2-9 南極電離圈観測

2-9 Ionospheric Observation in Antarctica

前野英生 直井隆浩 永原政人

MAENO Hideo, NAOI Takahiro, and NAGAHARA Masato

NICT では国内外での観測による宇宙環境監視の一環として、南極においても電離圏観測を行っ ている。第1次日本南極地域観測隊(1956年)から参加し、定常観測化して60年以上実施してい る南極電離圏観測は、学術的目的での利用に加えて南極での電離圏現象の基礎データとして、国際 的な役割を果たしてきている。例えば、国際電離圏標準モデルへの観測データの利用もその一つ である。現在も継続して行っている電離圏観測は、電離圏垂直観測と衛星電波シンチレーション 観測である。電離圏垂直観測は、装置の開発から観測、そしてデータ解析・公開まで一貫して運 用している。衛星電波シンチレーション観測は、GPS から更に多くの衛星を利用する GNSS を用 いた詳細な観測へ移行しつつある。また、オーロラは電離圏現象と密接な関係があるため、電離 圏垂直観測及び衛星電波シンチレーション観測データの解釈に必要なオーロラの光学観測も行っ ている。これらの観測によって取得されたデータは、準リアルタイムデータ伝送システムで昭和 基地から NICT へと伝送されている。

NICT has been conducting ionospheric observations in Antarctica since 1956, as a part of space environment monitoring observations in Japan and overseas. The observation data are used for academic purposes and as basic data for routine observations of Antarctic ionospheric phenomena. Antarctic ionospheric observations conducted for more than 60 years have played an international role. For example, the long-term observations in Antarctica have been input into the ionospheric standard model. The vertical ionospheric observation is being operated consistently from the development of equipment to observation, data analysis and publication. Satellite radio scintillation observations are shifting from GPS to GNSS for more detailed observations. Optical observations of aurora are also conducted to interpret the vertical ionospheric observations and satellite radio scintillation data because auroras are closely related to ionospheric phenomena. The data acquired by these observations are transmitted from Showa Station to NICT by a quasi-real-time data transmission system.

1 まえがき

1.1 南極における電離圏観測概要

NICT では太陽活動に伴う宇宙環境変動を把握し、 通信・放送・測位を安心・安全に利用していくために、 宇宙天気予報業務と研究開発を行っている。1957~ 1958年の国際地球観測年(IGY)の活動の一環として幕 を開けた日本南極地域観測隊において、電波研究所 (現 NICT)は初期から継続的に南極地域観測隊員を南 極に派遣し、電離圏観測を実施してきた[1]。第1次隊 (1956年)では、南極観測船「宗谷」の船上に電離圏観 測装置(イオノゾンデ)とアンテナを設置し、南極及び その移動中の航路において電離圏観測を実施した。昭 和基地での電離層定常観測(ここで、「電離層」は「電離 圏」と同義であるが、観測隊の業務・分野として「電離 層定常観測」という表現が使われるため、観測隊の分 野としては「電離層定常観測」と記す)は第3次隊(1959 年)から開始され、それ以降、毎次越冬隊員を派遣し て観測を継続している。第3次隊以降、イオノゾンデ 観測に加え、オーロラレーダ、リオメータ、短波電界 強度測定、VLF電波測定等、様々な観測を昭和基地に おいて実施し、オーロラ粒子降り込みの2次元分布特 性やオーロラ電波の発生頻度の太陽活動周期変動特性 の解明などの成果を挙げてきた。表1のような観測項 目で NICT が日本南極地域観測隊電離層定常観測とし て参加してきた。



1.2 国際的な観測意義

国際電波科学連合(URSI)では、無線通信システムの開発や電波伝搬研究への利用を目的として、世界各地の電離圏観測データを使って国際電離圏標準モデル

情報通信研究機構研究報告 Vol.67 No.1 (2021)

(IRI: International Reference Ionosphere)を策定し、 5年ごとに改訂している。モデルの精度向上には長期 にわたって安定した観測データが多地点から提供され る必要がある。南極において電離圏観測を60年以上に わたって実施しているのは我が国だけであり、昭和基 地における電離圏データは貴重であることから、観測 の長期的な継続を URSI の IRI ワーキンググループか らの要請でデータ提供をしている。また、NICT では、 国際学術連合 (ICSU) の勧告により電離圏世界資料セ ンター (WDC for Ionosphere) を運用し、世界各国の 電離圏に関するデータを収集・保存・公開している。昭 和基地での電離圏データは WDC にも送られ、全世界 で学術目的に利用されている。NICT の南極観測で取 得した電離圏データは、電気通信分野における国際連 合の専門機関である国際電気通信連合無線通信部門 (ITU-R)の電波伝搬に関する基礎資料として使われ ている。

2) 南極における電離圏観測

2.1 初期の電離圏観測(1956~1965年)

初期の電離圏観測(1956~1965年)は探検時代と 言っても過言ではない手探りの時代であった。第1次・ 第2次隊では南極観測船「宗谷」の船上及び昭和基地で の電離圏垂直観測を試験的に運用した。最初は、電離 圏からのエコーが観測されず故障かと思われたが、エ コーが観測されない現象により電離圏から反射がない ことが判明した。後日正常にエコーが観測され「ホッ」 としたというエピソードが残されている。昭和基地で の電離圏観測は、図1の越冬隊に参加した第3次隊か ら本格的に電離層定常観測として開始された[2][3]。

2.2 中層大気観測計画頃の電離圏観測 (1966 ~ 2008 年)

南極観測船「ふじ」が就航した、第7次隊(1966年)



図1 第3次日本南極地域観測隊越冬隊員 手前右は、若井登(旧電波研究 所長)と犬のタロー(南極観測25年誌より)

84



図 2 電離層棟の観測機群、写真は左から、9 B 型電離圏観測装置、オーロラレーダ 50 MHz・122 MHz、NNSS 測位誤差測定、データロガー、短波電界強度測定・ リオメータ 20・30・50 MHz・オメガ電波観測の観測装置等 (データは紙のチャートとデータロガーで記録された)

からは、図2のように電離圏の垂直観測に加え、オー ロラレーダ、リオメータ、短波電界強度測定、VLF 電 波測定等、様々な観測が昭和基地において実施された。 電離圏垂直観測以外のデータは、Japanese Antarctic Research Expedition data reports. Ionosphere[4] $\succeq \cup$ て、国立極地研究所から発刊された。その後、第25次 隊(1983年)からは南極観測船「しらせ」になり物資の 積載量は「ふじ」の倍の1.000トンとなり観測物資も大 幅に増えた。中層大気観測計画(ICSU(国際学術連合 会議。現、国際科学会議)が主唱し、1982~1985年末 まで実施された中層大気に関する国際協力観測計画。 MAP (Middle Atmosphere Program の略) ともいう。) では、宙空観測で実施されたロケットによる電離圏の 直接観測[5]や大型バルーンによるオーロラX線観測 及び VLF 観測、マルチビームリオメータ等に合わせ、 電離層定常観測では電離圏垂直観測(特別観測)、VHF オーロラドップラレーダ観測[6]、航行衛星 NNSS によ る衛星測位誤差観測[7]等が集中的に行われた[8]。オー ロラレーダは、第19次隊でドップラ観測機能が追加さ れよりオーロラジェット電流の速度や中層大気上部の 風速を測定することが可能となり、MAP では活躍を した。

2.3 近年の電離圏観測(2009年~現在)

2009年に就航した2代目南極観測船「しらせ」の翌年 2010年の第52次隊からからは、越冬隊ではなく夏隊 での参加となった。また、近年では、図3に示す旧電 離層棟及び電離層棟が老朽化となり電離圏垂直観測装 置2器は電離層観測小屋に設置し、屋外に設置する 40 m高のデルタアンテナ2基で観測を実施している。 また、GPS による衛星電波シンチレーション観測は電 離層観測小屋、管理棟、重力計室等に受信機を設置し て観測を実施している。昭和基地で収集された電離圏 関連データは、衛星回線を通じ国立極地研究所を経て NICT へ送られ、宇宙天気予報のための基礎データと して利用されている[9]。

詳細は、3「現在の電離圏観測」に記載する。



図3 昭和基地において、電離圏観測装置等を設置している建物及びデルタ アンテナ (2018 年現在)

3 現在の電離圏観測

3.1 電離圈垂直観測

3.1.1 概要

電離圏垂直観測は、南極昭和基地における観測当初 から実施されている電離圏観測である。電離圏は電子 密度に応じた周波数の電波を反射する性質がある。 図4のように電離圏垂直観測(イオノゾンデ観測)はこ の性質を利用し、地上から周波数を変えながら電波を 発射し、電離圏から戻ってくる反射エコー(イオノグ ラム)の時間を計測することにより、電離圏の電子密 度高度分布を知ることができる。この電子密度高度分 布が、通信・放送用の電波伝搬の状態を知る上で非常 に重要である。高緯度帯で発生するオーロラは電離圏 のじょう乱と強く関係していることが知られている。 図5に示すように、昭和基地では、1959年から現在に 至るまで長期にわたる電離圏観測を行っており、南極 での貴重な観測点となっている。近年では、電離圏長 期変動と地球温暖化との関連が指摘されるなど、電離 圏長期観測データの重要性が高まっている。

3.1.2 FMCW 電離圏観測装置の開発

電離層定常観測の冬季無人化への取組として、安定 運用が可能な FMCW 電離圏観測装置 (図 7) を新たに



図4 電離圏垂直観測の原理地上から電波を発射し、電離圏からの反射を 観測することにより電離圏の鉛直構造を得る。



図5 南極における電離圏垂直観測 昭和基地は 1959 年以来観測を継続的 に行っている。オーストラリアの MAWSON、DAVIS、CASEY の3 局は途中で運用を停止したが近年再開をしている。 開発し昭和基地に配備した。本装置は国内や東南アジ ア等で実績を積んできた低電力(100 W)なFMCW方 式を採用した。FMCW 電離圏観測装置の開発は平成 20年度より2台の装置を第51次隊により昭和基地に 設置し、テスト観測を開始した。その後、動作検証と 旧10C型電離圏観測装置との比較検証を行い、2016 年1月より、旧10C型に代わりFMCW電離圏観測装 置を主観測装置として運用を開始した。また、図6、 図7に示すように専門的知識や経験を有していなくと も故障対応ができるよう、システムの冗長化とモ ジュール化の機能をつけて、信頼性の高い装置が開発 された。

3.1.3 データ解析及び公開

電離圏垂直観測データは、衛星回線を通じて準リア ルタイムに昭和基地から NICT まで転送され、データ



図7 電離圏観測装置システムA、Bの一方が故障した場合、もう一方に容易に切替えが可能である冗長性と、故障をしているユニットを予備品と交換することにより専門的知識が無くとも修理が可能とするモジュール化した予備部品を持つ。



図 6 左は FMCW 電離圏観測装置 2 台で冗長化している。右は鉛直上向きに電波を送信し反射された電波を受信する送受信用デル タアンテナ。冗長化のため 2 基使用している。



図8 2010/05/12 現地時間 (LT) 12 時半頃に観測された典型的なイオノグラム 左図の FMCW 電離圏観測装置は、500 kHz から 16 MHz まで掃引 (横軸)して電離圏の見かけ高さ(縦軸:電波が電離圏から反射して受 信機に到達するまでの時間を高さに換算)を表し、電子密度に相当す る分布を示している。右図は、旧 10 C 型電離圏観測装置のイオノグ ラム。ほぼ同時刻に観測されたデータであるが、FMCW 型の方が シャープに観測されている。



図 9 南極電離層年報 2020 年 3 月の F 層臨界周波数 (foF2) のメディアンプ ロット 縦軸に周波数、横軸に時間 (昭和基地のローカルタイム)を示 す。日変化がみられる。

蓄積サーバに保管される。データ処理されたイオノグ ラムから、主要な電離圏パラメータを読み取り、手動 読み取りデータとして保存する。図8は、FMCW型 電離圏観測装置と旧10C型電離圏観測装置のイオノ グラム比較を示す。FMCW型のイオノグラムは、 シャープに表示されていることが読み取れる。この読 み取りデータから時系列の図を作成し、読み取りデー タと合わせて南極電離層年報(IONOSPHERIC DATA AT SYOWA STATION (ANTARCTICA))として年



図 10 昭和基地における長期観測から得られた F 層臨界周波数 (foF2) の年 変化 上図は太陽黒点数 (赤)、下図は foF2 (緑は昭和基地時間 12 時、 青は 0 時)を示す。太陽黒点数と良い相関を示す。

1回WEBで公開している。図9はその一部のプロッ ト例を示す。高緯度のイオノグラムは非常に複雑であ るため、これまで、専門家による目視により解析をし てきた。専門家による目視解析には熟練と時間を要す るため、今後は、計算機による自動的処理で高精度 データ解析を目指す必要性がある。図10は、昭和基地 における長期観測結果の例を示す。太陽黒点数とF層 臨界周波数(foF2)の良い相関がみられる。

3.2 衛星電波シンチレーション観測3.2.1 概要

GPS等の衛星測位とは、複数の測位衛星からの信号 を受信し、受信地点における位置を同定する仕組みで ある。測位衛星は主に高度2万キロに分布しているが、 図11に示すような衛星測位において、電離圏遅延・衛 星位置・衛星時計・マルチパス・対流圏遅延といった 様々な要因で、誤差が生じる。この中で電離圏遅延は 誤差の4割弱を占める最も大きな要因であると考えら れている[11]。

電離圏は、電離した (プラズマ化した) 気体の存在す る領域であり、電離圏内における電磁波の伝搬は、経 路における電子数の影響を受ける。電子密度分布の空 間的不規則性は、電波の位相を乱し、隣接する異なっ た位相の電波の干渉 (フレネル回折)によって電波の じょう乱を引き起こす。このじょう乱を一般にシンチ レーションと呼び、測位誤差の増大や、測位衛星信号 の受信障害の要因となる。シンチレーションを起こす 不規則構造の空間スケールは、フレネル半径で現され、 GPS 衛星から送信される L1 帯を受信する場合、フレ ネル半径は約 300 m である。

電離圏のシンチレーションを起こすメカニズムは、 赤道域と極域で大きく異なる。極域電離圏には、オー

ロラ粒子の降り込みが顕著であるオーロラ帯と呼ばれ る領域が存在する。オーロラ帯では、荷電粒子の降り 込みによって衝突電離が起こるが、オーロラ粒子降下 による電離は、主として分子イオンによって構成され るE領域において生じるため、再結合の時定数が短い。 よって、オーロラ帯では、オーロラが出現している領 域や時間帯においてのみ電子密度の増大が起こること となり、電子密度の時空間変動が激しいことが知られ ている[12]。オーロラ帯よりも極側の極冠域では、冬季 には1日中日照がなくかつオーロラも出現しないため、 その場におけるプラズマの生成がない。したがって電 子密度が非常に低くなることが予想されるが、プラズ マ対流の効果によって、極冠域にも高い電子密度の領 域が現れることが知られている。オーロラ帯における 局所的な電場構造によるプラズマ対流も、電子密度の 粗密構造の流れを生じ、シンチレーションに寄与する。

電離圏の電離の状態は一般に全電子数 (TEC: Total Electron Content) として表される。TEC は、測位衛 星から受信機までの電波伝搬経路に沿った単位断面積 当たりの電子数として定義されており、単位として、 [TECU] = 10¹⁶ [個 /m²] と定められている。垂直全電 子数 (VTEC: Vertical TEC) とは、TEC を観測地点に おいて、鉛直方向に換算した値である。全電子数測定 は、電離圏を伝搬する電波の群速度及び位相速度が、 電子密度及び周波数に依存することを利用する。具体 的には、例えば GPS 衛星は、L1 帯 (1.57542 GHz) 及び L2帯(1.2276 GHz)の2周波の搬送波を使って測位信 号を送信しているが、この2周波の位相速度遅延と群 速度遅延の差を取ることで、経路上の全電子数を計測 することが可能となる。

シンチレーションを示す指数として、一般に $S_4 \ge \sigma_{a}$

がよく用いられる。S₄とは、平均信号強度(振幅)で正 規化した信号強度変化の標準偏差として求められる。 シンチレーション指数の一つとしてよく用いられ、あ るひとつの観測波長帯(GPS の場合 L1 帯)から、50 Hz サンプリングにより60秒間隔で出力している。一方 σ_a は、振幅の変動を表す S₄に対して、位相の変動成分 の変動値の標準偏差として導かれるシンチレーション 指数の一つである。観測された搬送波位相を2次のバ ターワースフィルタ(ローパスフィルタ)に3度通すこ とで抽出する。

昭和基地における衛星電波シンチレーション観測で は、 $S_4 \ge \sigma_a$ に加え、TEC や搭載及び鉛直方向の測位誤 差も導いている。衛星測位に深刻な影響を与える電離 圏じょう乱の現象及び影響の測定を、測位衛星からの 信号を受信・分析することによって行い、衛星測位の高 精度利活用に資することを目的とする。昭和基地は オーロラ帯の直下に位置し、極域で発生するオーロラ 現象が引き起こす、赤道域とは異なる電離圏シンチ レーションに適している。物理現象の解明を通して、 宇宙天気現象の更なる理解に結びつけるのみならず、 ひいては測位高精度化を行う上で基礎データとなり得 る。入力信号は、観測記録ソフトウェアによって生デー タ、RINEX (Receiver Independent Exchange Format) 形式のデータ、シンチレーションデータ、TEC データ、 測位誤差データとして記録保存されている。

昭和基地においては、図12に示すとおり2種類の衛 星電波シンチレーション観測システムが動作している。 一つは、平成22年度(第52次隊)より順次設置された、 GPSのみを対象としたGPSシンチレーション観測シス テムであり、もう一つは、令和元年度(第61次隊)より 順次設置された、GNSS シンチレーション観測システ ムである。GNSS は、GPS 衛星に加えて、GLONASS、



測位衛星電波の地上における受信と、測位誤差を引き起こすシンチ 図 11 レーションの概要



図 12 昭和基地における GPS シンチレーション観測システム (黄色) 及び GNSS シンチレーション観測システム (赤色) の設置場所 A:電離圏観測小屋に両システム

B:管理棟に GPS システム(黄)、基本観測棟に GNSS システム(赤) C:重力計室に両システム

にそれぞれ設置されている。



図 13 GPS シンチレーション観測システムの構成

GALILEO、QZSS、BeiDou衛星からの信号も用いるも のである。どちらのシステムにおいても、50 Hz サン プリングによる定常観測を実施しており、シンチレー ションの発生に関する様々な特性を詳しく調査するこ とにより、高緯度帯における衛星測位精度向上を図っ ている。電離圏変動は、太陽活動度とも密接な関係が あることから、11 年の太陽活動周期よりも長期間の観 測を行うものである。

それぞれのシステムは、図12のように昭和基地に数 百メートルの間隔を置いて、3台ずつ設置する(GNSS シンチレーション観測システムについては、令和3年 度(第63次隊)に3台になる予定)。3台で受信される 信号の時間変化を相関解析することにより、シンチ レーションの原因となる電子密度不規則構造の移動速 度(プラズマのE×Bドリフト速度)の導出を狙いと している[13]。

3.2.2 GPS シンチレーション観測システム

昭和基地には3台、電離圏観測小屋(A)、管理棟(B) 及び重力計室(C)に、GPSシンチレーション観測シス テムが設置されている。最初の装置は平成22年度夏期 間行動中(第52次隊)に電離圏観測小屋と管理棟の2箇 所に設置され、翌年の平成23年度(第53次隊)夏期間 行動中に重力計室に設置された。それ以降、メンテナ ンスや停電等による一時的な停止を除き、3台による 定常観測が実施されている。

観測システムは、図13に示すとおりである。衛星からの電波は、GPS アンテナを通って GPS 受信機で受信され、RS232 C 信号として出力される。RS232 C 信号は、RS232 C-TCP/IP コンバータによって TCP/IP 信号に変換され、Linux サーバに入力される。図14、15には、アンテナ、受信機、制御 PC の実機例を示す。NovAtel 社製 GSV4004 B を受信機とし、Moxa 社製NProt5410 TCP/IP コンバータを利用して通信速度を上げている。受信機は、GPS の発する L1 及び L2 の二つの周波数を同時に、50 Hz のサンプリングレート



図 14 GPS シンチレーション観測システムのアンテナの一つ (昭和基地管 理棟に設置)



図 15 GPS シンチレーション観測システムの受信機部分の一つ (昭和基地 重力計室に設置)

で受信している。受信機の制御にLinuxを搭載したPC を用い、データ保存に外付けHDDを利用している。 アンテナにはNovAtel 社製のGPS-702-GG、アンプと して5D-SFAを用いている。

・垂直全電子数 (VTEC) と S₄

GPS シンチレーション観測から、図 16 の VTEC と 図 17 の S₄ をリアルタイムに求めている。

・データの公開

観測結果は準リアルタイムデータとしてインター ネットを通じ、南極観測の WEB ページ[10] から公開 されている。

3.2.3 GNSS シンチレーション観測

近年は、測位衛星として米国の GPS に加え、ロシア の GLONASS やヨーロッパの GALILEO、日本の QZSS など、複数のシステムが様々な波長帯で運用さ れており、これらを称して一般に GNSS (Global Navigation Satellite System)と呼ばれており、より高 度な測位システムの運用に用いられている。シンチ レーション観測においても、従来の GPS のL1 及び L2 だけを利用したシステムから、GPS (L1), GLONASS (L1), Galileo (E1), BeiDou (B1)1160-1252 MHz, GPS (L2/L5), Glonass (L2/L3), Galileo (E5), BeiDou (B2) の受信を可能にした所謂マルチ GNSS シンチレーション 観測が主流になっている。昭和基地での観測において 2 電離圏研究



図 17 ウェブサイトにて公開している S4の例

もこのシステムを導入し、令和元年(第61次隊)で基 本観測棟に1台設置、令和3年度(第63次隊)におい て電離圏観測小屋と重力計室に1台ずつ設置し、GPS シンチレーション観測システムと同様に、3台体制の 確立を目指している。

観測システムは、図 18 ~ 20 のように Septentrio 社 の PolarRx5S を受信機として、アンテナに PolarNt-x 及び Linux による制御 PC と外付け HDD によるストー レッジで構成されている。

マルチ GNSS 観測となったことから、観測により導



図 18 GNSS シンチレーション観測受信機と制御 PC ほか



図 19 GNSS シンチレーション観測用のアンテナ (昭和基地基本観測棟屋上 に設置)



図 20 GNSS シンチレーション観測の構成

かれる TEC は、全ての衛星を考慮した場合、GPS の みを考慮した場合、GPS と GLONASS を考慮した場 合、GPS と GALILEO を考慮した場合、など、様々な 組み合わせにより導くことが可能となり、より詳細な 分析が可能となった。またシンチレーション指数とし て、従来の振幅の変動を表す S₄ に加え、位相の変動を 表す σ_{a} も導いている。

本システムは、東南アジア地域に設置のシステム (SEALION)と同型機で構成されており、ソフトウェ



図 21 1日分の観測結果の例 上から VTEC、S4、σφ、測位誤差として南 北方向、東西方向、鉛直方向。VTEC、S4、σφの色の違いは、衛星 毎の違いを示す。縦軸の時間を合わせることで、シンチレーション 発生時間と TEC や測位誤差との比較をしやすくしている。

ア構成の統一も図っており、低緯度シンチレーション データとの比較を容易に達成できる。指数の導出や表 示システムにおいてはニーズに応じた改良を継続して おり、完成度を高めている。結果の例を図 21 に示す。 捉えたすべての衛星をプロットすると煩雑となるため、 GPSの結果のみを示している。また、IGU (International GNSS Service)が推定した精密軌道由来の精密測位の 結果を図 22 に示す。

3.3 光学観測

太陽からは太陽風が絶えず吹き出しており、磁場を 持つ地球のまわりには、磁気圏が取り巻いている。太 陽表面で爆発現象(太陽フレアやそれに伴って発生す



図 22 IGU が推定した精密軌道を利用した精密測位の結果 測位精度が 20分の1にまで向上している。



図 23 HNC ハウジング設置状況

ることのある CME (coronal mass ejection)等)が発生 すると、太陽風が一層強まり、強烈な太陽風が 地球に 吹き付け、磁気圏を大きく揺るがす。このような現象 が発生すると、地球の極域には磁気圏から太陽のエネ ルギーが流れ込みオーロラが発生する。オーロラは高 エネルギー電子 (KeV) が大気中の酸素や窒素原子を 励起して色とりどりに発光する現象であり、このよう な大気発光現象は電離圏における宇宙天気現象と密接 な関係があるため、FMCW 及び衛星電波シンチレー ション観測データの解釈に不可欠と言える。昭和基地 においては、2 基の光学観測装置が定常観測を行って



図 24 HNC によるオーロラの観測例



図 25 STWI 設置状況

いる。一つは高感度ネットワークカメラ HNC (Highsensitive Network Camera)、もう一つは光学フィル タを搭載した三色全天撮像イメージャ STWI (Syowa Three-color Whole-sky Imager)である。

3.3.1 高感度ネットワークカメラ HNC

高感度ネットワークカメラ(HNC)とは、一眼レフデ ジタルカメラを PC で制御して無人自動観測するシス テムである(図23)。オーロラや夜光雲の出現監視に使 用することを想定し、平成23年(第53次隊)の夏期間 に電離圏観測小屋の近くに設置され、定常運用を実施 している。昼と夜で撮影モードを変えながら連続観測 ができるように設計されている。

屋外に設置されたハウジングにはドーム窓が設けら れており、内部にはカメラ本体と、結露を防止するた めのファン及びヒータ、ヒータを制御するサーモス タットが備えられている。撮影データはUSBケーブル を伝って観測小屋内の制御 PC へ送られる。カメラは 主にニコン社製の D610 を用いており、魚眼レンズを 利用した広視野撮影を行っている。

自動運用ソフトウェアは Windows PC 上で動作し ている。USB ケーブルで接続されたカメラを制御し、 スケジュールファイルによって、撮影時間や撮影間隔 を設定できるほか、撮影モード・露出時間・絞り・露



図 26 STWI システム構成図 左側がカメラ等を収納するハウジング、ケーブルを通じて、右側が観測室内の設備を示す。

光補正を設定できる。3種類の撮影条件を保持でき、設 定した時刻で自動切替することが可能である。観測例 を図 24 へ示す。

システムの堅牢化とリモート制御性の向上のため、 Linux をベースとした新しいシステム (NHL: New HNC on Linux)の開発も行っており、機構のサロベツ 電波観測施設にて運用中である。カメラの制御には GNU GPL のアプリケーションソフトウェアである gPhoto2 を利用している。カメラにおいてもシャッ ターレスを採用し、耐久性も向上させている。

3.3.2 三色全天撮像イメージャ STWI

三色全天撮像イメージャSTWI (Syowa Three-color Whole-sky Imager)とは、代表的な三色のオーロラ観 測のための光学フィルタを搭載した3台のモノクロカ メラと、その観測結果を補うためのカラーカメラ1台 の、合計4台による同時撮像を可能にしたシステムで ある。令和元年(第61次隊)の夏行動中に、電離圏観 測小屋の屋上に設置され、定常運用を実施している。

ドーム窓を設けたハウジング内に全ての装置を収め、 ハウジングは、ネットワーク経由で、観測小屋内に設 置の制御 PC と結ばれている。システムの構成を図 26 に示す。ドーム窓を設置したハウジング内に、4 台の カメラだけでなく、エンコーダ、PC の他、結露を防 ぐためのヒータやファンを設置した、オールインワン システムとしている。機器の配置状況を図 27 に示す。 カメラにはアナログカメラを採用し、エンコーダに

よりデジタル化することで、安定した高速撮影を可能 とした。カメラ周辺機器について表2に示す。

モノクロカメラには、それぞれ光学フィルタを搭載 している。透過波長を表に示す。半値幅は10 nm 程度 と、高速撮像においても十分な光量が得られるよう、



図 27 ハウジング内の機器配置

表 2 機器の名称

Cameras	WAT-910HX (Monochrome)
	WAT-1200CS (Color)
Lens	Spacecom TV1634DC
Filters	Edmund Optics 430, 560, 632nm
Encoder	AXIS M7014

表3 透過波長と発光ターゲット

波長[nm]	元素
427.8	窒素分子
557.7	酸素原子
630.0	酸素原子



図 28 STWI による撮像例 (ぞれぞれ、カラー (左)、430 nm (上右)、560 nm (下左)、632 nm (下右)) カラー カメラの結果は、光量が不十分なため、他の結果と同様、白黒になっている。

広くとっている。観測からオーロラの絶対強度を導出 するため、国立極地研究所に設置の積分球を利用した 光学観測実験を、各カメラにて実施している。また、 暗電流を考慮するため、ダークの測定実験も実施して おり、発光現象の評価を定量的に行える。

オーロラは、最も明るい場合100キロレイリーを超 える明るさが期待される。カメラの感度特性から、比 較的暗いオーロラも撮影できるように、露出時間を 1/60秒×32回積分とした。データ取得は、ハードディ スクの容量の問題もあり、0.5 Hz としている。保守性 を向上するため、HTTPサービスを利用し、リアルタ イムでもデータを確認できるようにしている。観測結 果を図28に示す。カラーカメラは他の三つのモノクロ カメラと比較して比較的視野が狭く、かつ感度も悪い。 大気発光現象の確認にはあまり有用ではなかった。し かしながら、昼の画像は鮮明に捉えられており、モノ クロカメラでは難しい高層雲などの区別に有用である。

3.4 船上観測(長波電界強度測定)

電波時計に使われている長波標準電波の遠距離への 伝わり方を知るために、時空標準研究室の協力の下、 長波標準電波の電界強度と位相変化の観測を「しらせ」 が日本と南極を往復する航路上で2007~2016年まで 実施した(図29)。この観測データを、NICTが開発し ている長波の遠距離への伝わり方を求める新たな計算 法に基づく計算結果と比較し、観測が計算結果とよく 一致することを示した。この計算法は、長波の遠距離



図 29 長波電界強度測定:アンテナと観測機材

への伝わり方を求める計算方法の国際標準として 2009年に国際電気通信連合の無線通信部門(ITU-R) に認められた[14][15]。

4 宇宙天気予報データに必要なデータ収集

4.1 概要

高緯度地域に位置する南極昭和基地で観測される電 離層定常観測データは、宇宙天気の現況把握と予報の 基礎データとしている。また、シミュレーションモデ ルのインプットデータとして採用が期待される。現況 の把握と予報利用には、データ収集に即時性が求めら れるが、日本から直線距離で約14,000 km 離れた特異 な環境となる昭和基地との情報の授受は困難なものと なる。しかし今日においては、図30のように昭和基地 に滞在する南極地域観測隊はインテルサット衛星によ る衛星通信システムを用いた国立極地研究所管理の



図 30 南極昭和基地から情報通信研究機構へのデータ伝送 電離圏垂直観測、GPS 衛星電波シンチレーション観測、データロガーデータ、 カメラ映像、地磁気データ等必要なデータを衛星回線で NICT まで準リアルタイムに伝送している。

ネットワークを利用することで、数十分程度の遅延で 日本国内との情報授受を可能としている。

4.2 伝送する観測データ

当研究室が南極観測隊員を派遣している電離層定常 観測部門では、FMCW 電離圏垂直観測装置及び GPS 衛星電波シンチレーション観測装置により取得された 観測データ、電離圏垂直観測の補助データとして用い る宙空圏変動部門観測の地磁気観測データや、観測装 置の動作確認のための機器ステータス情報、高感度 ネットワークカメラ映像といった機材保守情報等を、 NICT が日本国内に構築する NICT クラウドに構成さ れた仮想マシン及び大規模ストレージシステムへ準リ アルタイムでネットワーク伝送している。それに加え て、近年では GNSS 衛星電波シンチレーション観測、 全天イメージャ等試験観測についても同様にデータの 収集と伝送を行うこととしている。一方で、インテル サット衛星通信システムで利用可能なネットワーク帯 域幅には制限があることにより、大容量の観測データ (RAW データ)については昭和基地側の装置で簡易的 な解析を実行している。特に必要な情報を抽出し抜粋 するポストプロセス処理を実施しており、データ容量 を小さくした加工済みデータを優先して転送している。 この処理により低負荷、低遅延なデータ転送を実現し ている。

4.3 データ転送に用いる装置

第62次観測隊(令和2年度)では、第52次観測隊(平

成22年度)より運用していた昭和基地電離層棟及び電 離層観測小屋に設置されたLinuxサーバによるデータ 転送システム2式に代わり、後継機となる新型データ 転送システム1式を基本観測棟に設置し、観測データ の収集と転送機能を集約し、更なるデータ伝送の効率 化を図った。この新型観測データ転送システムは、OS にLinuxを搭載した約64 TBのデータ保存領域を持つ ストレージサーバとした。昭和基地に設置された電離 層定常部門の各観測装置に蓄積された観測データは新 型データ転送システムに集積され、その後日本国内に 構築される NICT クラウドの大容量ストレージに転送 される。転送されたデータは、データ保全と利活用向 上のため NICT 本部(小金井)に設置されている南極観 測データ蓄積用サーバにも複製され保管される。

図 31 に示す新型データ転送サーバによるデータ収 集・転送は、全て自動化されている。自動処理に用い ているプログラムは、昭和基地という特殊な環境から 障害発生時の緊急対応を NICT 以外の南極観測隊員が 行う可能性を鑑み、取り扱いの平易さ、保守性の向上 を目的に標準的な Linux プログラムを中心に用いた専 用の Perl 及び Bash シェルスクリプトとして開発を 行った。

衛星通信システムによるデータ転送には不向きであ る大容量の観測 RAW データ及び高解像度画像等は、 毎年 NICT が派遣する観測隊員が、昭和基地での夏期 行動期間中にポータブルストレージへ複写を行い、持 ち帰ることとしている。



図 31 昭和基地基本観測棟に設置された新型データ転送システム外観

5 まとめと今後の観測

NICT が参加してきた日本南極地域観測隊電離層定 常観測の歴史的背景や近年の観測について報告した。 今後の南極電離圏観測は、より詳細で高精度な観測が 実現できるよう、電離圏垂直観測では、電離圏反射エ コーの OX 分離(正常波・異常波分離)や、電波到来方 向推定、電離圏斜入射観測など多目的で広範囲な観測 をめざしたい。加えて、観測の安定化・操作性の向上 及びデータ処理の自動化を推進すべきであろう。衛星 電波シンチレーション観測では、近々、GNSS による 観測を構築したい。また、宇宙天気予報データに入力 する必要なデータ収集では今後とも継続して実施し充 実をさせたい。

謝辞

南極昭和基地における電離圏観測は、総務省からの 委託業務「南極地域観測事業における電離層観測」に基 づき実施されております。ご教示感謝申し上げます。 また、歴代の南極観測に携わった皆様に感謝するとと もに、元電波研究所所長故若井登氏、故大瀬正美主任 研究官におかれましては初期の観測に多大なご尽力を 頂きました。心より感謝申し上げます。

【参考文献】

- 1 南極昭和基地における電離圏観測歴代隊員一覧,https://iono-syowa.nict. go.jp/history/members.html
- 2 若井登, "南極観測-昭和基地における電波諸観測-," 電波研究所ニュー ス, no.11, 1977.
- 3 大瀬正美, "南極観測の想い出," 電波研究所ニュース, no.87, 1983.

- 4 National Institute of Polar Research, "Japanese Antarctic Research Expedition data reports. Ionosphere (ISSN 0075-3343)," no.1–78,1968–2010.
- 5 宮崎 茂, "南極昭和基地における電離層のロケット観測," 電波研究所季 報, vol.20, no.109,1974.
- 6 五十嵐喜良,小川忠彦,倉谷康和,藤井良一,平沢威男, "昭和基地 50 MHz ドップラー・レーダによるオーロラ観測," 電波研究所季報 1982 年 6 月~ 9 月の太陽地球間擾乱現象 IV. 電離圏擾乱,vol.31 特 2, pp.193–199,1985.
- 7 小川忠彦,前野英生,五十嵐喜良,相京和弘,倉谷康和,"極域電離圏擾乱と NNSS 衛星測位誤差の関係,"電波研究所季報, vol.34, no.170, 1988.
- 8 福西浩,"第26次南極地域観測隊越冬隊報告 1985-1986,"南極資料, vol.31, no.1,1986.
- 9 長妻 努, "南極昭和基地における 電離層定常観測 宇宙天気の現況把握 と長期変動の理解に向けて-," NICT NEWS, no,427, 2013.
- 10 南極昭和基地における電離圏観測準リアルタイムデータ, https://ionosyowa.nict.go.jp/data/realtime.html
- 11 P.Misra and P.Enge, "Global Positioning System Signals," Measurements and Performance, Ganga Jamuna Press, 2001.
- 12 細川敬祐, "地球電離圏," 小特集太陽系プラズマ, J. Plasma Fusion Res., vol.90, no.12, pp.764-768, 2014
- 13 Y. Otsuka, K. Shiokawa and T. Ogawa, "Equatorial Ionospheric Scintillations and ZonalIrregularity Drifts Observed With Closely-Spaced GPS Receivers in Indonesia," Journal of the Meteorological Society of Japan, vol.84A, pp.343–351, 2006.
- 14 野崎 憲朗,土屋 茂,今村 國康,前野 英生,長浜 則夫,梅津 正道, 若井 登,"長波標準電波の伝搬実験と電界強度計算法の開発,"電子情報通 信学会論文誌, vol.J92-B, no.12, 2009.
- 15 Recommendation ITU-R ,"Prediction of field strength at frequencies below about 150 kHz," pp.684–687, 2016.



前野英生 (まえの ひでお)

電磁波研究所 電磁波伝搬研究センター 宇宙環境研究室 博士 (工学) 電波工学



電磁波研究所 電磁波伝搬研究センター 宇宙環境研究室 有期研究技術員 博士 (理学) 天文学

直井隆浩 (なおい たかひろ)



永原政人 (ながはら まさと) 電磁波研究所 電磁波伝搬研究センター 宇宙環境研究室 有期研究技術員