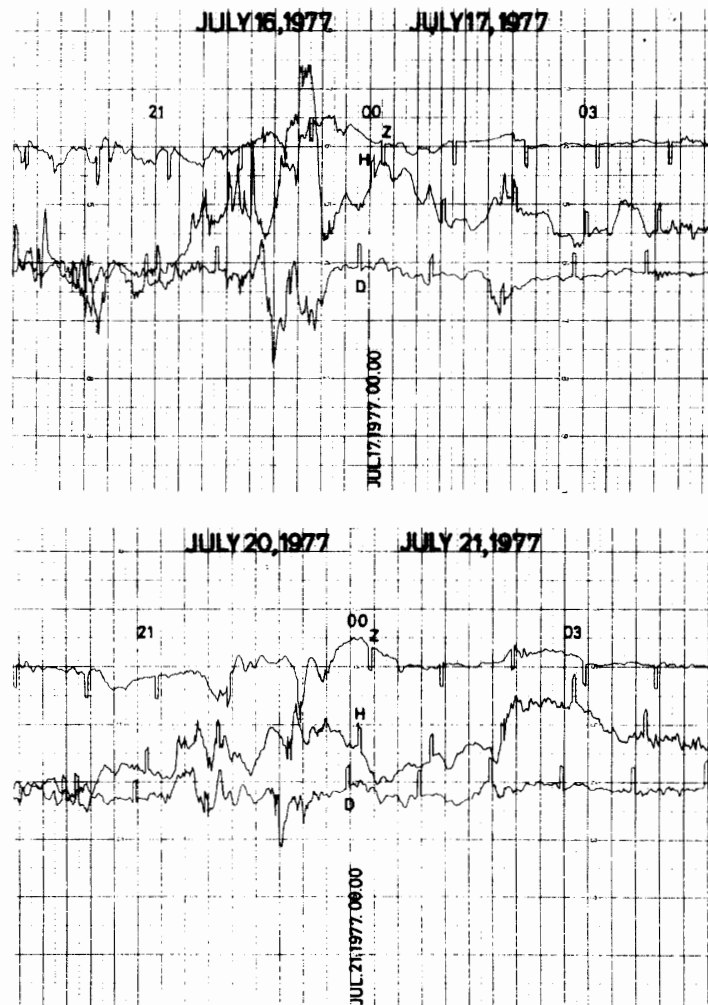


図 18 熱ペンレコーダーによる無人観測の記録例

Fig. 18. An example of the magnetogram recorded by heat pen recorder at the unmanned observatory.

磁気脈動二成分の良好なデータ集録が継続された。リオメーターデータは、電源関係ほかのノイズ混入が激しくデータ集録を中止した。無人観測によって取得されたデータ例を以下に述べる。

4.3.1. 地磁気三成分記録

無人観測 A1 点において観測された地磁気変動三成分 (H, D, Z) の熱ペンチャートレコーダーの記録例を図 18 に示す。図 18 は、上部パネルが 1977 年 7 月 16 日～17 日、下部パネルが 7 月 20 日～21 日に集録された熱ペンチャートレコーダーの記録である。このデータの中に周期的に見られるパルスは、 -100 nT の較正值を兼ねた毎正時の時刻表示で、時刻信号は標準信号発生器 (10^{-8} s/day) から与えられる。標準時刻発生装置の時刻信号は、昭和基地経由の短波帯のラジオ時刻放送および昭和基地の超高層観測系基準時計などと照合して、 $\pm 1 \text{ s}$ 以内の精度で時刻合わせを行っている。熱ペンチャートレコーダーの記録は、各成分の時刻マークがチャート紙上で間隔 4.5 mm ずれて表示されることや、観測対象の現象の変動が大きい場合に三成分がチャート紙上で重なり合い判別しにくいなどの欠点がある。各成分変動の重なり部分を解消させるとともに時刻マークを一致させるなどの初期的な整理を済ませた地磁気三成分変動記録の例が図 19 で、1977 年 6 月 9 日～10 日、7 月 4 日～5 日、7 月 10 日～11 日および 8 月 11 日～12 日の 4 例を示してある。これらの記録例は、いずれも地磁気地方

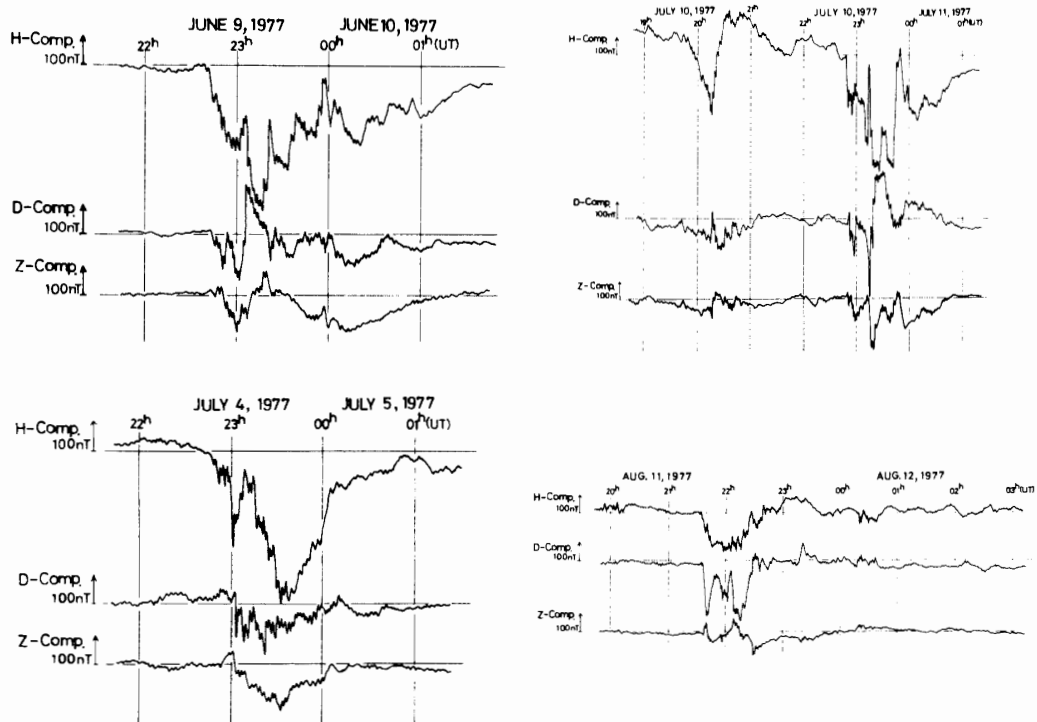


図 19 地磁気三成分の無人観測の記録例

Fig. 19. Example of record of geomagnetic three component variations observed at the unmanned observatory.

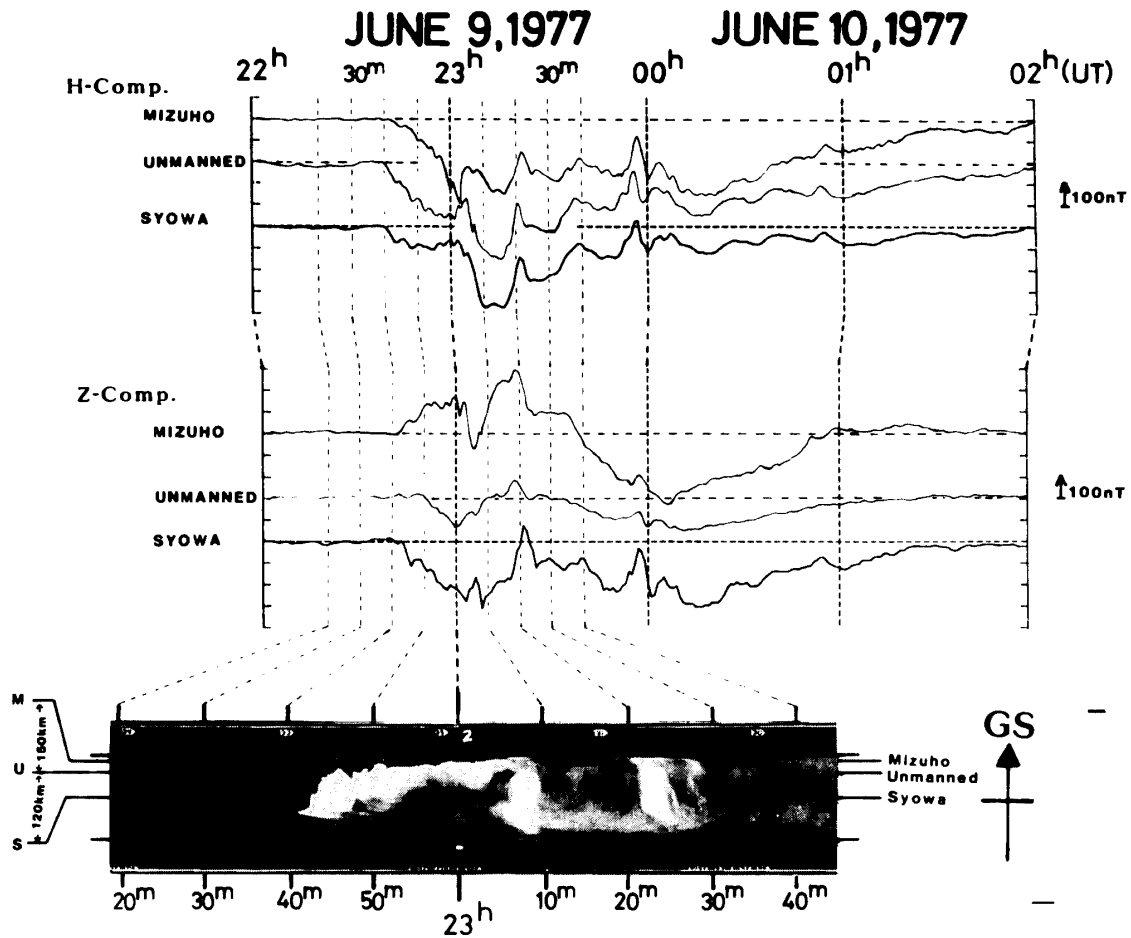


図 20 多点観測網で観測された地磁気 H および Z 成分変動とオーロラ発光領域の比較図
 Fig. 20. Relation between auroral activity and H - and Z -component magnetic variations observed at Mizuho, A1 unmanned and Syowa Stations during 2220-2340 UT on June 9, 1977. Auroral optical data observed at Syowa Station are shown in the bottom panel.

時 (MLT) の夜側の時間帯の観測例であるが、極磁気嵐現象が無人観測により良好にデータ集録されたことが見てとれる。極域の地上観測データに見られる地磁気変動は、オーロラの強く輝く領域の下で大きな変動が観測されることが一般に知られている。図 20 は、地磁気変動データの H および Z 成分とオーロラ発光領域の推移を比較した図で、上部パネルに示される地磁気変動データは上から下へ順にみずほ基地、無人観測 A1 点および昭和基地の H および Z 成分のデータである。下部パネルは、昭和基地で観測されたオーロラ発光領域の写真データで、昭和基地の天頂を中心にして地磁気子午線面に沿うオーロラの動きと輝度変化の概要が示される。図 20 によれば、3 観測点で集録された地磁気データの大きな変動がオーロラの強く輝く領域の移動と良く対応しているように見え、無人観測 A1 点で集録した地磁気三成分データが同時観測データとして有効性の高いことが示されている。オーロラ発光領域と地上多点観測で得られた地磁気三成分変動との関係については、5 節で詳しく述べる。

4.3.2. 地磁気脈動記録

図 21 は、無人観測 A1 点のアナログ磁気テープレコーダーに集録された地磁気脈動 X 成分の再生データ例で、1977 年 1 月 25 日 (1410-1520 UT)、2 月 2 日 (1700-1810 UT) および 2 月 6 日 (1340-1440 UT) の記録例である。これらの再生データには、顕著な Pc 型脈動が見られることや 1 Hz 変調の時刻信号 (30 秒間/毎正時) が等しい間隔で記録されているなど、

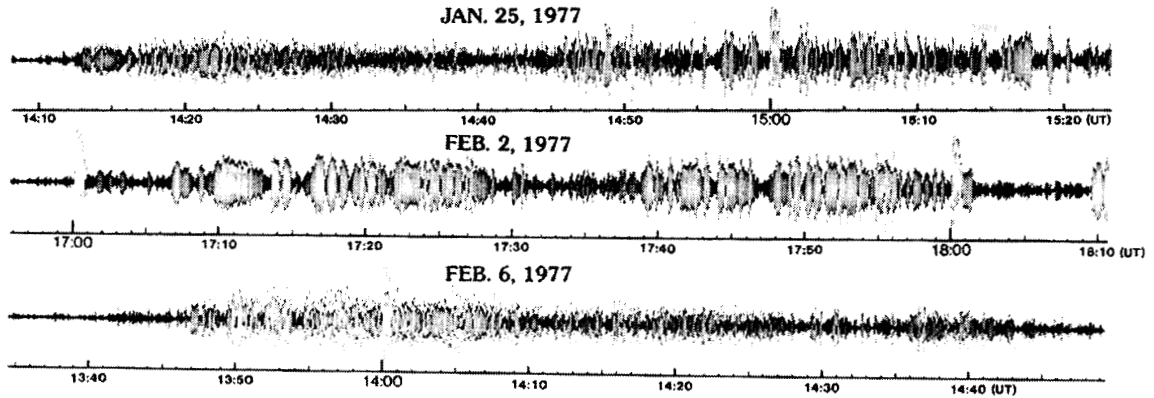


図 21 無人観測 A1 点の地磁気脈動観測例 (X 成分)

Fig. 21. An example of the geomagnetic pulsation (X -component) observed at the unmanned observatory.

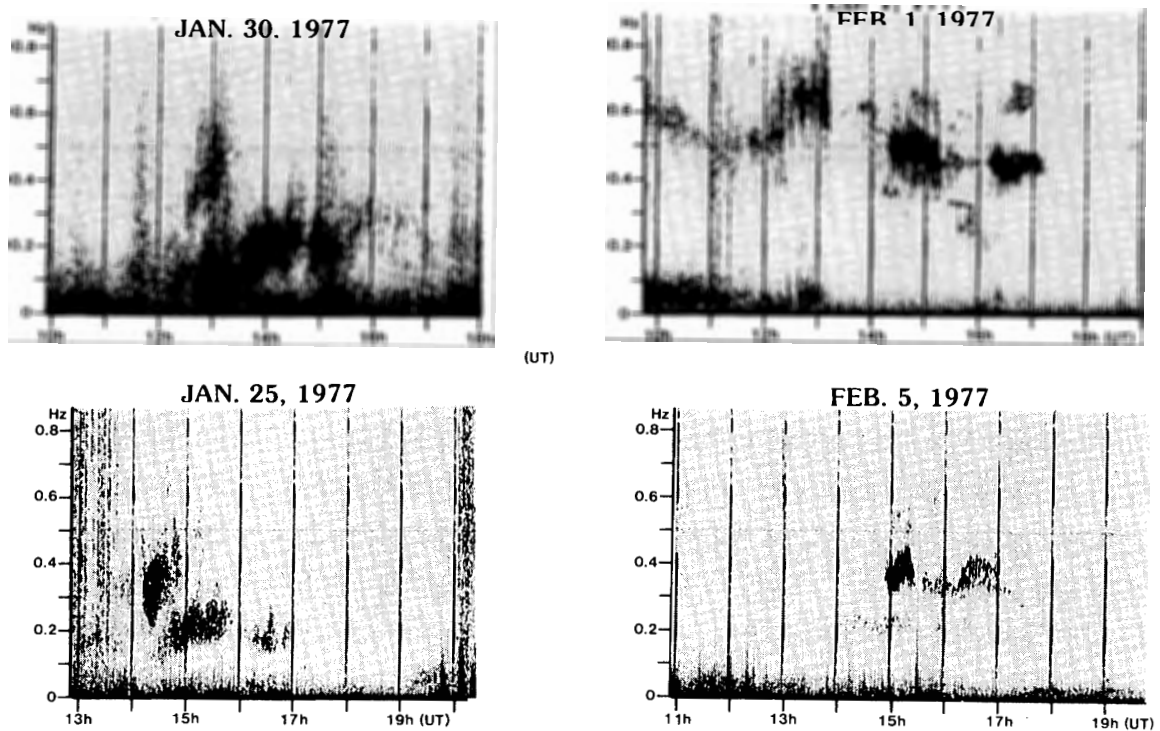


図 22 無人観測 A1 点で観測された地磁気-脈動の $f-t$ スペクトラム例

Fig. 22. Example of frequency-time spectrum of $pc 1$ pulsations obtained at the unmanned observatory.

無人観測の誘導型磁力計と標準時刻発生装置が正常に動作していたことが見てとれる。この変調 1 Hz の時刻信号 (30 秒間) は、前項と同様に正確な時刻と ± 1 s 以内の精度で時刻合わせされ、その信号発生は 10^{-8} s/day の安定度で保持されている。

図 22 に無人観測 A1 点で集録された地磁気脈動 X 成分の周波数解析例 (f - t スペクトラム) を示す。図 22 の f - t スペクトラムでは、昼間側から夕方側にかけて周期 2-3 秒程度の顕著な P_c 型地磁気脈動が観測されている。これらの f - t スペクトラムは、無人観測 A1 点が人工的ノイズが少ない電磁気環境にあり地磁気脈動観測データが良質であることを示している。

P_i 型脈動の発生は、オーロラ現象の活動と密接に関連し、そのオーロラ現象の活発化は地磁気 H 成分の急激な負の変動と良い相関を示すことが現象論的に知られている (例えば図 20)。ここでは、無人観測 A1 点で集録された地磁気関連現象の相互関係を再生データで照合してみる。

図 23 は、1979 年 4 月 24-25 日と 5 月 26-27 日に無人観測 A1 点で集録された地磁気変動 H 成分と地磁気脈動 X 成分の相関記録例である。地磁気 H 成分の急激な負の変動と同期して P_i 型脈動が励起されている傾向が見られる。特に、4 月 24-25 日イベントでは 21, 00, 02, 05, 06 および 08 UT 頃、また、5 月 26-27 日イベントでは 2230, 0300, 0400, 0450, 0520, 0540

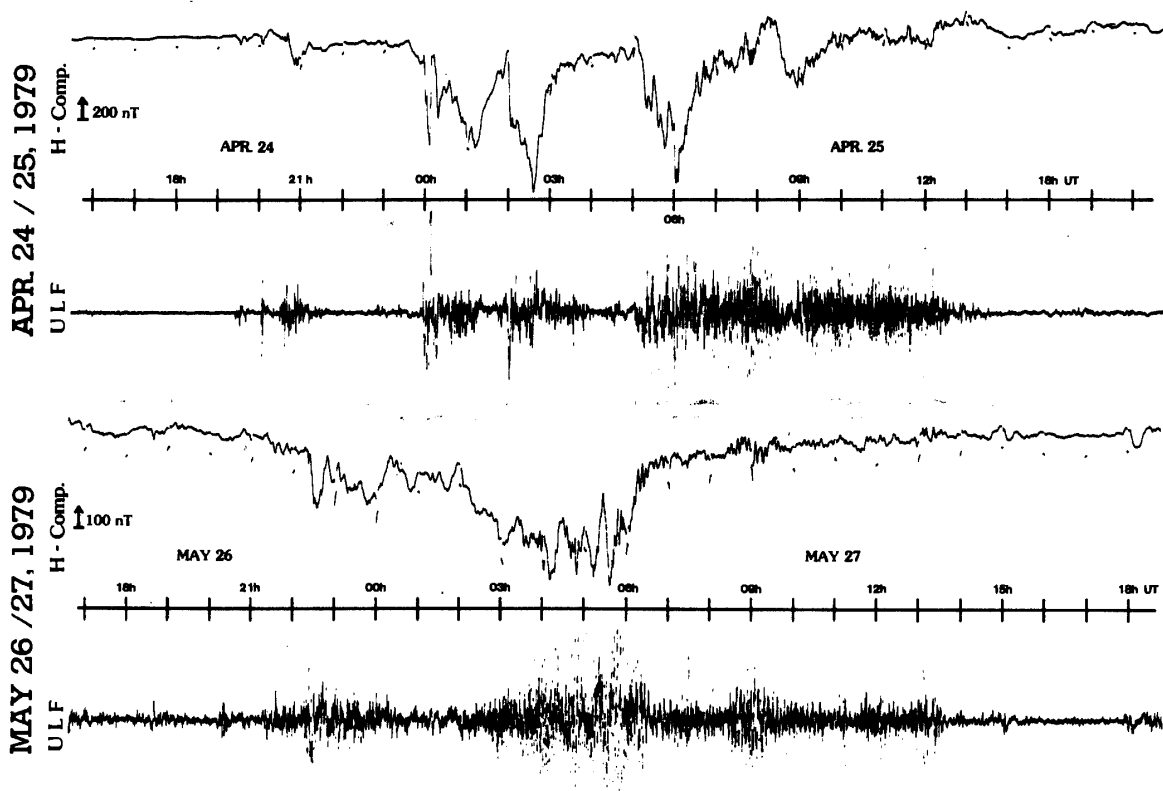


図 23 地磁気変動 H 成分と地磁気脈動 X 成分の比較例

Fig. 23. An example of comparison between geomagnetic variation (H -component) and geomagnetic pulsation (X -component).

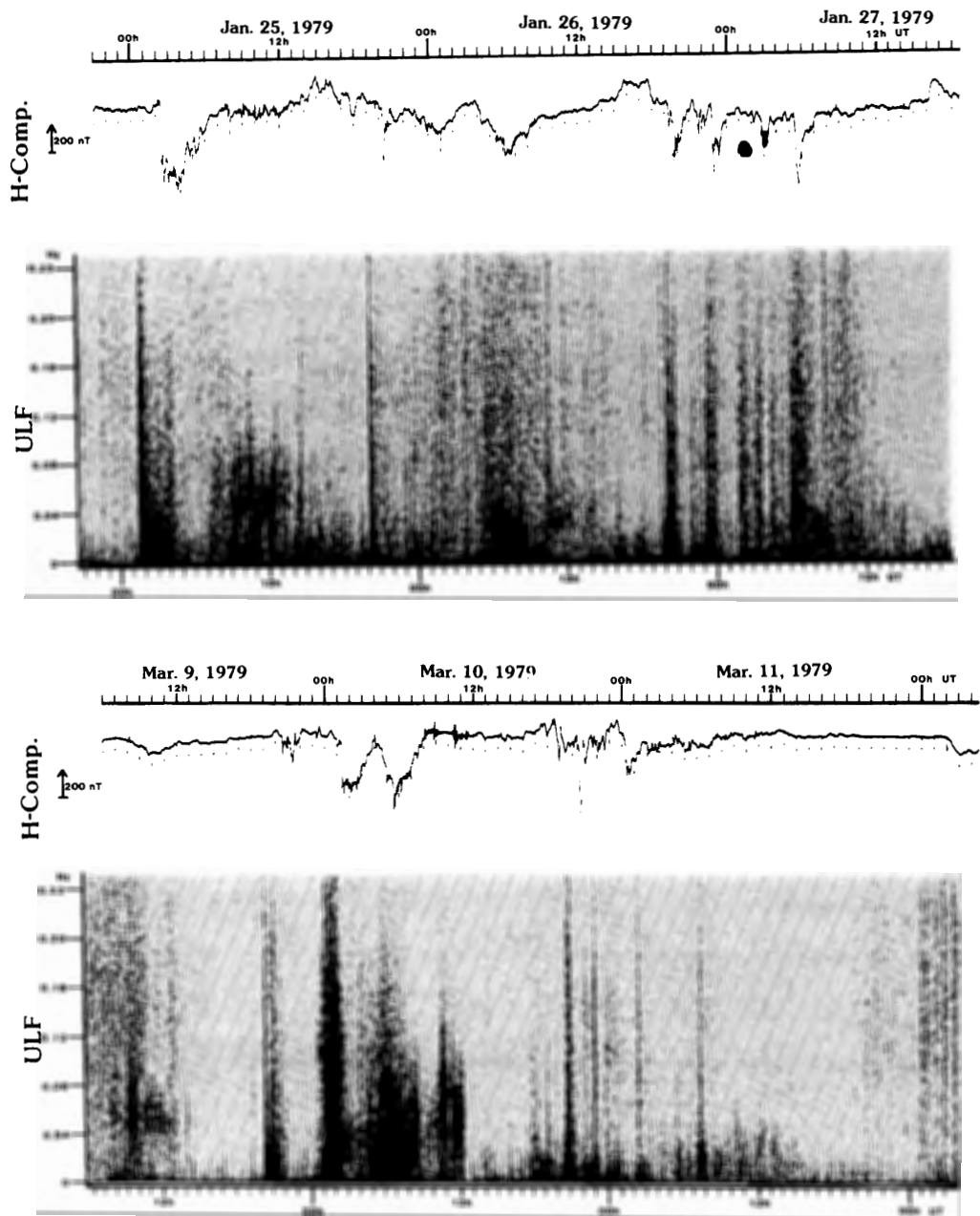


図 24 地磁気 H 成分変動と地磁気脈動 X 成分の f - t スペクトラム比較例

Fig. 24. An example of comparison between variation of the geomagnetic H -component and frequency-time spectrum of the geomagnetic pulsation.

および 0600 UT 頃に良い対応関係が見られる。このデータ間の相互チェックは、地磁気 H 成分の変動と脈動データの f - t スペクトラムとを比較すれば、さらに明瞭となり、図 24 はその一例 (1979 年 1 月 25 日から 27 日および 3 月 9 日から 11 日の記録) である。このように、地磁気 H 成分の急激な負変動と同期して P_i 型脈動が励起されている様相が確かめられること、また、その時刻表示が ± 1 s 以内の精度で確保されていることなどにより、無人観測 A1

点で集録された地磁気脈動データが多点同時観測データとして有用であるものと判断できる。

図 25 は、1977 年 2 月 5 日にみずほ基地、無人観測 A1 点および昭和基地で同時に観測された Pc 型脈動現象の f - t スペクトラムの比較例である。図の縦軸は周波数 (0-1.5 Hz)、横軸は時間 (12-20 UT) を示している。3 観測点で集録されたデータは、全体的には同じ時刻にほぼ同様な Pc 型脈動現象が観測されている。しかし、良く見ると 3 観測点で観測された現象は、それぞれ強度の違いや一つの観測点だけでしか観測されていない現象も見られる。例えば、1) 1220-1320 UT 頃に見られる 0.2 Hz 付近の現象は、3 観測点ともに観測されているが、その強度が高緯度ほど強い傾向が見てとれる。2) 14-17 UT 頃に見られる周波数 0.5 Hz 以下の現象では、高緯度側の観測点 (みずほ基地) の強度が最も強い傾向にあり、低緯度側の観測

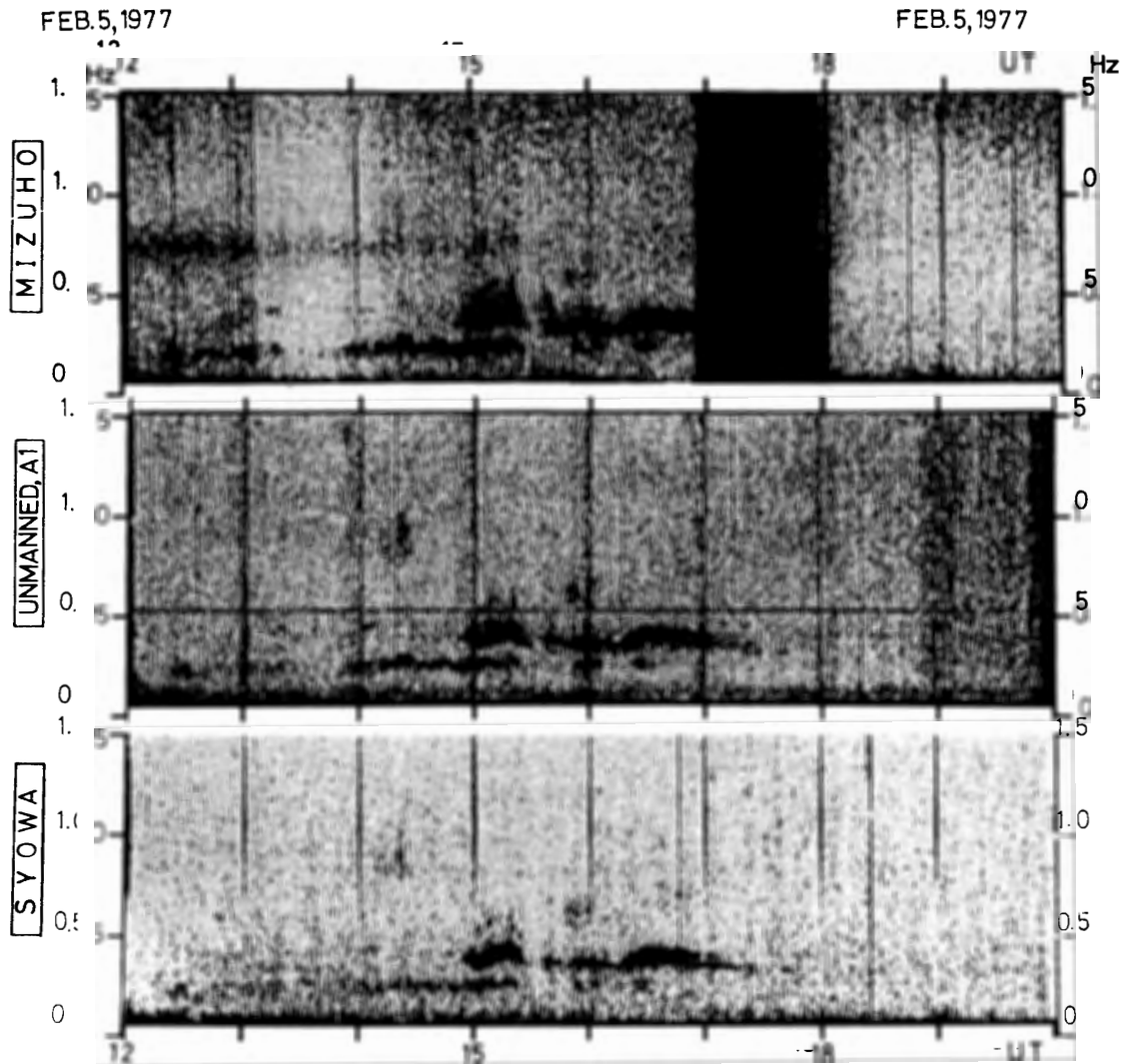


図 25 多点観測網による地磁気脈動の同時観測例

Fig. 25. Simultaneous frequency-time spectrum of pc 1 pulsations obtained at Mizuho, A1 unmanned and Syowa Stations.

点ほどその強度が弱くなっている様相が見てとれる, 3) 1410-1420 UT 頃に見られる周波数約 0.9 Hz の現象は, みずほ一昭和基地の中間に位置する無人観測 A1 点の記録に最も顕著に見られ, 昭和基地のデータにも A1 点同様に現象の存在を確認できるが, 高緯度側のみずほ基地のデータには見られない. このような地上で約 120-150 km 程度しか離れていない観測点の地磁気脈動観測データに見られる出現特性の相違は, 磁気圏における波動の励起機構, 磁場振動などをより詳細に理解していくうえに重要な情報を与えるであろう.

4.3.3. リオメーター記録

無人観測 A1 点におけるリオメーター (relative ionospheric opacity meter) による銀河宇宙電波雑音吸収量 (CNA: cosmic noise absorption) の観測は, 大陸氷床上の斜面下降風帯で絶え間なく発生する地吹雪などによる静電気がもたらす静電ノイズや, 他の観測機器類が発生するノイズが電源ラインから混入するなどの影響により良好な記録を取得できなかった. リオメーターの運用は, 静電気ノイズによるリオメーター用の DC/DC コンバーター破損や, 本体の電気回路素子の不良誘発ほかの事故が相次いで発生して, IMS 期間中のリオメーター観測は不備に終始した. リオメーター観測では, 静電気対策が基本的に重要であること, また, 電氣的ノイズに敏感なこの観測装置には独立した電源系統が必要であることなどの技術的な教示を得た.

4.3.4. 気象観測記録

IMS 期間中の無人観測 A1 点における気象自動観測では, 1977 年 1 月 18 日~2 月 20 日ま

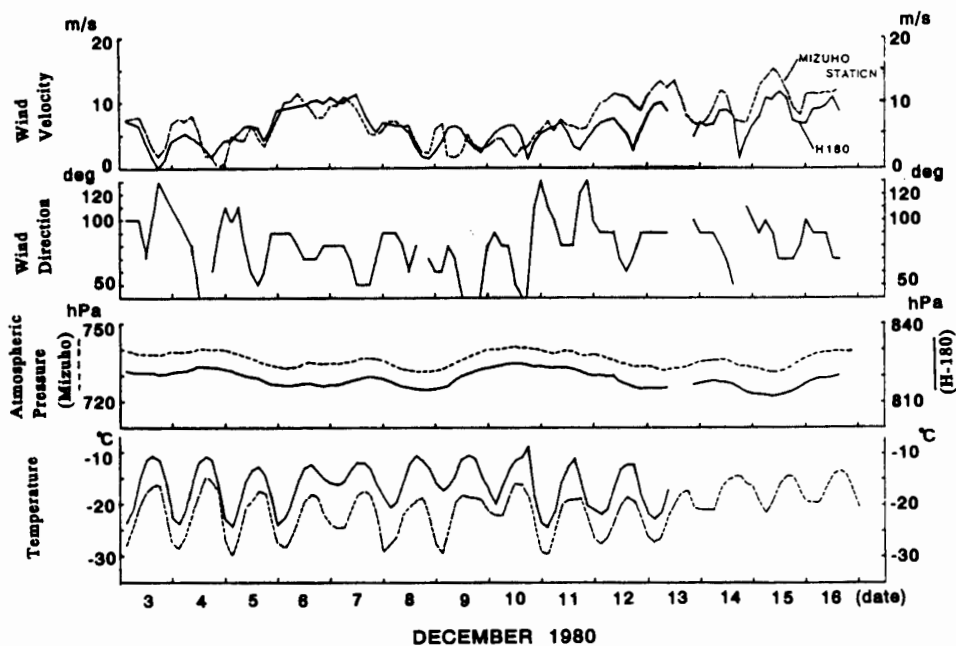


図 26 無人による気象要素の観測例

Fig. 26. An example of a meteorological observation record at the H180 unmanned observatory.

での期間と、1977年9月8日から1978年1月20日までの期間のデータを集録することができた。しかし、集録データは帰国後の復調作業に関連する再生処理に失敗しデータは消失した。ここでは、図26にPOLEX-South(1979-1981,南極域観測計画)の基にJAREの気水圏系研究観測グループが実行した南極大陸氷床上における無人による気象観測データの集録例を示す。POLEX-SouthにおけるJAREの無人観測施設は、IMS期間中のPUGO型の保温箱方式にNDUGO型の電力供給システムの考え方を踏襲して計画され、南極大陸氷床上の数カ所に設置された。IMS期間中の無人観測A1点の東方約28kmに位置するH180点(69°35'S, 42°00'E, 標高1543m)では1980年11月4日から観測を開始している。図26は1980年12月3日~16日までの約2週間にH180点で集録した気象データで、上から風速、風向、気圧および気温の3時間ごとの値が示され、実線は無人観測H180点、破線はみずほ基地の気象観測データである(大畑・勝田, 1983)。二観測点の気象要素の変動は、ほぼ同様な変化傾向を示している。風速データに見られる二観測点の強度の相違や、そのピーク値の発生時刻の違いなどは、斜面下降風の面的な違いを検討するうえで興味深いものがある。

5. 無人観測点のデータを用いた解析結果の概要

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~2000nT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100-120km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。著者等は、電離層中を水平に流れる電流が地上の地磁気変動の大部分を担っているという仮定のもとに、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無人観測データを含む地上多点観測データを用いて調べてきた(AYUKAWA and MAKITA, 1984; AYUKAWA *et al.*, 1986)。そして、オーロラ発光領域の時空間変動と電離層電流(オーロラジェット電流)との対応関係を明確に示した後、その定量的な解析結果を利用してサブストーム時における南北共役性の変動の様相を調べ、併せてモデルから計算される地磁気共役点の地方時(MLT)依存性と観測事実が示す共役点の日変化特性とを比較検討した。それらについての詳細は鮎川・巻田(1998)に報告されている。ここでは、その解析結果の概要と今後の共役観測とその研究について地上多点観測の立場からの展望を述べる。

(1) オーロラ活動と地磁気変動

無人観測を含む昭和基地を中心とした地磁気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との比較解析結果は、地上で観測される地磁気の変動がオーロラの発光領域と良い関係にあるとする従来からの定性的な知見を支持するものであった。著者等の解析

表 5 南極の三観測点の地理座標と地磁気座標
Table 5. Location 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 asl
A1 Unmanned Station	69° 47' S	41° 35' E	-67.21°	70.21°	1470 m asl
Mizuho Station	70° 42' S	44° 20' E	-68.26°	70.34°	2230 m asl

は、特に、緯度方向に数百 m/s～数 km/s のスピードで時間空間的変動するサブストーム時（オーロラフレア）の最も強く輝いているオーロラ発光領域が地上の多点による地磁気変動データで追跡できることを示したことが重要である。この観測事実は、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的に流れる線電流であることを強く示唆している。解析した 1 例を以下に示す。表 5 には 3 観測点の地理的・地磁気的な位置関係を示してある。

解析イベント例 (June 9-10, 1977)

図 27 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 から 0200 UT 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、パルス的な鋭い変化の発生は 3 点で必ずしも同時ではない。例えば、2300 UT 頃のみずほ基地に見られるパルス的な変動は、A1 無人観測点や昭和基地では見られない。また、0000 UT 頃のパルス的な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 UT 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 nT～340 nT となる大きな変化を示している。Z 成分の変動は、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 UT から 0200 UT 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 UT から 2340 UT 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 UT 過ぎから 0100 UT 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 UT 頃から 0200 UT までの間にほぼ静穏時レベルにもどっている。

図 28 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

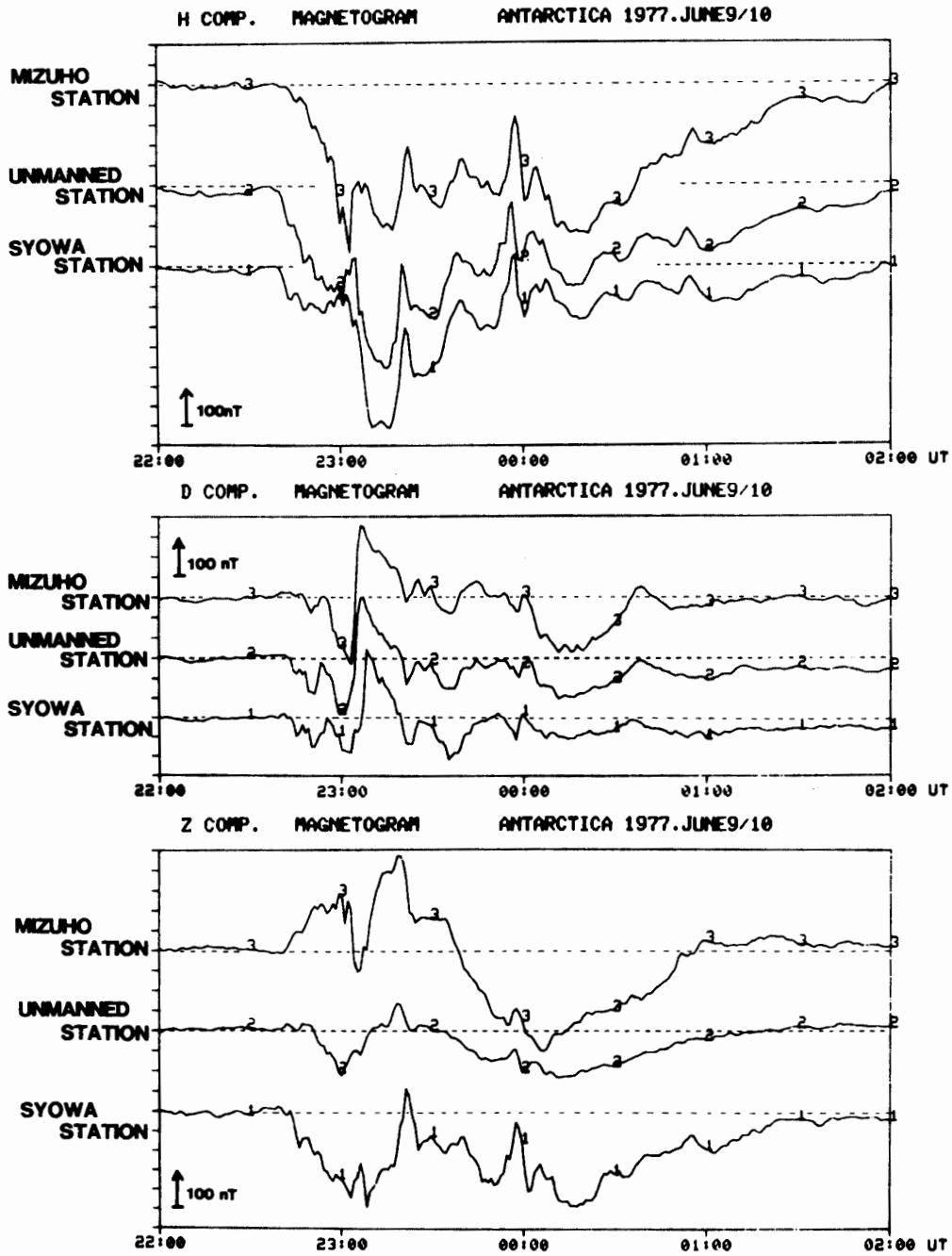


図 27 みずほ基地，無人観測点 (A1) および昭和基地における地磁気三成分の同時観測記録 (横軸の破線は，地磁気の静穏日のレベルを示す)

Fig. 27. Temporal variations of the H-, D- and Z-component magnetic fields observed simultaneously at Mizuho, A1 unmanned and Syowa Stations during 2200-0200 UT on June 9-10, 1977. (The horizontal dotted lines indicate quiet day levels of the magnetic field.)

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 UT 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

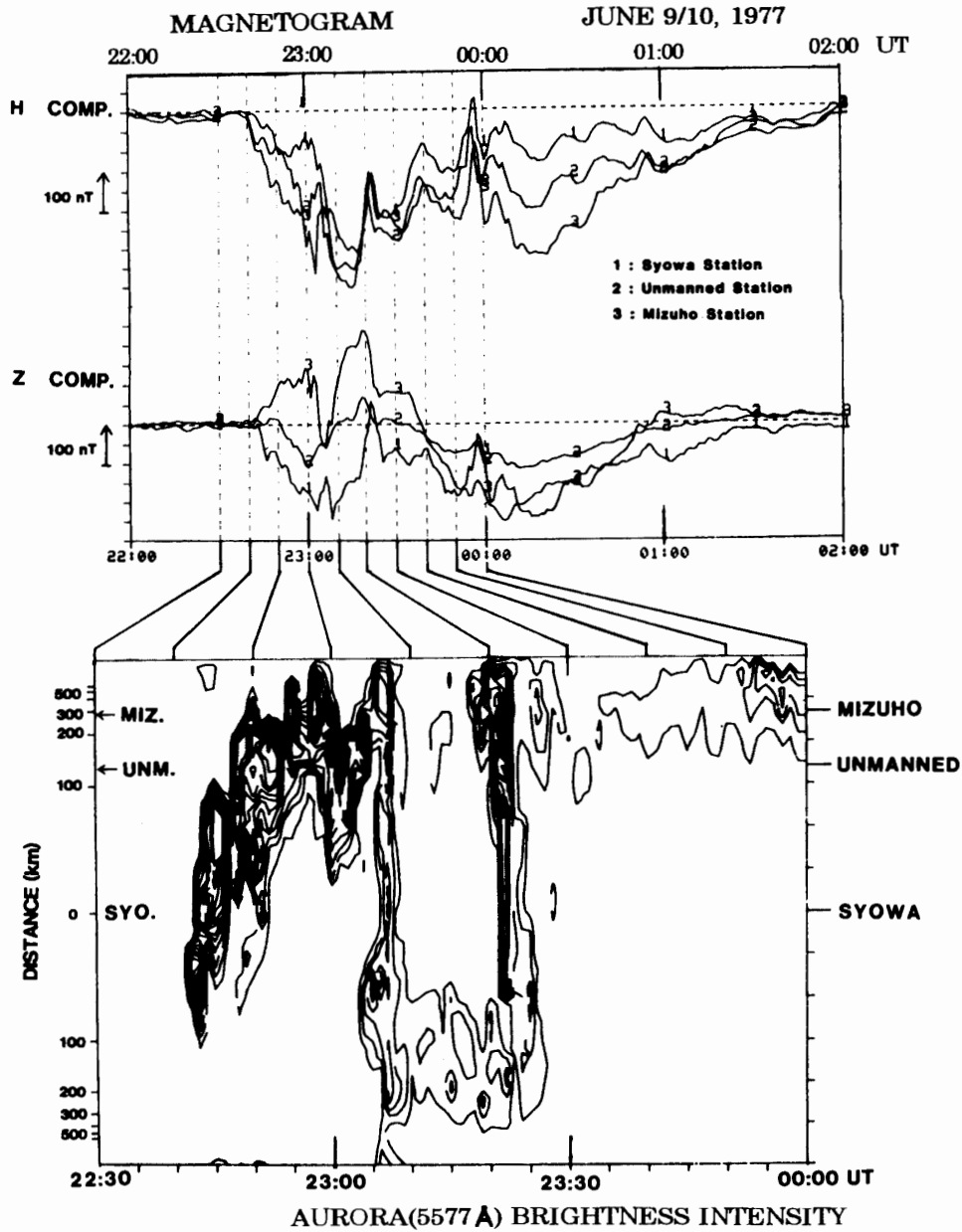


図 28 みずほ基地，無人観測点 (A1) および昭和基地で観測された地磁気 H および Z 成分の変化と昭和基地の掃天フォトメーターで観測されたオーロラ光 (波長 557.7 nm) の発光領域との比較図 (1977 年 6 月 9-10 日のイベント)

Fig. 28. Temporal variations in H - and Z -component magnetic fields observed during 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 are also shown in the bottom panel.

への移動を開始している。オーロラ発光の強い領域は、2300 UT 頃には一旦みずほ基地の高緯度側へ移るが、2305 UT 頃から 2310 UT 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 UT 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 29 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 UT 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 UT 頃までに高緯度側へ移動している。また、2305 UT および 2310 UT 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 UT 頃に一旦高緯度側で弱まりを見せるが、2320 UT 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 UT 頃には昭和基地の位置にあり、2242-2243 UT 頃に一旦低緯度側のオーロラ位置

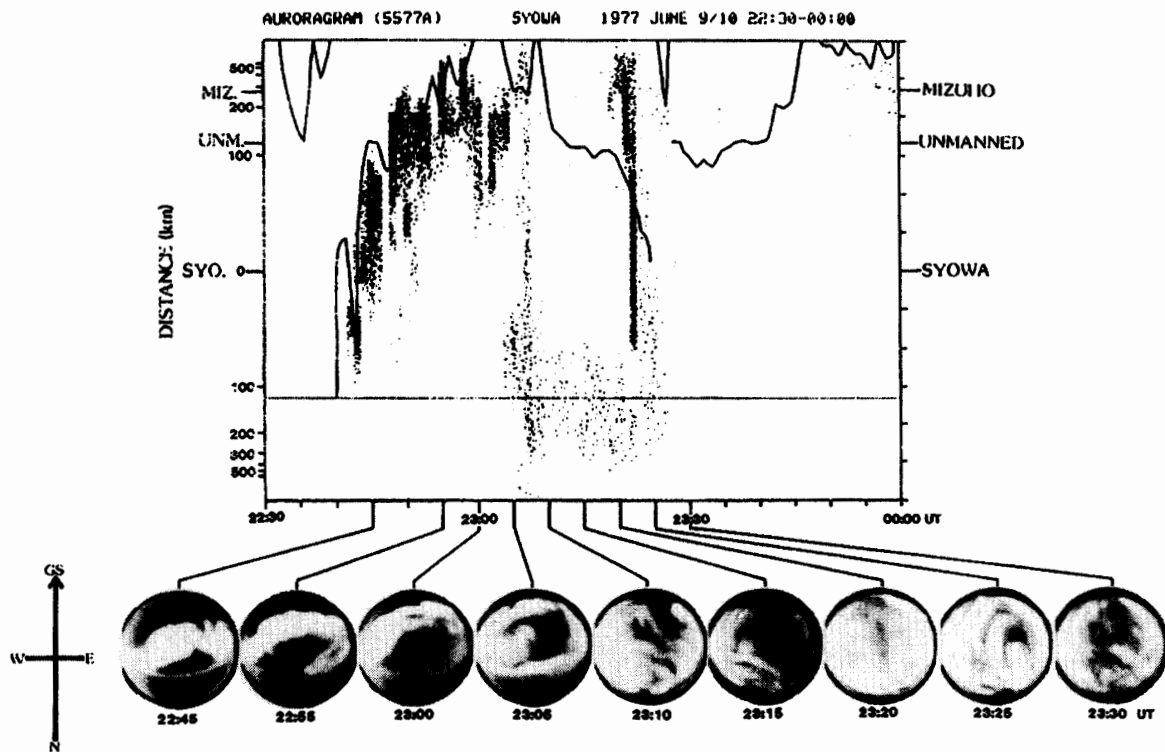


図 29 オーロラ光（波長 557.7 nm）の南北方向における時間空間変化（濃淡表示）と地磁気 Z 成分変動 ΔZ が 0 である点の軌跡（濃淡表示の中の太い線）。下のパネルは、昭和基地の全天カメラで撮影したオーロラの活動を示す。

Fig. 29. 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.

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 UT 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 UT 頃や 2310 UT 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 28 および図 29 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。この解析例で見られるように、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が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領域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 120 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が示唆される。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 日間の多点観測データから、比較的活発なオーロラ活動が見られる時間帯 (00 UT 付近) の 15 イベントを選んだが、ここで示したイベント例のようにいずれ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も移動している。

(2) サブストーム時の南北共役性

電離層中の狭い領域にオーロラジェット電流が流れているとの前項の解析結果の示唆に基づき、ここでは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た。取り扱ったデータは、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: 地理座標: $64^{\circ}08'N$, $21^{\circ}47'W$, 地磁気座標: 65.64° , 69.05°) の地磁気記録である。解析対象としたデータは、1977 年のデータのうち南極における A1 無人観測点の記録が存在する 5 月末から 8 月 23 日までの約 3 カ月間の記録で、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、本報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。サブストーム発生期間の三つの区分けは、① H 成分の負の湾型変動が開始された時刻からピーク値に至る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-1^h Phase: E-1P) ③サブストームの回復期 (Recovery Phase: RP) と呼称して区分した。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 1 例

を以下に示す。

解析イベント例 (July 10-11, 1977)

図 30 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 UT から最低値に至った 2325 UT までを EP と決め、負の変動が始まる 1 時間前の 2129 UT 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 UT までとした。

図 31 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-1^h Phase), 爆発期 (Expansion Phase), 回復期 (Recovery Phase)

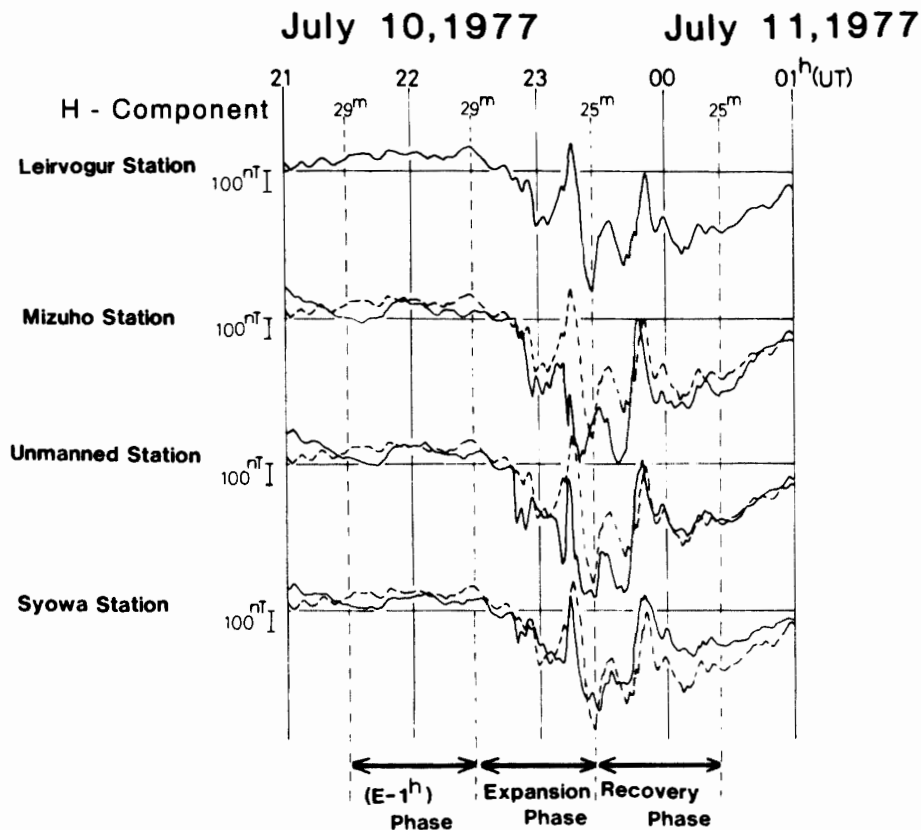


図 30 レイルボグルと南極の 3 観測点 (みずほ基地, A1 無人観測点および昭和基地) で観測されたサブストーム時の地磁気 H 成分変動記録。南極の 3 観測点の記録にレイルボグルの観測記録を破線で重ね書きしてある。

Fig. 30. 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.

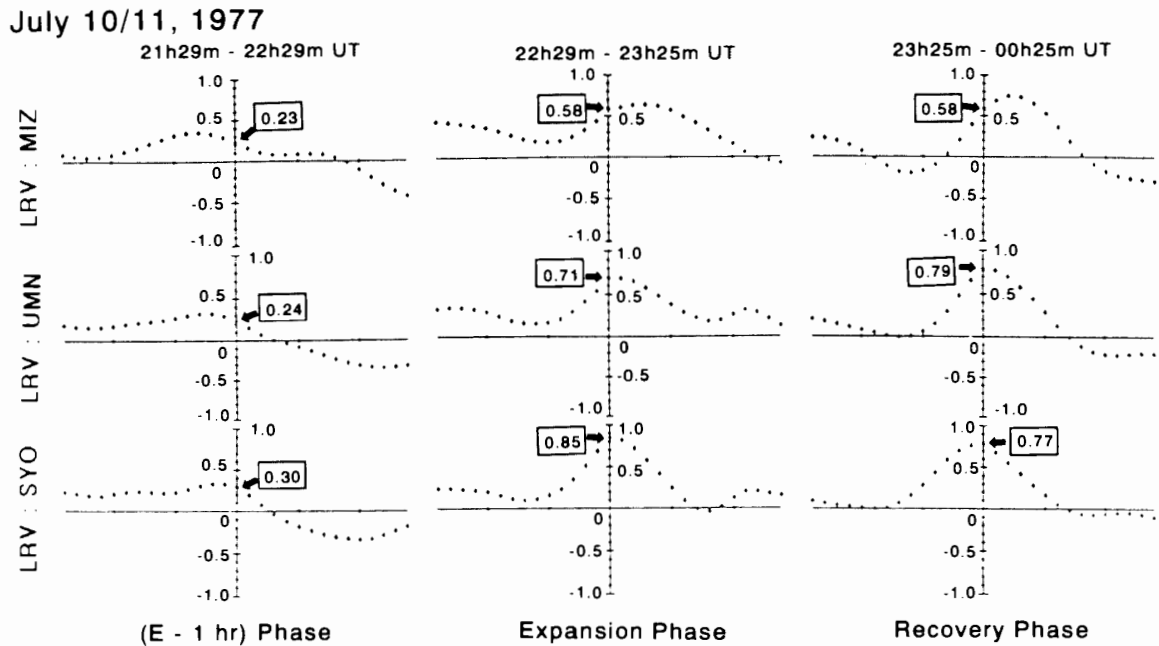


図 31 レイルボグルの地磁気 H 成分の変動に対する南極の 3 観測点の地磁気 H 成分変動との相互相関係数値 (1977 年 7 月 10-11 日のイベント)

Fig. 31. Correlation coefficients between ΔH -values observed at Leirvogur and three Antarctic stations on July 10-11, 1977. (The top panel shows the correlation between Mizuhogel and Leirvogur, the middle panel shows that between A1 unmanned and Leirvogur, the bottom panel shows that between Syowa and Leirvogur.)

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、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。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。

この解析例で述べた手法により、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 32 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。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

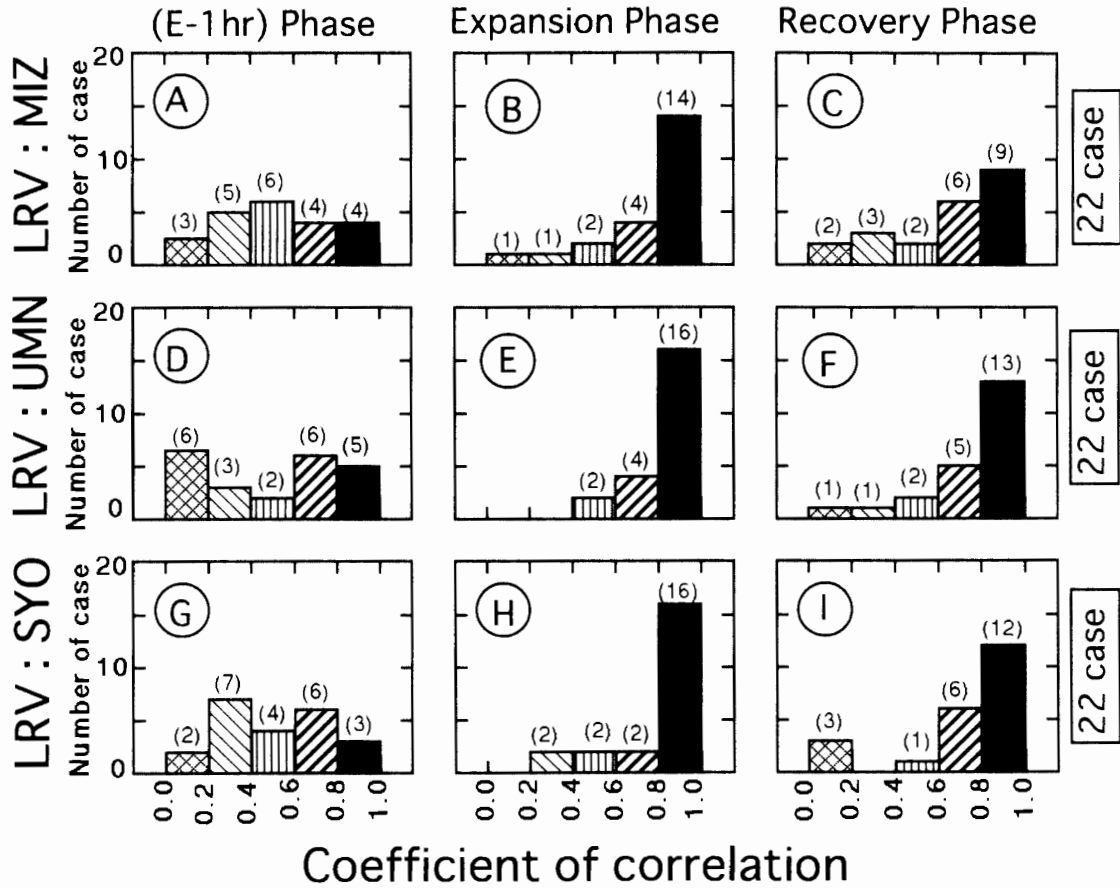


図 32 相互相関係数値で群別して見たレイルボグルと南極の 3 観測点（みずは基地，A1 無人観測点および昭和基地）間の共役性。図の棒グラフは，相互相関係数（ r ）を 0.2 間隔の範囲で区分した時の頻度数を表す。

Fig. 32. Occurrence frequency of the correlation coefficients between ΔH -values observed at Leirvogur and a three Antarctic stations conjugate point pair period polar magnetic substorm.

The sketches the figure have the following meanings:

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

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 6 は，図 32 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（ X ）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

表 6 レイルボグルのサブストーム現象と南極の3観測点で観測される現象の対応性

Table 6. Statistics of correlations between Antarctic stations and Leirvogur station during polar magnetic substorms.

	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-1 hr) 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

Remarks LRV: Leirvogur St. MIZ: Mizuho St. UMN: Unmanned St. SYO: Syowa St.

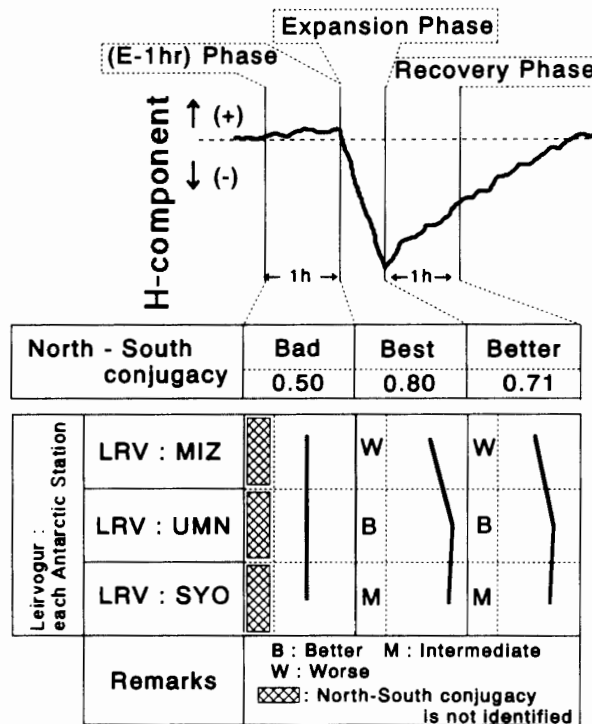


図 33 サブストーム時の南北共役性に関する模式図

Fig. 33. Summary of northern-southern conjugacy depending on the phase of the polar magnetic substorm.

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良く、次が回復期である。発達期の共役性が爆発期や回復期より劣るのは、図 30 で見るサブストーム発生の 1 時間前と区分した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、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ものとする。また、観測点別にレイルボグル基地との対応性を見ると、A1 無人観測点が最も優位性があり、次が昭和基地で、高緯度側に位置するみずほ基地が最も対応性はよくない。

図 33 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、ここで用いた解析手法の結果から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については図の下段に表示してある。アナログデータの相似性を求める解析手法では、サブストーム発生前の現象の共役性に関する議論には無理がある。サブストーム時に北半球のレイルボグル基地（北半球/夏季）の現象と最も良い対応性を示したのは、A1 無人観測点（南半球/冬季）のデータで、それより高緯度側に位置するみずほ基地は昭和基地（低緯度側）よりも相互相関が悪い傾向が示された。

(3) 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。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) 依存性を調べた。解析手法は、南北で観測されたデータそれぞれの地磁気 Z 成分の $\Delta Z=0$ の点の軌跡を計算機処理で求め、その軌跡の位置を同じ座標系のなかで比較する方法を用いた。解析データは、南半球側が昭和基地周辺の 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 観測点のデータを使用した。フッサフェル基地の位置は $64^\circ 40' \text{N}, 21^\circ 02' \text{W}$ (地理座標) で、地磁気座標の緯度経度は $66.09^\circ, 70.27^\circ$ 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。解析イベントの 1 例を以下に示す。

解析イベント例 (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 34 の上段に示した。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 程の負の変動が 0030

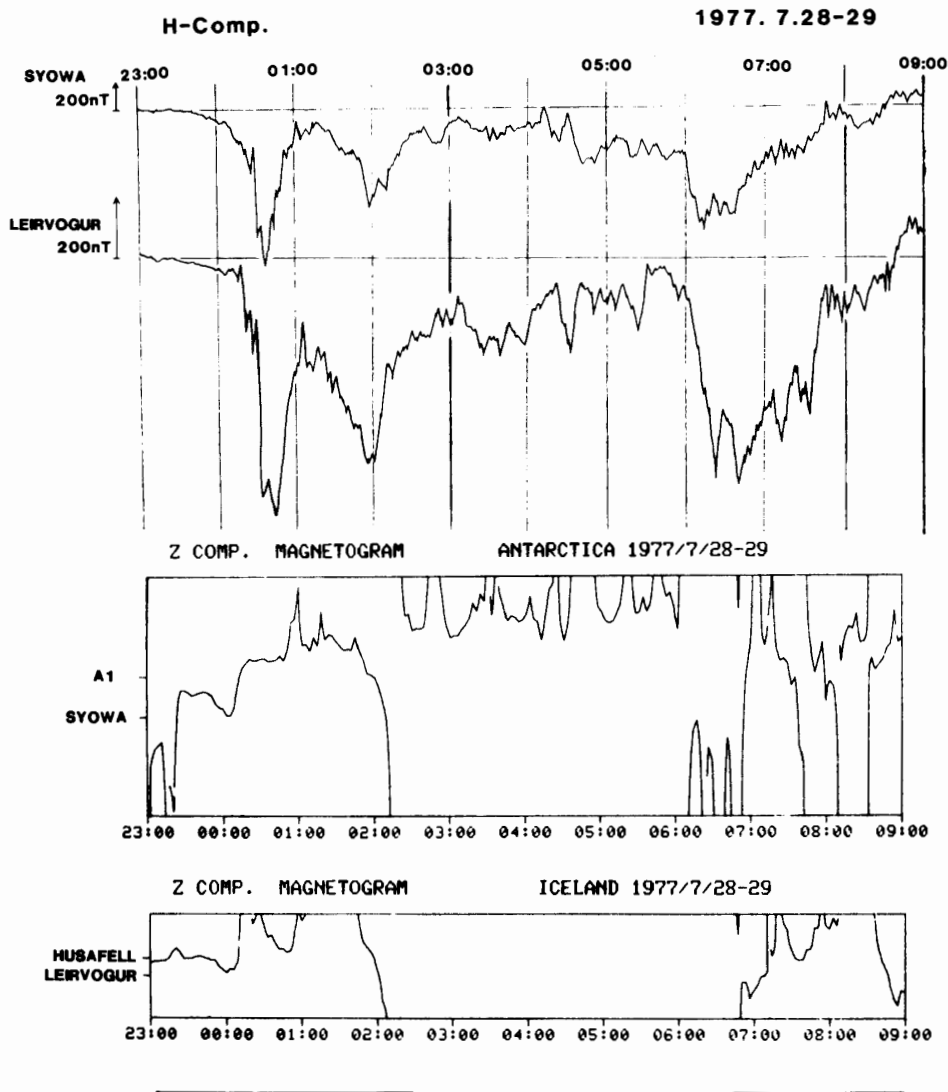


図 34 真夜中直前から早い朝方側までの時間帯 (2300-0900 UT \approx MLT) に南北で観測された地磁気変化の現象例. 下のパネルには, 南北ともそれぞれ二つの観測点の地磁気 Z 成分記録を補間して求めた $\Delta Z=0$ の点の軌跡を示す

Fig. 34. Magnetic H-component variations observed simultaneously at Syowa and Leirvogur (upper and lower curves in the top panel) Stations during 2300-0900 UT on July 28-29, 1977. The space-time variation in the bottom panel shows the trace of the zero point of the ΔZ -variation in Antarctic and Iceland.

UT 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 34 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. 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 UT 頃に南北で類似した変化を

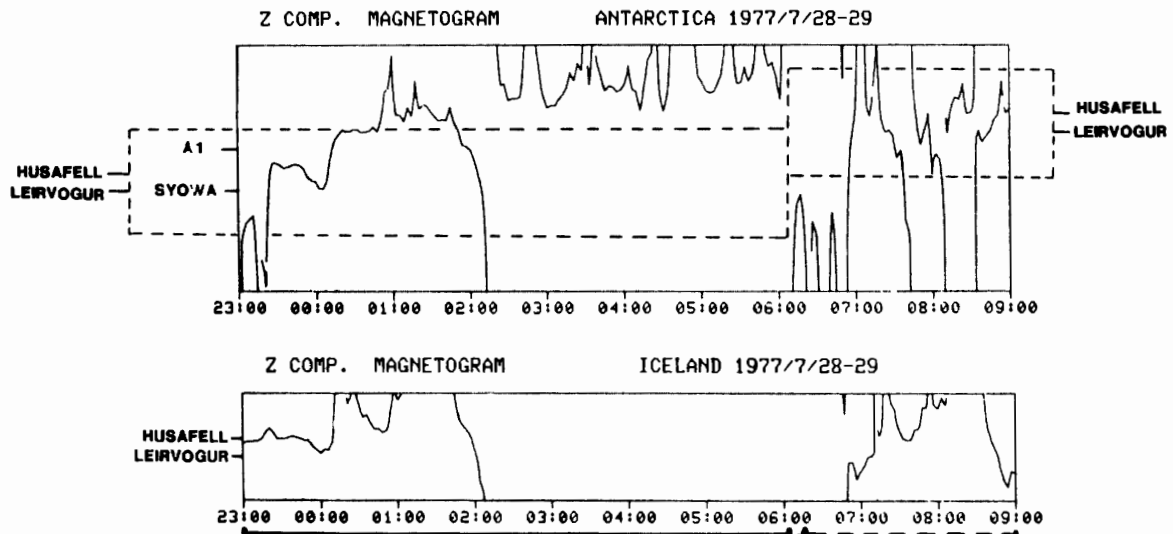


図 35 地磁気 Z 成分の $\Delta Z=0$ の点の軌跡の南北比較図. 破線で示す時間空間領域で南北の共役性が良いように見える.

Fig. 35. Comparison between northern and southern hemispheres of the zero ΔZ -value positions observed from night to late morning hours on July 28-29, 1977. In the figure, the dotted rectangular area seems to indicate good conjugacy.

している。一方、0200-0700 UT 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 35 は、南極側の $Z=0$ 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 UT 頃までは昭和基地とレイルボグル基地の現象が良い共役性にあり、0600 頃-0900 UT 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 UT 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。

地磁気多点観測データを用いて、上に示したような南北の $\Delta Z=0$ の点の軌跡の類似性を捜すという手法によって南北共役性の地方時依存特性を調べた。オーロラ帯付近の地磁気変動の様相は夜側に比べて昼間側では比較的变化に乏しい。したがって、昼間側の現象は夜側に比べて計算機処理が困難で、昼間側の解析イベント数は夜側の解析数より圧倒的に少ない。

図 36 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をまとめたものである。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。解析データ数は、図 36 の中央部に地方時別に示してある。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 36 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 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 36 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

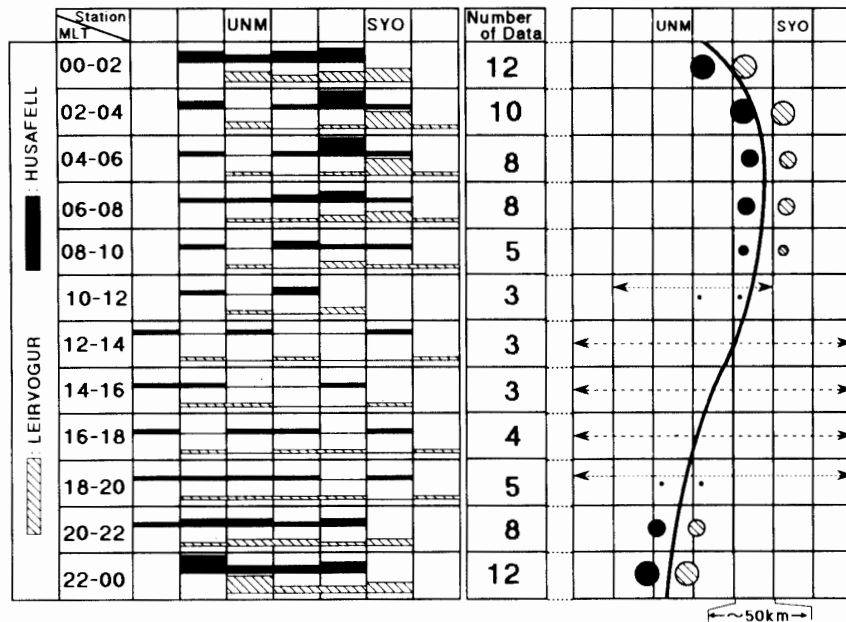


図 36 地磁気 Z 成分の $\Delta Z=0$ の点の軌跡の図形解析から求めた南北共役性の地方時依存特性。図中に示したマークは、昭和基地周辺の場所とレイルボグル基地 (斜線, ⊙) およびフッサフェル基地 (黒塗り, ●) との共役性が良かったところを表す。マークの幅の大小は、解析データ総数に対する相対的な割合を表現している。

Fig. 36. Characteristics of magnetic local time dependence of the North-South conjugate point position by a chase of a trace of the $\Delta Z=0$ point of geomagnetic variations. A mark in the figure shows a good conjugacy between of Northern and Southern Hemisphere:

斜線 and ⊙ mark are Leirvogur, 黒塗り and ● mark are Husafell.

の 12-14 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 36 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 MLT) に南極側で最も高緯度側に存在し、真夜中 (midnight: 00) 過ぎから暁側 (dawn side: 06) 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) 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) 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 37 は、Tsyganenko-Usmanov モデル (1982) 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 36) 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いいことを示している。レイルボグル基地の共役点の投影地は、22-00 MLT の時間

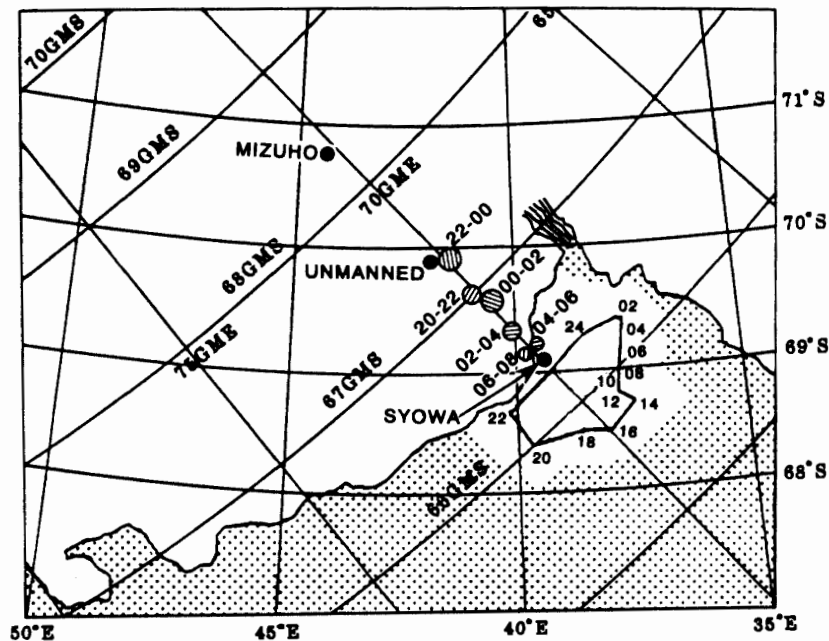


図 37 解析から求めたレイルボグルの地方時依存特性とモデルの日変化特性の比較図
 Fig. 37. Comparison of local time dependence characteristic of the conjugate point position of Leirvogur by the data analysis and daily fluctuations characteristic of a model.

帯で最も高緯度側に位置し A1 無人観測点付近にあたることが示されている。その後、共役点は時間経過 (00-02, 02-04, 04-06 MLT) とともに徐々に低緯度側へ移行している。08 以後 20 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 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。

これに対してモデルによる共役性の日変化パターンによれば、レイルボグル基地の共役点は 14 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が、時間経過とともに徐々に高緯度側へ移動している傾向を示し、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。モデルから計算された共役性の日変化パターンと解析結果が示す南北共役性の地方時依存特性 (斜線の丸印) は、真夜中付近で高緯度側にあり、朝側から昼間側にかけて低緯度側へ移行し、さらに、夕方側から夜側へかけて高緯度側へ移行する傾向が一致していることがわかる。このことは観測事実がモデルを実証しているものと考えられる。

(4) 今後の地上多点観測網と共役性研究

ここで示した地磁気共役性の解析研究から、今後の共役性観測とその研究について地上多点観測の立場から展望を述べる。本報告では、地上地磁気多点観測がオーロラジェット電流位置を追跡するのに十分効果的であることを定量的に紹介した。特に、サブストームのオンセットとその移動がオーロラ帯の地上約 120 km 離れた多点観測により精確に追跡できるとのここでの示唆は重要である。このことは、言い換えればオーロラフレアの伝搬フロントの移動を精密かつ正確におさえることが可能であることを実証している。すなわち、従来の共役性研究で目立つ点は、ある地点でのある種の現象の同時観測記録をタイムシーケンスの面を強調して比較解析することに主眼がおかれているように思える。このような視点による解析は、オーロラフレアの物理過程をある観測場所の時系列現象であると捉えている。しかし、磁気圏のエネルギー過程を反映するオーロラフレアは、時刻は同一でも場所が変われば現象そのものは著しく異なっているのが実際であることから、オーロラフレア現象から磁気圏のエネルギーの蓄積過程と放出過程などの物理機構を理解するには、このオーロラフレアの伝搬するフロントの移動を面的に押さえることが本質的で、オーロラフレアのフロントの移動を南北で精密かつ正確に観測することが重要である。このためには、南北共役点付近に機器性能が同一というばかりでなく、緯度的にも経度的にも同一間隔 (例えば約 100 km メッシュの観測点) の多点観測網を展開することである。こうした南北観測網の設立は、オーロラサブストーム時の高緯度側への拡大 (poleward expansion) フロントの移動と、西側への伝搬 (westward traveling surge) フロントの追跡を南北両域で二次元的なベクトルとして正確に捉

えることができる。また、このような南北観測網によって得られる地磁気脈動データは、ブラズマポーズの境界領域を挟んでの地磁気脈動現象を南北で同時に取得する可能性が高いのでその発生機構に関するきめの細かい新たな情報が得られるものと期待できる。著者等が実施した南極域における無人観測の構築を含む地上多点観測と地磁気共役性の研究はその第一歩として位置づけられる。

6. む す び

広大な南極域でオーロラ現象やこれに伴う超高層物理現象を地上観測で面的に掌握していくためには、昭和基地一点の観測では不十分で点観測から面観測への展開が必要である。南極観測の点観測から面観測への脱皮は、新しい有人基地の設立によって実現するのが望ましいが、予算的、設営的に困難度が見込まれることや人的確保にも不安が残る昨今の情勢も抱え、有人基地を設けることはそれほど容易とは思われない。そこで、広大な南極地域の面積に比べ圧倒的に観測点の少ない南極観測の実施体制と、面的な情報収集が不可欠となってきた極域超高層物理学研究の動向に呼応していくためには、無人によって観測データを取得する方策を確立することが極めて重要である。さらに、地球周辺の電磁気環境とそこでの太陽エネルギーの消費過程の解明に関する研究の動向は、人工衛星やロケット・大気球などの飛翔体観測と協同しての立体同時観測まで必要としてきている。

IMS 期間の多点観測網による観測計画の一環である超高層科学観測用無人観測は、著者のひとり鮎川が中心になり南極用にまとめあげた自然エネルギー利用による無人観測施設で実施した。南極大陸氷床上のみずほ基地周辺で初めて風力発電機を実運用したこの無人観測施設は、日本南極地域観測隊の観測活動において多点観測時代到来の先駆的役割を果たし、同時にオーロラ現象に代表される極域嵐現象の科学的観測データを無人により収得したことに大きな意義があった。特に、米国、豪州国など諸外国が IMS 期間に計画していた大規模な無人観測施設による多点観測が、観測事実の報告が少ない状況に比べ JARE の無人による観測が科学的に有効利用できる可能性の高い良質なデータを集録した事実は意義深い。以下、著者等の実行した IMS 期間の JARE 無人観測施設の開発研究とその実施について総括する。

(1) 南極大陸内陸部における無人観測システム設計の技術的基礎資料を収得し、日本南極地域観測事業の現在の観測体制規模で実現の可能性がある無人観測システムを考案し、その実用性を実地検証した。

(2) 南極大陸内陸部における無人観測システムの電力供給源として、風力発電機と二次蓄電池の組み合わせによる浮動電源方式が、予算的にも技術的にも最も現実的であることを提唱し、自然エネルギー利用による電力供給源の確保によって初めて科学観測を成功させた。電力供給システムの制御方法は、トラブルが多発したが最終的には電池端子電圧を検知する電圧比較器による充放電制御方式を確立し、初期の目的を達成する無人観測システムが完成

した

(3) 南極大陸氷床上の厳しい環境条件から観測機器等を保護するために、ここで採用した観測小屋および電池保温箱とその保温システムなどの手法が有効であることが確かめられた。ただし、保温壁部材の断熱性能、観測機器類の発熱量、保温用ヒーター容量および余剰電力処理方法など熱設計の見直しが重要である。

(4) 極域嵐現象の地磁気子午線に沿う時間空間変動の発達過程をより詳しく知るうえで有効なデータを集録した。

(5) 今後の検討課題

① 電力供給源としては、風力発電機に依存するばかりでなく太陽光発電装置をもシステムに取り入れ、自然風の強度が減少する南極の夏季期間にも無人観測システムの電力需要を十分満足させる方策を検討する。

② 電力供給源の浮動電源方式には、品質管理の高いエレクトロニクス素子を用いて、さらに安全性を高める制御回路の開発が必要である。

③ 電力供給源の確保の安全率を高める方法のひとつとして、風力発電機の複数基並列運用を検討する。

④ 風力発電機のブレード(回転翼)は、厳寒、強風、雪嵐などの環境に長期の間(少なくとも1年間)さらされても、破損または磨耗による消失の恐れのない材質や形状に関する機械工学的な検討が必要である。ブレードの材質は軽量性に優れることも要求される。ここで使用した風力発電機は、予算的・時間的制約の条件下で市販のカタログ製品より選定したが、南極の風況を再度見極めたうえで過酷な南極の自然環境に柔軟に適應できる南極型の風力発電機を開発研究する必要がある。

⑤ 電力貯蔵システムは、価格との兼ね合いを重視しつつも、より低温性能に優れ、小型、軽量かつ貯蔵電力量が大容量などの特徴をもつ蓄電池の調査が必要である。

⑥ 保温システムに関しては、観測小屋内温度とヒーター容量のバランス、余剰電力の処理方法に再考の必要がある。

⑦ 観測項目の増加とより高密度なデータ集録を必要とする観測(例えばVLF/ULF自然電波観測)に対応するために、低消費電力の観測器の開発、周波数特性の優れる長時間記録法の開発、デジタル長時間記録装置の開発、テレメトリー利用による観測記録の取得方法の開発および人工衛星利用によるデータ収集の検討などが重要である。

(6) IMS計画以後のJAREにおける無人観測

オーロラに伴う諸現象の多点観測網計画として、著者が発案した風力発電機利用による無人観測は、IMS計画以後1979年から1981年にかけてのPOLEX-South計画に引き継がれ、南極氷床上における気象無人観測システムに応用された。気象無人観測は、1979年および1980年の2カ年間に、Y100点(71°16'S, 46°32'E, 標高2545m)、H180点(69°35'S, 42°00'E,

標高 1543 m) および S16 点 (69°02'S, 40°03'E, 標高 553 m) などで実施された。

日本の南極観測の中心基地である昭和基地は、基地開設以来 40 有余年を経た今日、気象学、雪氷学、超高層物理学、地学などの地球物理学研究分野から、生物学、医学研究分野にわたる極域科学の総合観測所として発展している。極域科学総合観測所として発展した昭和基地は、一方で、高送信電力の通信やリモートセンシング技術の向上を背景とした各種能動的実験による観測計画の実践で電磁気環境が急速に悪化している。電磁気環境の悪化は、超高層自然現象を検出するセンサー設置場所として必ずしも良好な観測環境であるとはいえない。1981 年 1 月、超高層観測用検出器類の大半は、昭和基地（東オングル島）の西方約 5 km の西オングル島の一面に CPU 時代を先取りして移設されている。西オングル島の各種センサーと昭和基地の集録部は、テレメーター回線で結ばれて良質の超高層物理現象のデータ取得を可能にした。この西オングル島テレメーター送信施設は、保守要員による定期的な電池充電作業を必要とする以外は無人で運用されている。観測小屋、蓄電池および電力供給システムなどの無人運用施設は、IMS 計画で著者が実行した南極大陸氷床上の無人観測施設システムが基本的に応用されている。

国立極地研究所の極地設営工学研究グループでは、南極の変化の激しい環境条件（例えば、雪嵐や日照時間および外気温が季節により大きく変化し、また、強風日や無風日など風環境の大きな変動も頻繁に繰り返される）に適応可能な新しい南極型の風力発電機の開発研究と、強風、雪嵐などの磨耗作用に耐えるブレード（回転翼）の試作に取り組んでいる。これらの極地設営工学的な研究の基礎資料は、著者が考案した無人観測システムの南極地域における運用活動に基づいている。

1984 年初頭から日本の南極観測隊は、昭和基地の西南西約 670 km 離れたセールロンダーネ山地周辺へ地学調査隊を派遣して、この地域の学術調査と新基地建設計画の設営的な調査を開始した。超高層物理研究グループは、主として極域嵐現象の経度的特性を明らかにすることに主眼をおき、同時にオーロラ粒子の降下領域とオーロラ発光領域および自然電波発生領域などに関する詳細な議論を可能とするデータ取得を目的として多点観測網計画を立案し、この地域における基地建設と JARE の観測地域の拡大行動に参画した。セールロンダーネ山地周辺での多点観測網による観測計画は、マラジョージナヤ基地、昭和基地、みずほ基地の観測と連携するばかりでなく、地磁気共役点にあたる北半球のアイスランド地域にも多点観測網を張り、経度的緯度的にも広げた南北共役観測の実行を企てていた。これらの観測計画の具体化には、数多い無人観測拠点の敷設が基本的に重要で、著者の発案した JARE 型無人観測システムの応用が期待されたが、厳冬期のセールロンダーネ山地周辺の斜面下降風、地吹雪の発生状況は JARE 型無人観測施設の敷設には適さない環境にあることが判明し、セールロンダーネ山地周辺の無人による観測計画は不履行に終わった。

謝 辞

IMS 計画の一環としての南極域における超高層地上多点観測は、第 17 次隊、第 18 次隊および第 19 次隊が実行した。無人観測施設の建設とその維持には、各隊次の隊長をはじめとした関係観測隊員諸氏に絶大なるご支援を頂戴しました。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、岩上直幹博士、西野正徳博士は、各隊次の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かつ献身的にご尽力なされました。記して感謝の意を表します。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は、データ解析に当たって有意義な議論と多数のご教示をいただきました。江尻全機博士ほかの国立極地研究所超高層研究グループの皆様には、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。データ解析作業には国立極地研究所情報科学センターの計算機システムを利用いたしました。共役点のモデル計算には藤田裕一博士のお世話になりました。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) を利用いたしました。これら多数の方々と各機関に心からなるお礼を申し上げます。本観測計画は故永田 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を構築しました。國分征前名古屋大学 STE 研究所長 (第 18 次南極地域観測隊夏隊長) には、具体的な実践に当たっての数多い直接的・間接的な惜しみないご教示と叱咤激励を受けました。記して厚く感謝の意を表します。最後に、20 数年前の古いレポートの掲載を許可して下さった国立極地研究所編集委員会にお礼を申し上げます。

文 献

- 上田豊 (1971): 東南極みずほ高原付近の気象条件について。南極資料, **41**, 42-61.
- AKASOFU, S.-I. (1968): Polar and Magnetospheric Substorms. Dordrecht, D. Reidel, 280 p.
- AUSTRALIAN ACADEMY OF SCIENCE, ed. (1972): Australian Antarctic and Sub-Antarctic Research Programmes, 1971-1972. 23.
- AYUKAWA, M. and MAKITA, K. (1984): The relationship between auroral electrojet and visual aurora. Proc. Conf. Achievements of IMS, Austria, 379-382.
- 鮎川勝・巻田和男 (1998): 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領域との比較および南北地磁気共役性の変動—。南極資料, **42**, 20-63.
- 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., 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.
- BIRD, I.G. and HUMPHREYS, A.E. (1972): Unmanned geophysical observatory for antarctic operation. Proc., I.R.E.E., **33** (1), 7-22.
- BIRD, I.G. and SULZBERGER, P.H. (1976): Australian unmanned geophysical observatories in Antarctica. Mem. Natl Inst. Polar Res., Spec. Issue, **6**, 52-75.
- CHIVERS, H.J.A. and AXFORD, W.I. (1973): An investigation of high latitude ionospheric absorption. Antarct. J. U. S., **8** (5), 244-245.

- 伊藤正則・中尾正義・西山孝・高野共平 (1974): 南極における風力発電 (II). 極地, 9 (2), 8-13.
- JENNY, J.A., LAPSON, W.F. and SMITH, P.M. (1969): Developing an unmanned Antarctic geophysical station. *Antarct. J. U. S.*, 4 (6), 267-274.
- KHARIN, YE. P. (1974): Work with the "Beta-C" and "Penguin" isotopic thermoelectric generators in Antarctica. *Soviet Antarct. Exp. Inf. Bull.*, 8 (11), 564-568.
- 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.
- MATTHEWS, J.P., SMITH, A. J. and SMITH, I.D. (1979): A remote unmanned ELF/VLF goniometer receiver in Antarctica. *Planet. Space Sci.*, 27, 1391-1401.
- 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.
- NEW ZEALAND ANTARCTIC SOCIETY, ed. (1971a): Australian news-ANARE to have unmanned geophysical station. *Antarctic*, 6 (2), 61-62.
- NEW ZEALAND ANTARCTIC SOCIETY, ed. (1971b): Soviet traverse to Vostok. *Antarctic*, 6 (4), 128.
- NEW ZEALAND NATIONAL COMMITTEE FOR ANTARCTIC RESEARCH, ed. (1978): New Zealand Antarctic Research Report to SCAR, No. 20, 1-3.
- 日本学術会議 (1960): 南極観測第3次越冬隊報告. 気象観測, 43-44.
- 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堆積について. 南極資料, 54, 42-48.
- 大畑哲夫・勝田豊 (1983): 南極における無人観測 (II) - 第20, 21次隊におけるシステムの概要と結果の報告 - . 南極資料, 78, 117-139.
- 大林辰蔵 (1970): 宇宙空間物理学. 裳華房, 484 p.
- 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.
- SITES, M. J. (1973a): Unmanned geophysical observatory development. *Antarct. J. U. S.*, 8 (4), 178-179.
- SITES, M. J. (1973b): Unmanned geophysical observatory. *Antarct. J. U. S.*, 8 (6), 332-338.
- SITES, M. J. and PETERSON, A.M. (1975): Automatic meteorological station at the South Pole. *Antarct. J. U. S.*, 10 (4), 192-193.
- SMITH, P.M. and JENNY, J.A. (1968): Feasibility of automatic, unmanned geophysical observatories in Antarctica. *Records of the Antarctic Treaty Meeting of Experts on Logistics (Tokyo)*, 660-680.
- 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.
- WILLARD, H.R., HELMS, W. J. and LIEMOHN, H.B. (1973): The antarctic unmanned geophysical observatory magnetic micropulsation experiment. *Antarct. J. U. S.*, 8 (5), 249-252.
- 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.

(1999年5月13日受付; 1999年5月31日改訂稿受理)