

南極大気精密観測に基づく地球気候変動機構に関する研究—第IX期南極地域観測事業重点研究観測計画—

佐藤 薫 [1]; 堤 雅基 [2]; 佐藤 亨 [3]; 中村 卓司 [2]; 齊藤 昭則 [4]; 富川 喜弘 [2]; 西村 耕司 [2]; 高麗 正史 [1]; 西山 尚典 [2]; 江尻 省 [2]; 阿保 真 [5]; 川原 琢也 [6]; 水野 亮 [7]; 長濱 智生 [7]; 鈴木 秀彦 [8]

[1] 東大・理; [2] 極地研; [3] 京大・情報学・通信情報システム; [4] 京都大・理・地球物理; [5] 首都大・システムデザイン; [6] 信州大・工; [7] 名大・STEL; [8] 明治大

A study on earth climate change based on fine observations of the Antarctic atmosphere

Kaoru Sato[1]; Masaki Tsutsumi[2]; Toru Sato[3]; Takuji Nakamura[2]; Akinori Saito[4]; Yoshihiro Tomikawa[2]; Koji Nishimura[2]; Masashi Kohma[1]; Takanori Nishiyama[2]; Mitsumu K. Ejiri[2]; Makoto Abo[5]; Takuya Kawahara[6]; Akira Mizuno[7]; Tomoo Nagahama[7]; Hidehiko Suzuki[8]

[1] Graduate School of Science, Univ. of Tokyo; [2] NIPR; [3] Communications and Computer Eng., Kyoto Univ.; [4] Dept. of Geophysics, Kyoto Univ.; [5] System Design, Tokyo Metropolitan Univ.; [6] Faculty of Engineering, Shinshu University; [7] STEL, Nagoya Univ.; [8] Meiji Univ.

<http://pansy.eps.s.u-tokyo.ac.jp>

For better future projection of the environmental change due to the increase in green house gases and the decrease in sea ice, we need to understand precisely the atmospheric circulation and elucidate the embedded mechanisms. The polar region occupies one of the most important positions in the earth climate system, because it is the start and end region of the general circulation depending on the season and height. It is well known that the general circulation is mainly driven by atmospheric waves. However, comprehensive studies are needed to elucidate characteristics of the gravity waves among main drivers in particular in the polar region.

As gravity waves are not resolved by most climate models, the models include the momentum transport by gravity waves using parameterizations. However, a current generation of parameterizations does not sufficiently capture the gravity waves in the real atmosphere. Recent studies using high-resolution general circulation models and high-resolution satellite observations indicate that the gravity wave activity is maximized in winter high latitudes and minimized in summer high latitudes. These features are not expressed in the current gravity wave parameterizations. Thus, the understanding of the gravity wave characteristics in high latitudes is essential to improve the climate model. In particular, observational studies for quantitative estimates of the momentum flux associated with gravity waves in high latitudes are needed.

The PANSY radar installed at Syowa Station during the JARE VIII period is the only instrument that enables to directly estimate the momentum fluxes associated with the gravity waves in the Antarctic. The PANSY program is planned in 2000. After feasibility studies during the JARE VII period, the radar was installed by Japanese economic stimulus package in the fiscal year of 2009. Continuous observations with a limited system started in April 2012 and observations by the full system were successfully performed in March 2015, by overcoming various serious problems such as heavy snowfall and limited transport to Syowa Station. In addition, various radio and optical observation instruments which provide complementary data to the PANSY observations are operated or being installed.

This project is to promote the integration of various radio and optical observations with the PANSY radar as the main instrument, and the global network observation including MST/IS radars under the international collaborations. Combining these observation data over the globe with the high-resolution model simulations, we will deepen our knowledge and improve understanding of the general circulation from the troposphere to the lower thermosphere of the earth atmosphere. This project was accepted as one of the intensive research observations for the JARE IX period, which assures continuous observations at Syowa Station over six years from 2016-2022.

温室効果気体の増加、海氷の縮小などの地球環境の変動を理解し、将来予測に繋げるためには、連動する大気大循環の正確な把握とメカニズムの理解が必須であるが、不十分な状況にある。極域は大気大循環の終着点・出発点であり地球気候システムの中で極めて重要な位置にある。大循環は主に大気波動によって駆動されており、その主要な駆動源のうち最も実態が未解明なのが重力波である。重力波は気候モデルでは解像できないため、その作用をパラメタリゼーションにより組み込まれているが、これには様々な問題がある。最近の高解像大気大循環モデル研究や高解像衛星観測の研究により、重力波活動度は夏の高緯度域で極小、冬の高緯度域で極大となるなど現在のパラメタリゼーションで表現されない事実が明らかとなり、極域重力波の把握が気候モデル改良の鍵であるとわかってきた。とくに重力波による運動量輸送に関する定量的な観測研究が待望されている。

第 VIII 期南極重点観測設備として昭和基地で稼働中の南極初の大型大気レーダー（PANSY）は、重力波の運動量輸送の定量推定が可能な唯一の測器である。PANSY は 2000 年に立案され、第 VII 期のフィジビリティ研究を経て、H21 補正予算で建設が開始された。この間、しらせの 2 度の接岸断念等の困難が生じたが、52 次で建設・初観測に成功し、53～55 次では定常観測と共に 47 群までの拡張がなされ、56 次隊により全 55 群の調整が終了し、2015 年 3 月に全群による本格観測が開始された。また、これと併せて昭和基地では PANSY に相補的なデータを取得可能な各種電波・光学観測が整備・運用されている。

2014 年 11 月に第 IX 期南極観測重点研究観測として採択された本計画は、H28 年度からの 6 年間（58～63 次）、PANSY フルシステムによる観測を軸に、各種電波・光学観測を組み合わせ、国内外の機関と協力し、全球ネットワーク観測を行って、これを高解像度大気大循環モデルによりつなぐ世界初の総合的な地球気候システム研究を進めるものである。これによって対流圏から下部熱圏までの全大気大循環の維持・変動機構の全容解明を目指すことになる。また、第 IX 期は PANSY 計画の中心期間であり、全 55 群での 6 年間集中・連続観測を行う予定である。目的を以下にまとめる。

1. 大気大循環のメカニズム解明：PANSY による高解像度観測を行い、重力波の発生、伝播、砕波の物理メカニズムを研究する。また、大循環と深く関係するカタバ風・極成層圏雲・極渦・オゾンホール・成層圏突然昇温・極中間圏雲などの南極固有の現象も研究対象とするほか、対流圏界面における輸送・混合過程にも光をあてる。

2. 太陽地球系としての地球外環境に対する極域大気応答の解明：極域では、宇宙空間からのエネルギー注入や流星ダスト等の地球外物質の流入による大気組成やエネルギー収支の変動が起こる。極域冬季（PMWE）及び夏季エコー（PMSE）等の極域固有の電波散乱現象に対し、光電波観測、衛星観測等を共同展開してこれらの地球外起因の現象を調査する。また、PANSY 全群による南極初の IS 観測を嚆矢として、電離圏にも観測範囲を広げる。

3. 電波・光学同時観測の充実による大気現象の変動の多角的理解：様々な南極固有現象の変動の深い理解には、PANSY の風観測に加えて各種電波・光観測装置による多角的観測が有効である。すでに導入済みの高機能ライダー、大気光イメージャ、ミリ波分光放射計、MF レーダー等の観測を継続・強化する。特に、ライダーは上部中間圏・下部熱圏の原子・イオンの共鳴散乱にも対象を拡張し、降下粒子や電離・中性大気結合に研究領域を広げる。

4. 国際共同ネットワーク観測と高解像度大循環モデルの結合による総合研究：PANSY を要として、我が国主導のグローバルな大型大気レーダーネットワーク観測を展開する。関連する国際組織を通じて広く参加を呼びかける。この観測には、大気光イメージャネットワーク（ANGWIN）など相補的観測も含める。高解像度大気大循環モデルグループとも連携し、モデルでこれらの観測データをつなぎ、地上から下部熱圏までの全球的な運動量・エネルギー収支を定量的に解明する。

大型大気レーダーによる電離圏擾乱の研究

山本 衛 [1]
[1] 京大・生存圏研

Study of ionospheric irregularities with large atmospheric radars

Mamoru Yamamoto[1]
[1] RISH, Kyoto Univ.

We were successful of using the MU radar and the Equatorial Atmosphere Radar (EAR) for the study of ionospheric irregularities. Multi-beam capability of these radars were very powerful tool to study time-spatial structure of the phenomena. In this presentation we review observation method and results from the radar experiments, and discuss possibility of PANSY radar that was recently completed at Antarctic Syowa base.

MUレーダーおよび赤道大気レーダー（以下ではEAR）は電離圏擾乱の研究においても有用な装置である。電離圏擾乱の本質は電子密度勾配と電界の組み合わせによって生じるプラズマ不安定現象であり、プラズマの移動度（あるいは電導度）が地球磁力線の方向に沿う強い異方性を持つため、磁力線に沿って広がる。つまり、レーダーではアンテナビームを地球磁力線に対して直交方向に向けることで効率よく観測される。さらに、電子密度擾乱の波長スペクトルのうち、レーダー電波の半波長に相当する成分がレーダーエコーの寄与する。アクティブフェーズドアレイ方式をとるレーダーでは、アンテナビームを東西に振り向けることによって、東西数百 km の範囲の擾乱を捉えることができる。我々は、これまでMUレーダーを用いて中緯度電離圏のE領域（高度90-120km）においては準周期エコーを、F領域ではプリューム（泡）と名付けた構造を発見してきた。特にF領域の擾乱現象は、GPS-TEC観測や630nm大気光観測で捉えられる中規模電離圏擾乱（MSTID）に対応することが分かっている。一方EARにおいては、プラズマバブルの観測を長期間にわたって継続的に実施してきた。MUレーダーおよびEARによる電離圏擾乱の研究では、送信パルス毎にアンテナビーム方向を切り替える多ビーム観測が特に威力を発揮してきた。今回の講演では、これまでの大型レーダーによる電離圏擾乱の研究成果を概観するとともに、南極に完成したPANSYレーダーの可能性について議論する。

南極大型大気レーダーにおける電離圏観測のためのサブアレイを用いたアダプティブクラッター抑圧

橋本 大志 [1]; 西村 耕司 [2]; 佐藤 亨 [1]; 佐藤 薫 [3]; 堤 雅基 [2]
[1] 京大・情報学・通信情報システム; [2] 極地研; [3] 東大・理

Basic study of adaptive clutter rejection technique with small sub array for Ionospheric observation of the PANSY radar

Taishi Hashimoto[1]; Koji Nishimura[2]; Toru Sato[1]; Kaoru Sato[3]; Masaki Tsutsumi[2]
[1] Communications and Computer Eng., Kyoto Univ.; [2] NIPR; [3] Graduate School of Science, Univ. of Tokyo

The PANSY (Program of Antarctic Syowa) MST/IS radar has a VHF active phased array with 1045 crossed Yagi antennas at Syowa Station, Antarctica. Receiver outputs of every 19 antennas are synthesized in-phase, constituting 55-channel adaptive array. The PANSY radar also has another antenna array (FAI array, in later) for the observation of the Field Aligned Irregularities (FAIs,) which consists of 24 Yagi antennas directed to where the line of sight crosses perpendicularly with the geomagnetic field line of the earth. The FAI array has 8 channels, with each 3 antenna output combined in-phase.

In ionosphere observations, the main and FAI arrays are designed to work simultaneously for observing the incoherent scatterings and FAIs, respectively.

While FAIs are of great interest for the PANSY radar, they are also assumed to be clutters for the observations of ionospheric incoherent scatterings and cause errors in estimating plasma parameters around 230 km, because they are very strong coherent radio sources at the same range.

In this presentation, the result of basic study for suppressing FAI clutters in the ionosphere observations of the PANSY radar is shown. The methodology is based on the norm- and directionally constrained minimization of power (NC-DCMP) algorithm, and modified to be used with nonuniform-gain array. The receiver outputs of the main array are all synthesized nonadaptively and the FAI array is used as the sidelobe cancellers in this method. The simulational result shows that the proposed method enjoys smaller SNR loss and much less computational cost than the ordinary uniform-gain NC-DCMP method. Also the proposed method is tested on an actual observation of the atmosphere and coherent clutter sources (the ground and a helicopter) by the PANSY radar with FAI array.

宇宙空間からの超高層大気観測と大型大気レーダーの同時観測

齊藤 昭則 [1]; 山崎 敦 [2]; 坂野井 健 [3]; 吉川 一朗 [4]; 山本 衛 [5]; 穂積 裕太 [1]

[1] 京都大・理・地球物理; [2] JAXA・宇宙研; [3] 東北大・理; [4] 東大・理・地惑; [5] 京大・生存圏研

Coordinated observation of the upper atmosphere by the space-borne instruments and the large atmospheric radars

Akinori Saito[1]; Atsushi Yamazaki[2]; Takeshi Sakanoi[3]; Ichiro Yoshikawa[4]; Mamoru Yamamoto[5]; Yuta Hozumi[1]

[1] Dept. of Geophysics, Kyoto Univ.; [2] ISAS/JAXA; [3] Grad. School of Science, Tohoku Univ.; [4] EPS, Univ. of Tokyo; [5] RISH, Kyoto Univ.

The Earth's upper atmosphere is the region where the observational method is limited because of the difficulty of the approach. The large-scale atmospheric radar is the one of the techniques that can elucidate the Mesosphere, Thermosphere and the Ionosphere using various scattering mechanisms from these regions. The ground-based observation can observe over a fixed location with relatively continuous coverage in time. The space-borne instruments on satellites and rockets is another technique for the upper atmospheric observation. The in-situ and remote sensing observations by space-borne instruments can investigate these regions with relatively large field-of-view and without limitation by the local conditions, such as the weather and the moon phase. The coordinated observation of these two observational method is a very powerful tool to study the upper atmosphere where the various phenomena are generated by the combined processes of the neutral and ionized atmospheres. At mid latitudes, the MU radar has conducted several coordinated observations with space-borne instruments. The observation with the Swedish satellite, Freja, elucidated the relation between the Medium-Scale Traveling Ionospheric Disturbances (MSTID) observed by the incoherent scatter (IS) observation of the MU radar, and the Midlatitude Electric field Fluctuations (MEF) observed by the electric field observation of Freja. MSTID was also investigated by the another coordinated observation of the MU radar with the ISS-IMAP mission on the International Space Station (ISS). The horizontal structures obtained by the large field-of-view observation of the ISS-IMAP/VISI instrument was combined with the vertical profile observation of the MU radar to reveal the three-dimensional structures of the phenomenon. The atmospheric gravity waves observations of ISS-IMAP/VISI also can be combined with the PANSY radar observations although the observational field-of-views are not overlapped. The achieved results and learned difficulties of the coordinated observation between the space-borne instruments and the large atmospheric radar, including the IS radar will be discussed in the presentation.

超高層大気イメージングシステムによるオーロラ帯付近での熱圏・電離圏の撮像観測

塩川 和夫 [1]; 大塚 雄一 [1]; 大山 伸一郎 [2]; Connors Martin[3]
[1] 名大 STE 研; [2] 名大・太陽研; [3] Centre for Science, Athabasca Univ.

Imaging observation of thermosphere and ionosphere near the auroral zone using the Optical Mesosphere Thermosphere Imagers (OMTIs)

Kazuo Shiokawa[1]; Yuichi Otsuka[1]; Shin-ichiro Oyama[2]; Martin Connors[3]
[1] STEL, Nagoya Univ.; [2] STEL, Nagoya Univ.; [3] Centre for Science, Athabasca Univ.

<http://stdb2.stelab.nagoya-u.ac.jp/omti/index.html>

The Optical Mesosphere Thermosphere Imagers (OMTIs) consists of 14 airglow imagers, 5 Fabry-Perot interferometers (FPIs), 3 airglow temperature photometers, and 3 meridian-scanning photometers to measure dynamical variations of the mesosphere, thermosphere and ionosphere through airglow emissions. Two imagers and an FPI are located in and near the auroral zone at Athabasca (imager #7), Canada and Tromsø (imager #12 and FPI #01), Norway. These imagers observe gravity waves in the mesopause region and nighttime medium-scale traveling ionospheric disturbances (MSTIDs) in the thermosphere/ionosphere as well as neutral wind variation in the lower thermosphere. These phenomena show characteristics different from those observed at middle and low latitudes. In this presentation we show the differences of the waves and disturbances in the mesosphere and thermosphere in/near the auroral zone, and discuss their importance in the dynamics of the upper atmosphere and magnetosphere-ionosphere coupling processes.

共鳴散乱ライダーによる極域超高層大気の研究

津田 卓雄 [1]; 中村 卓司 [2]; 阿保 真 [3]; 江尻 省 [2]; 西山 尚典 [2]; 川原 琢也 [4]
[1] 電通大; [2] 極地研; [3] 首都大・システムデザイン; [4] 信州大・工

Research in the polar upper atmosphere by the resonance scattering lidar

Takuo Tsuda[1]; Takuji Nakamura[2]; Makoto Abo[3]; Mitsumu K. Ejiri[2]; Takanori Nishiyama[2]; Takuya Kawahara[4]
[1] UEC; [2] NIPR; [3] System Design, Tokyo Metropolitan Univ.; [4] Faculty of Engineering, Shinshu University

The resonance scattering lidar is a valuable tool for remote sensing of the upper atmosphere. In this presentation, we will show a couple of topics in the polar upper atmospheric research using the resonance scattering lidar, and then we would like to discuss coordinated observation with the frequency-tunable resonance scattering lidar, to be installed at Syowa Station (69S, 39E) in Antarctica, and colocated instruments, such as PANSY.

共鳴散乱ライダーは、超高層大気のリモートセンシングにおける貴重なツールのひとつである。本講演では、共鳴散乱ライダーを用いた極域における超高層大気研究について幾つかのトピックを紹介しながら、南極昭和基地に導入予定の波長可変ライダーと既設の観測装置 (PANSY など) との連携観測などについて議論していきたい。

EISCAT 及び EISCAT_3D レーダーを用いた北極域超高層大気の国際共同研究

小川 泰信 [1]; 宮岡 宏 [1]; 野澤 悟徳 [2]; 大山 伸一郎 [2]; 津田 卓雄 [3]; 中村 卓司 [1]; 藤井 良一 [2]
[1] 極地研; [2] 名大・太陽研; [3] 電通大

International collaborative studies on the arctic upper atmosphere based on the EISCAT and EISCAT_3D radars

Yasunobu Ogawa[1]; Hiroshi Miyaoka[1]; Satonori Nozawa[2]; Shin-ichiro Oyama[2]; Takuo Tsuda[3]; Takuji Nakamura[1]; Ryoichi Fujii[2]
[1] NIPR; [2] STEL, Nagoya Univ.; [3] UEC

<http://eiscat.nipr.ac.jp/>

Japan joined the European Incoherent Scatter (EISCAT) Scientific Association in 1996 to promote international collaborative studies with incoherent scatter radars in northern Scandinavia and Svalbard. The EISCAT radars enable us to measure basic ionospheric parameters from the mesopause region to the topside ionosphere. In addition, the combination of the EISCAT systems in northern Scandinavia and Svalbard allows extended investigations of ionosphere in the auroral zone and the polar cap. Coordinated measurements with other ground-based instrumentation, satellites, and rockets are also actively carried out, in order to understand various geophysical and plasma-physical phenomena that occur in the arctic upper atmosphere. However, there are many difficulties to investigate physical phenomena characterized by their rapid variability in time and in space.

The EISCAT Scientific Association has therefore proposed a plan to construct a new state-of-the-art incoherent scatter radar system, named EISCAT_3D, in northern Scandinavia. The EISCAT_3D is a multistatic active phased array radar system to observe three dimensional plasma parameters. The EISCAT_3D radar system will contribute to space plasma and solar-terrestrial physics, and also improvement of the space weather and climate models. A document of the EISCAT_3D science cases was published by international science working groups as part of the EU-funded Preparatory Phase project for the new facility. The EISCAT_3D is included in the Japanese Master plan 2014 and Roadmap 2014 project named "Study of Coupling Process in the Solar-Terrestrial Systems", and researchers in Japan have prepared and discussed science plans using the EISCAT_3D radar system.

In this paper, we explain outlines of the science outputs of the current EISCAT and the science plans of the future EISCAT_3D, and then discuss importance and possibility of international global network observations including the EISCAT and EISCAT_3D.

日本は欧州非干渉散乱 (EISCAT) 科学協会に 1996 年に加盟し、北極域中間圏-熱圏-電離圏-磁気圏領域における国際共同観測・研究を、EISCAT レーダーシステムを用いて推進してきた。EISCAT レーダーシステムの利点は、中間圏界面から上部電離圏までのプラズマ物理量を観測可能であることや、磁気緯度約 60-80 度のオーロラ帯から極冠域にわたる広範囲の電離圏観測が可能なことである。これらの利点を生かし、さらにその他の各種レーダー、光学観測機器、人工衛星やロケットを相補的に組み合わせた観測を実施し、北極域超高層大気に生起する様々な物理現象を対象とした研究が行われている。しかし、現行の EISCAT レーダーシステムはパラボラ型アンテナを用いた線観測 (一方向観測) であるため、極域特有の時間的・空間的に激しく変動する物理現象を観測するには様々な問題が生じている。

そこで EISCAT 科学協会では、スカンジナビア半島北部に最先端のフェーズドアレイ式レーダーを設置する新しい国際共同計画 (EISCAT_3D 計画) を提案・推進している。世界で初めての多点イメージングレーダー観測を実現することにより、宇宙プラズマ物理学や太陽系科学を推進すると共に、宇宙天気や地球気候の予測精度の向上を目指している。欧州連合 (EU) の大型研究枠組み計画 (FP-6 および FP-7) による資金提供を受けて計画実現のための各種準備が進められ、その一環として国際サイエンスワーキンググループにより EISCAT_3D のサイエンスケースが執筆された。国内では、マスタープラン 2014 及びロードマップ 2014 の重点大型研究計画の 1 つである「太陽地球系結合過程の研究基盤形成」の重要な観測装置として EISCAT_3D レーダーは位置づけられており、国内研究者が EISCAT_3D レーダーを用いて目指すサイエンスプランの検討や議論を重ねてきている。

本講演では、EISCAT レーダーを用いたこれまでの研究成果や EISCAT_3D レーダーを用いて推進するサイエンスの概要を紹介すると共に、EISCAT 及び EISCAT_3D を含む国際的なグローバルネットワーク観測の重要性や可能性について議論する。

北極域上部中間圏・下部熱圏における鉛直運動

野澤 悟徳 [1]; 川原 琢也 [2]; 津田 卓雄 [3]; 小川 泰信 [4]; 藤原 均 [5]; 斎藤 徳人 [6]; 和田 智之 [6]; 高橋 透 [7]; 堤 雅基 [4]; 川端 哲也 [1]; Hall Chris[8]; Brekke Asgeir[9]

[1] 名大・太陽研; [2] 信州大・工; [3] 電通大; [4] 極地研; [5] 成蹊大・理工; [6] 理化学研究所基幹研; [7] 電通大・SSRE; [8] トロムソ大・TGO; [9] トロムソ大・理工

Vertical motion in the polar lower thermosphere/upper mesosphere above Tromsø

Satonori Nozawa[1]; Takuya Kawahara[2]; Takuo Tsuda[3]; Yasunobu Ogawa[4]; Hitoshi Fujiwara[5]; Norihito Saito[6]; Satoshi Wada[6]; Toru Takahashi[7]; Masaki Tsutsumi[4]; Tetsuya Kawabata[1]; Chris Hall[8]; Asgeir Brekke[9]

[1] STEL, Nagoya Univ.; [2] Faculty of Engineering, Shinshu University; [3] UEC; [4] NIPR; [5] Faculty of Science and Technology, Seikei University; [6] ASI, RIKEN; [7] SSRE, UEC; [8] TGO, UiTO; [9] Science and Technology, UiTO

<http://www.stelab.nagoya-u.ac.jp/~nozawa/LIDAR/>

Vertical motion of the neutral gases in the upper mesosphere and lower thermosphere is a peculiar issue. Observations of the vertical wind are rather difficult because vertical velocities are generally about 2 orders smaller than horizontal wind velocities. It is believed that the cold summer mesopause is set up by upward wind with strength of a few cm/s. During high auroral activity intervals, some observations conducted by Fabry-Perot Interferometer (FPI) reported about 10 m/s or larger vertical wind in the polar lower thermosphere. FPI measurements, however, suffer from a serious weakness of passive measurements: no information on the height observed. The sodium LIDAR at Tromsø (69.6 deg. N, 19.2 deg. E) is capable of simultaneous measurements of wind velocities with five directions with a m/s accuracy. By using the LIDAR data obtained from October 2012 to March 2015 together with EISCAT and meteor radar data, we will discuss the vertical motion of the atmosphere in the upper mesosphere and lower thermosphere.

トロムソナトリウムライダーでは、2012年10月から東西南北および鉛直方向の風速、大気温度、ナトリウム密度の5方向同時観測を実施している。上部中間圏・下部熱圏（高度80-110 km）高度の鉛直方向の運動は、非常に小さい（毎秒数センチメートル以下）と考えられている。大気重力波などにより、鉛直方向に毎秒数メートルの鉛直風が示唆されているが、これまで観測報告はほとんどなされていない。極域下部熱圏におけるファブリーペロー干渉計（FPI）観測により10 m/s程度（かそれ以上）の鉛直風が報告されている。しかし、FPI観測はパッシブ観測であり、観測精度および観測高度の不確定性により、疑義が残されている。ライダーは、レーザー光を発信し、その散乱光を観測するため、観測高度が正確に求まり、かつ高度分解能の良い観測が可能である。今回、トロムソナトリウムライダーの5方向同時観測データを用いて、鉛直方向の風速について調べた結果を報告する。

我々のグループでは、2010年10月からEISCATトロムソ観測所（69.6 deg. N, 19.2 deg. E）にてナトリウムライダーを用いた上部中間圏・下部熱圏（高度80-110 km）の中性大気温度測定を実施している。ナトリウムライダー観測は、冬期暗夜期間（10月から3月）に行い、現在までに約2800時間の大気温度およびナトリウム密度データを取得している。2012年10月より、5方向同時観測を実施し、約1700時間中性大気風速データも併せ取得している。風速データのうち一晩で12時間以上観測が成功した日は、61晩ある。これらの観測データについて、水平方向の風速変動と鉛直方向風速変動の関係を調べた。数晩について、水平方向風速が12時間周期変動のピーク時、有為な（毎秒数メートル以上）鉛直風速変動を確認した。講演では、同サイト内に設置されている流星ライダーやEISCATライダーとの同時観測データを併せ用いて、北極域上部中間圏・下部熱圏における鉛直風の有意性を議論する。

ポーカーフラット MF レーダーで観測された中間圏重力波に伴う半日潮汐の振幅変調に関する研究

木下 武也 [1]; 村山 泰啓 [2]; 川村 誠治 [1]
[1] NICT; [2] 情報通信研究機構

A study of the modulation of semidiurnal tide associated with mesospheric gravity waves observed with Poker Flat MF radar

Takenari Kinoshita[1]; Yasuhiro Murayama[2]; Seiji Kawamura[1]
[1] NICT; [2] NICT

The neutral wind velocity data from mesosphere to lower thermosphere observed by MF radar at Poker Flat in Alaska has been observed since the late 1990s. The long-term wind velocity data at Poker Flat has been analyzed for 10 years of 1999 – 2008 to understand the coupling processes between mesospheric gravity waves and tidal waves in more detail. Climatological 1-day composite plots of semidiurnal components of zonal wind and GW-KE showed that the maximum of GW-KE occurs at Poker Flat when zonal wind is westward in winter. It was confirmed that the phases between semidiurnal components of zonal wind and GW-KE are locked for more than 10 days in several years. The present study focuses on the phase lock events and examines the modulation of background wind including tides due to gravity wave drags under an assumption that gravity waves dissipate and/or break when the GW-KE is large.

As with previous studies (SGEPSS2014, IUGG2015), observed wind velocities having the 1~4 hour period components are analyzed as short-period gravity waves and those having harmonic components with periods of 24, 12, and 8 hours are calculated every 30 minutes. The amplitude modulations of 12 hour components of zonal wind and GW-KE show that the time derivative of zonal wind is negative after the GW-KE has large amplitude during the phase lock events in winter of 1999, 2000, and 2004. We plan to discuss more detail of underlying the physical processes, focusing on the local modulation of tidal waves associated with gravity wave drags using not only observation data but also reanalysis and modeling data.

アラスカ・ポーカーフラットに設置された MF レーダーにより中間圏から下部熱圏における中性風速データが 1990 年代後半以降観測されている。発表者等は重力波による平均流加速が潮汐波の影響を受けるのかを調べるため、10 年間 (1999 ~ 2008 年) の上記観測データを用いて、中間圏重力波と潮汐波の日内および季節変動の解析を行ってきた。その結果、平均的な特徴として冬季の短周期重力波の運動エネルギー (GW-KE) の半日周期成分が半日潮汐の東風時に最大となることがわかった。また、上記位相関係が複数の年において 10 日以上連続して続く位相ロック現象も見られた。本研究では、GW-KE が大きい値を持つタイミングで重力波が減衰・砕波し、背景場に擬運動量を与えていると仮定して、潮汐を含む背景場の変調について解析を行った。

まず始めに、観測の水平風速データから重力波と潮汐波の抽出を行った。ここで、潮汐波は 30 分平均データ 5 日間分からトレンドを除き、8, 12, 24 時間周期の正弦波をフィッティングして振幅と位相を 30 分ごとに求めた。この抽出方法により、5 日周期以上の潮汐波の振幅・位相の変化を調べることが出来る。一方、1~4 時間周期を持つ擾乱を短周期重力波として解析した。GW-KE は、5 日周期のローパスフィルタを用いて計算し、半日潮汐と GW-KE の 5 日以上の振幅変動を比較した結果、1999、2000、2004 年冬季に見られた位相ロック現象時において GW-KE の振幅が大きい時期の後半に東西風速の振幅の時間変化が負になる特徴が見られた。今後は、この現象の物理を理解するべく観測データの他に、再解析データ・モデルデータ等を用いて全球モードの半日潮汐波の抽出を行い、重力波強制に伴う局所的な潮汐波の振幅変調について調べる予定である。

南極昭和基地 MF レーダーで 15 年間観測された中間圏重力波の季節変動と年々変動

安井 良輔 [1]; 佐藤 薫 [1]; 堤 雅基 [2]
[1] 東大・理; [2] 極地研

Seasonal and interannual variation of mesospheric GWs based on MF radar observations over 15 years at Syowa Station

Ryosuke Yasui[1]; Kaoru Sato[1]; Masaki Tsutsumi[2]
[1] Graduate School of Science, Univ. of Tokyo; [2] NIPR

<http://www-aos.eps.s.u-tokyo.ac.jp/~yasui/>

Seasonal and interannual variations of gravity waves (GWs) in the high latitude mesosphere in the Southern Hemisphere (SH) were analyzed by using horizontal wind observation data in the altitude range of 50-100 km from the MF radar at Syowa Station (69.0S, 39.6E) in the Antarctic. The GW climatology is maximized for the horizontal wind variances in winter for a wide altitude range of 64-90 km. The GW interannual variability is large for the horizontal wind variances below 80 km in the spring and autumn. These features are consistent with previous studies. In addition, we detected a weak but significant enhancement with large interannual variability for the GW activity in summer: The GW climatology exhibits a weak maximum in summer for the zonal wind variance in 70-78 km. The GW interannual variability shows that the meridional wind variance is large in summer. Thus we examined three possible mechanisms to control the GW interannual variability in summer, namely, the interhemispheric coupling associated with the stratospheric sudden warmings (SSWs) in the Northern Hemisphere (NH), the modulation of GW vertical filtering in association with the polar vortex breakdown in the SH, and the generation of GWs from tropical convection. The GW variance does not have remarkable features in association with the NH SSWs. Although the GW variance increases in the beginning of summer, the timing is not well correlated with that of the polar vortex breakdown in the SH. In contrast, there is a good correspondence between the years with strong tropical convection and those with large GW variance at Syowa Station.

高エネルギー粒子降り込みに対する冬季南半球中層大気の力学的応答

富川 喜弘 [1]

[1] 極地研

Dynamical response of the SH middle atmosphere to energetic particle precipitations in austral winter

Yoshihiro Tomikawa[1]

[1] NIPR

The latest solar cycle minimum sometime around 2009 showed unusually low solar activity and suggested the possibility of a grand solar minimum in the near future. This event caused much attention to be focused on studies regarding solar influence on the Earth's climate. The recent review by Gray et al. (2010) classified solar forcing on the Earth's climate to be of four types: galactic cosmic rays, total solar irradiance (TSI), solar ultraviolet radiation (UV), and energetic particle precipitations (EPP). Although EPP has not attracted much attention compared with TSI and UV in the past, several recent studies indicate that EPP could have a significant impact on the Earth's climate, comparable with that of TSI and UV. In this study, the past 36 years were divided into high, medium, and low energetic particle forcing (EPF), and solar maximum, medium, and minimum conditions using Ap index and F10.7 radio flux, respectively. Then composite figures of middle atmosphere in the winter southern hemisphere were created from the latest reanalysis data and compared between medium and low EPF during the solar minimum. They showed that there was a statistically significant difference between medium and low EPF.

PANSY レーダーおよび MF レーダーによる中間圏高度エコーの比較

堤 雅基 [1]; 佐藤 薫 [2]; 佐藤 亨 [3]; 中村 卓司 [1]; 西村 耕司 [1]; 富川 喜弘 [1]; 高麗 正史 [2]
[1] 極地研; [2] 東大・理; [3] 京大・情報学・通信情報システム

Comparison study of mesosphere echoes between PANSY and MF radars

Masaki Tsutsumi[1]; Kaoru Sato[2]; Toru Sato[3]; Takuji Nakamura[1]; Koji Nishimura[1]; Yoshihiro Tomikawa[1]; Masashi Kohma[2]

[1] NIPR; [2] Graduate School of Science, Univ. of Tokyo; [3] Communications and Computer Eng., Kyoto Univ.

The PANSY radar (47MHz) at Syowa st. can measure 3 dimensional neutral atmosphere motions in troposphere, stratosphere and mesosphere with high time and height resolutions. In the mesosphere PANSY radar observes characteristic polar echoes in summer (Polar Mesosphere Summer Echoes) and winter (Polar Mesosphere Winter Echoes). An MF radar system (2.4MHz) has also been operating at Syowa st. for mesosphere and lower thermosphere observations. Although the MF radar has only a much poorer height resolution and is incapable of vertical wind measurement, it almost continuously measures mesosphere day and night and can provide complementary horizontal wind data for the PANSY observations. Studies of atmospheric dynamics such as gravity waves are planned using these combined data set. Prior to these, the nature of the mesosphere echoes are being compared between PANSY and MF radars in the present study. In spite of the large difference in the radio frequencies the occurrence of the mesosphere echoes show a lot of similarity between the radars in time and height, especially during winter, which is thought to be a key to the better understanding of the generation mechanism of these echoes.

南極昭和基地大型大気レーダー (PANSY レーダー 47MHz) は、中性大気観測モードにおいて、対流圏から中間圏高度の広い高度領域の鉛直風を含む風速成分を非常に高い時間高度分解能で観測可能である。中間圏高度においては、夏と冬で性質の異なるエコー (Polar Mesosphere Summer Echo および Polar Mesosphere Winter Echo) が観測され、エコーの成因、乱流、大気重力波などの解析が今後期待される。一方、昭和基地では MF レーダー (2.4MHz) による観測が 1999 年より行われている。MF レーダーは高度分解能において PANSY に大きく劣る他、鉛直風速成分の観測はできないなどの制限はあるものの、中間圏高度を昼夜を通して比較的連続的に観測できるため、PANSY にとって相補的なデータを提供できる。現在、今後の大気力学研究を念頭に、両レーダーで得られた風速の比較やエコーの性質の比較などを行っている。冬季において PMWE は、日射による電離のある昼間を中心に高度 50km 程度から 80km 程度に出現し [Nishiyama et al., 2014]、MF レーダーによる同高度域からのエコーと非常に同時性が高い。一方、夏季においては常に日射があるにもかかわらず、冬季ほど下層までエコーが得られることは両レーダーともない。送受信周波数の大きく異なる両システムにおけるエコーの類似性は、エコーの成因を探る上で重要な情報となる。また同時観測された水平風速は両レーダー間で高い相関を示しており、今後さらに比較を進める予定である。

高分解能版 GAIA を用いた熱圏重力波の研究

三好 勉信 [1]; 藤原 均 [2]; 陣 英克 [3]; 品川 裕之 [3]
[1] 九大・理・地球惑星; [2] 成蹊大・理工; [3] 情報通信研究機構

A study on gravity waves in the thermosphere simulated by GAIA

Yasunobu Miyoshi[1]; Hitoshi Fujiwara[2]; Hidekatsu Jin[3]; Hiroyuki Shinagawa[3]
[1] Dept. Earth & Planetary Sci, Kyushu Univ.; [2] Faculty of Science and Technology, Seikei University; [3] NICT

It has been recognized that gravity waves play an important role on the momentum and energy balance in the thermosphere. The effects of upward propagating gravity waves on the general circulation of the thermosphere are studied using a whole atmosphere-ionosphere coupled model (GAIA). The GAIA contains the region from the ground surface to the upper thermosphere, so that we can simulate excitation of gravity waves in the lower atmosphere, their upward propagation to the thermosphere, and their impact on the general circulation in the thermosphere. We have recently developed the GAIA with a high horizontal resolution (about 1 degree longitude by 1degree latitude). In this study, we focus our attention on seasonal variations in gravity wave activity in the thermosphere. Our simulation result indicates that gravity wave activity in the winter thermosphere is strongly influenced by variations in the polar night jet. Moreover, the impacts of thermospheric gravity waves on variability in the ionosphere are investigated. To assess the ionospheric variability associated with gravity waves, cooperative research with atmospheric radar observations such as Pansy and Eiscat radars, are desirable.

下層大気起源の大気重力波が、熱圏領域まで伝播し、熱圏・電離圏の大気大循環に多大な影響を及ぼしていることが、近年の数値モデル及び観測による研究で明らかになりつつある。本研究では、大気圏電離圏結合モデル (GAIA: Ground-to-topside model of Atmosphere and Ionosphere for Aeronomy) の水平分解能を良くしたモデルを用いて、熱圏重力波のふるまいと下層大気の循環変動との関連性について調べてみた。GAIA は、対流圏から熱圏上端までを含んでいるため、下層大気での重力波の励起、熱圏への鉛直伝播、熱圏での碎波などの一連の過程を再現することが可能である。さまざまな季節において数値シミュレーションを実行し、熱圏重力波の経度-緯度分布の季節変動と下層大気の循環変動との関連性に注目し、解析を行った。

解析の結果、以下のことが明らかとなった。熱圏の東西風は、一日周期で変化するため、重力波抗力も、一日周期で (数百 m/s/day のオーダーで) 大きく変化することが分かった。また、熱圏での重力波活動の活発領域の季節変化を調べてみた。その結果、注・高緯度域における活発な領域は、成層圏・中間圏での極夜ジェットの強い緯度・経度帯と一致することが分かった。このことは、極夜ジェットの強い西風領域が、熱圏への重力波の鉛直伝播にとって好都合であることを示唆している。詳細な結果は、発表当日に示す。このような熱圏での重力波に伴う変動は、中性大気と電離大気の相互作用過程を通じて、電離大気にも影響を及ぼす。したがって、熱圏重力波の活動が活発な時期・領域においては、短周期 (数十分から 1 時間程度) の電離圏変動が生じる。これらの電離圏変動については、国際的大型大気レーダのネットワーク観測と連携しながら、明らかにしていきたいと考えている。

南極昭和基地大型大気レーダーによって観測された中間圏重力波と中層大気 NICAMによる再現実験

澁谷 亮輔 [1]; 佐藤 薫 [1]; 高麗 正史 [1]; 富川 喜弘 [2]; 西村 耕司 [2]; 中村 卓司 [2]; 堤 雅基 [2]; 佐藤 亨 [3]
[1] 東大・理; [2] 極地研; [3] 京大・情報学・通信情報システム

Gravity waves in the mesosphere observed by the PANSY radar and a numerical simulation using NICAM

Ryosuke Shibuya[1]; Kaoru Sato[1]; Masashi Kohma[1]; Yoshihiro Tomikawa[2]; Koji Nishimura[2]; Takuji Nakamura[2];
Masaki Tsutsumi[2]; Toru Sato[3]

[1] Graduate School of Science, Univ. of Tokyo; [2] NIPR; [3] Communications and Computer Eng., Kyoto Univ.

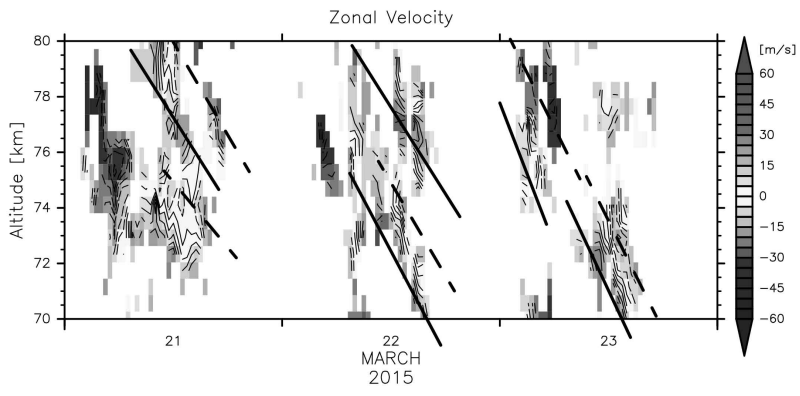
<http://www-aos.eps.s.u-tokyo.ac.jp/~shibuya/index.html>

The Antarctic Syowa MST/IS Radar (PANSY radar) is the largest MST radar installed at Syowa Station in the Antarctic (39E, 69S) which enables us to observe vertical profiles of three-dimensional wind vectors with fine time and height resolutions in the troposphere to the mesosphere. In the time period from 16-24 March 2015, we succeeded in the first observation with a full-system of the PANSY radar. Figure shows the time and height section of zonal winds in the mesosphere for 20-23 March 2015. Clear wave-like wind disturbances with downward phase propagation are observed around 1200 UTC on each day. The wave parameters are estimated by using a hodograph analysis assuming that they are due to inertia-gravity waves. Horizontal and vertical wavelengths are estimated at about 570 km and 6.5 km, respectively. The ratio of estimated vertical and horizontal wavelengths accords well with that of the amplitudes of vertical wind component and horizontal one parallel to the horizontal wavenumber vector, which is consistent with the theoretical characteristics of gravity waves. Thus, it is likely that the observed wave disturbance are due to inertia-gravity waves. In addition, from the orientation of hodograph and from the phase relation between the horizontal and vertical wind component, it is inferred that the inertia-gravity wave propagates south-westward.

Moreover, we performed a numerical simulation using a Non-hydrostatic ICosahedral Atmospheric Model (NICAM) whose top was extended to the upper mesosphere for the observed time period. The vertical resolution of the model is 400 m from the troposphere to the mesosphere except near the ground and around the top sponge layer. We adopted a grid configuration such that a finer horizontal resolution around the polar region of the Southern Hemisphere. The horizontal grid spacing is nearly-uniform, which is about 35 km, to the south of 40S. The NICAM successfully simulated wave-like wind disturbances similar to the PANSY radar observations, in terms of horizontal and vertical wavelengths, wave amplitudes, the direction of the wavenumber vectors. We will examine the generation mechanism and propagation characteristics of the inertia-gravity waves in the mesosphere by combination of radar observations and model simulations for future studies.

南極昭和基地大型大気レーダー（PANSY レーダー）は対流圏から中間圏までの3次元風速を高分解能・高精度で連続観測することができる南極最大の大気レーダーである。2015年3月16日から24日にかけて、PANSYレーダーのフルシステムによる観測が初めて行われた。図は中間圏における2015年3月21日から23日の東西風を示す。それぞれの日の1200UTC前後に位相速度が下向きの波状擾乱が顕著である。この波状擾乱を重力波であると仮定しパラメータを推定した。水平波長は約570 km、鉛直波長は6.5 kmであった。また、推定された水平波長と鉛直波長の比は、波数ベクトルに平行な向きの水平風と鉛直風の比と非常によく一致した。これは慣性重力波の理論的な特徴と整合的である。ゆえに、観測された波状擾乱は慣性重力波による可能性が高い。加えて、ホドグラフの長軸の向き、及び水平風と鉛直風の位相の関係から、慣性重力波は南西方向に伝播していたと考えられる。

さらにこの期間を対象とし、高度領域を中間圏まで拡張した非静力学正二十面体モデルNICAMを用いて、対流圏から中間圏の気象場の再現実験を行った。鉛直方向の解像度は地表付近およびスポンジ層を除いて400 mで一定とした。また水平グリッドには、格子点を南極域付近に集中させて水平解像度を高めたグリッドを用いた。水平格子間隔は南緯40度以南でほぼ一様均一であり、その解像度は約35 kmとした。NICAMによりシミュレートされた擾乱場は、観測された重力波の水平・鉛直波長、振幅、波数ベクトルの向きなどの特徴をよく再現していたことが分かった。今後はこれらの重力波の発生や伝播について、PANSYレーダーの観測データとモデルシミュレーションを組み合わせて詳しく調べる予定である。



北半球冬季における成層圏突然昇温の生起と予測可能性について

廣岡 俊彦 [1]; 向川 均 [2]
[1] 九大・理・地惑; [2] 京大・防災研

Occurrence of stratospheric sudden warmings and its predictability during the Northern Hemisphere winter

Toshihiko Hirooka[1]; Hitoshi Mukougawa[2]
[1] Earth and Planetary Sci., Kyushu Univ; [2] DPRI, Kyoto Univ.

<http://fx.geo.kyushu-u.ac.jp>

Recent satellite observations and model studies show large circulation changes are caused in association with stratospheric sudden warming (SSW) events for the wide region up to the ionosphere and thermosphere. SSWs are caused by enhanced planetary waves and classified into vortex displacement and vortex splitting types. Many studies have revealed that the amplification of planetary waves of zonal wavenumber 2 (wave 2) plays more important roles in the latter type warming than that of wave 1. We have examined the predictability of recent SSW events on the basis of ensemble one-month forecast data operationally produced by the Japan Meteorological Agency (JMA). In our studies, each predictable period is estimated by a root-mean-square error (RMSE) and an anomaly correlation (AC) in the ensemble-mean geopotential height field on 10 hPa. The resultant predictable period widely varies from five to twenty days depending on the cases; the predictable period in the stratosphere is generally longer than that in the troposphere. It is also found that the predictable period of vortex-splitting events is shorter than that of vortex displacement ones. This is probably reflected by the fact that wave-2 components have generally shorter predictability than wave-1 ones.

近年の衛星観測やモデルを用いた研究によると、成層圏突然昇温現象の影響は、電離層や熱圏までの広い大気領域に及んでいることがわかってきた。成層圏突然昇温は、増幅したプラネタリー波により引き起こされ、極渦変位型と極渦分裂型に分類することができる。これまでの多くの研究により、後者には、東西波数2成分のプラネタリー波が、波数1成分よりも重要な役割を果たしていることが明らかとなっている。我々はこれまで、北半球冬季の期間における成層圏突然昇温の予測可能性を、気象庁1か月アンサンブル予報を用いて調べてきた。予測可能期間は、10hPa等圧面高度場のアンサンブル予報平均値に基づく二乗平均平方根誤差 (RMSE) と、アノマリー相関 (AC) から見積もった。その結果、予測可能期間は事例ごとに5日から20日の間で大きく変化していた。この予測可能期間は、対流圏循環の予測可能期間よりも一般的に長い。また、極渦分裂型昇温は、極渦変位型昇温に比べ予測可能期間が短いことも示された。このことは、東西波数2成分の予測可能性が、同1成分に比べて低いことを反映していると考えられる。

冬季北極域成層圏上部と中間圏下部における極渦の状態と AO index の特徴

坂野井 和代 [1]; 木下 武也 [2]; 佐藤 薫 [3]; 村山 泰啓 [4]
[1] 駒澤大学; [2] NICT; [3] 東大・理; [4] 情報通信研究機構

Characteristics of the polar vortex and the AO index in the upper stratosphere and lower mesosphere in Arctic winter

Kazuyo Sakanoi[1]; Takenari Kinoshita[2]; Kaoru Sato[3]; Yasuhiro Murayama[4]
[1] Komazawa Univ.; [2] NICT; [3] Graduate School of Science, Univ. of Tokyo; [4] NICT

Purpose of this research is to clarify relationship between solar activity and disturbance in the middle atmosphere during Arctic winter. In this research we consider stratospheric sudden warming (SSW), which is a typical phenomenon in Arctic winter, as disturbance in the middle atmosphere including the mesosphere. Some previous studies reported clear relationship between the 11-year solar activities and SSWs in the stratosphere. However, traditional classification of SSW, Major or minor SSW, is not suited for quantitative comparison with other indices. Therefore we are exploring new indices which display condition of disturbance in the stratosphere/mesosphere.

There is a typical circulation pattern of Arctic winter which is called as the Arctic Oscillation: AO or Northern hemisphere Annular Mode: NAM in the troposphere and stratosphere. A strong low pressure, the polar vortex, is dominant in the polar region and high pressure in the mid latitude at the positive AO/NAM mode, and vice versa at the negative AO/NAM mode. The AO index is often used to show condition of the AO/NAM mode in the troposphere and stratosphere.

In this work, we calculate the AO index in the altitude range from 1000 hPa to 0.1 hPa (65km alt) which extends in the lower mesosphere and compare between AO index profiles and circulation patterns at 10 and 0.316 hPa altitude in order to discuss potential use in diagnostics of middle atmosphere disturbance which includes the mesosphere. We analyze climatological global assimilation data, UKMO data provided by the Met Office and MERRA data by NASA, in five winter seasons from 1998/1999 to 2002/2003 and get following results: 1) A peak of the AO index is usually at 0.5 hPa. 2) There is a case where mode of the AO index is not same at 100 and 0.1 hPa. 3) Strong peaks and extension of the negative AO index to the lower stratosphere are not always correspond to the Major SSWs. 4) There are a few weak disturbances only in the mesosphere which are not categorized as SSWs. 5) The negative AO index tend to extend in the all altitude range at the event of two wavenumber pattern, on the other hand, that tend to be limited in a particular altitude range at the event of one wavenumber pattern.

In this presentation, we will analyze longer period data and discuss more detail about relationship between AO index profiles, SSWs and circulation patterns at 10 and 0.316 hPa altitude.

本研究は、冬季北極域における代表的な擾乱現象である成層圏突然昇温を、中間圏まで含めた中層大気全体の擾乱として捉え、その擾乱について長期的な太陽活動度との関係を解明することを最終的な目的としている。成層圏突然昇温と太陽活動度との関連は、太陽活動 11 年周期による成層圏の熱的構造の変調として、成層圏領域では研究が進んでいる。これらの研究では、成層圏突然昇温の程度を表す指標として伝統的に、昇温が「大昇温」か「大昇温でない」という定性的な分類が使われてきた。しかしこのような定性的な分類だけでは他の現象との比較が難しい。このため、中間圏まで含めた中層大気擾乱と太陽活動度を定量的に比較するための準備として、中層大気の擾乱度を表す指標としてどのようなものがあるかを検討している。

冬季北極域対流圏・成層圏の代表的な構造は、北極振動または北半球環状モード (Northern hemisphere Annular Mode: NAM) と呼ばれるパターンを示し、極域が極渦に支配され低温・中緯度域が高温となる正のモードと、その逆パターンとなる負のモードに分類される。対流圏・成層圏においてはその程度を表す指標として AO index がしばしば用いられる。

本研究では、中間圏下部まで含めた 1000~0.1hPa (約 65km 高度) の高度において AO index を計算し、成層圏上部 (10hPa、約 30km 高度) と中間圏下部 (0.316hPa、約 55km 高度) の極渦の変動の特徴と比較し、成層圏上部・中間圏下部で導出された AO index がどのような気象条件を表すかを調べ、擾乱の程度を表す指標として検討していく。解析には、気象全球客観解析データ (英国 Met Office が提供する UKMO データ、および米国 NASA が提供する MERRA データ) を用いており、1998/1999 冬期から 2002/2003 冬期までの 5 期間の解析から、以下のようなことが明らかになってきた。1) 中層大気での AO index の値のピークは、おおむね 0.5hPa (~50km) 高度にある。2) 100hPa - 0.1hPa 高度において AO index の正負はほぼ一致するが、ときおり 10hPa の上下で正負が異なる場合もある。3) AO index の負のピーク値が大きいことと大昇温とは対応しない、また負の領域が 10hPa 以下まで達していることも、必ずしも大昇温とは対応しない。4) 伝統的な昇温の分類では成層圏突然昇温と判定されない中間圏のみの擾乱も存在する。5) 擾乱時に波数 2 構造がみられると、AO がほぼ全高度で負になりやすい。波数 1 構造が維持される場合は、AO 負の高度範囲が限られるように見える。

本発表では、さらに解析期間を増やして 10hPa および 0.316hPa における循環パターンと成層圏突然昇温、AO index の関係について検討を進めていく。

南半球成層圏最終昇温の年々変動における大気波動の役割に関する3次元解析

平野 創一朗 [1]; 高麗 正史 [2]; 佐藤 薫 [2]
[1] 東大・理・地惑; [2] 東大・理

A 3D analysis on the role of atmospheric waves in the interannual variability of stratospheric final warming in SH

Soichiro Hirano[1]; Masashi Kohma[2]; Kaoru Sato[2]
[1] Earth and Planetary Science, Univ of Tokyo; [2] Graduate School of Science, Univ. of Tokyo

Material circulation of the middle atmosphere has often been studied in the two-dimensional (2D) meridional cross section using the transformed Eulerian mean (TEM) framework (e.g., Plumb 2002). There are, however, increasing evidences that the circulation has zonally asymmetric structures (e.g., Sato et al. 2009; Hitchman and Rogal 2010). These facts suggest the necessity of examining and quantifying three-dimensional (3D) material circulation. The formulae of residual mean flows applicable both to Rossby waves and to gravity waves derived by Kinoshita and Sato (2013) should be a powerful tool for the examination.

In the middle and high latitudes of the stratosphere, each winter terminates with a breakdown of the polar vortex, called the stratospheric final warming (SFW). This drastic change is accompanied by a transition of the circumpolar flow from westerlies to easterlies. Significant relation between ozone depletion and persistence of the Antarctic polar vortex during austral spring has been shown by many studies (e.g., Haigh and Roscoe 2009). On the other hand, wave activity can influence the timing of SFW in the Southern Hemisphere (SH), although there are few studies from this view point. Moreover, SFW can affect tropospheric circulation and the tropospheric responses to SFW have zonally asymmetric structures (Black and McDaniel 2007).

In the present study, we perform a 3D analysis as well as a zonal mean, i.e., 2D one regarding the role of wave-driven circulation in the interannual variability of SFW in SH using recently-published reanalysis data, JRA55 over 35 years from 1979 to 2013.

We first focused on the relation between wave activity and SFW date in SH in zonal mean field. It was shown that the vertical component of EP flux at 100 hPa during austral spring is significantly related with SFW date. In order to clarify the role of wave-induced residual mean flow in the interannual variability of SFW date, we categorized SFWs into early and late SFW groups according to the SFW date and examined differences between them. There is a rapid increase of polar temperature difference in early October, although the difference is insignificant until September. In order to examine what causes the sudden increase of temperature difference, we calculated differences in time derivative of potential temperature, potential temperature advection by meridional and vertical component of residual mean flow, and diabatic heating by long and short wave radiation. Significant positive differences in potential temperature tendency in the middle stratosphere correspond well to those in potential temperature advection by the vertical component of residual mean flow, which is partly cancelled by negative differences in diabatic heating by long wave radiation. Differences in diabatic heating by short wave radiation are minor. This result suggests the importance of adiabatic heating associated with wave-induced residual mean flow in determining polar stratospheric temperature during austral spring, and hence SFW date.

This analysis is then extended to three dimensions to investigate the longitudinally dependent structures, which cannot be seen in the TEM framework. Although basic characteristics are similar to the results by the 2D analysis, zonally asymmetric structures are revealed: significant positive differences in potential temperature tendency and vertical potential temperature advection by residual mean flow are dominant in the south of Atlantic Ocean.

Furthermore, the influence of SFW on tropospheric circulation is examined. Downward residual mean flow is continuously observed around SFW both in the lower stratosphere and troposphere in East Antarctica, where significant temperature increase is observed in the troposphere. This result indicates that the wave-induced downward residual mean flow in the stratosphere penetrates into underlying troposphere and raises the tropospheric temperature.

中層大気の物質循環は変形オイラー平均系（以下 TEM 系）などの東西平均の場で議論されることが多かった。しかし、最近の研究でその循環に東西非一様性があることが指摘され始めている (Sato et al 2009; Hitchman and Rogal 2010 など)。したがって、成層圏の物質循環を定量的に把握するためには、循環の3次元的な構造を調べる必要がある。Kinoshita and Sato (2013) は、その解析に必要な、ロスビー波・重力波両方に適用可能な3次元残差平均流の式を導出している。この式を用いた解析手法の提案を行い、Sato et al. (2013) は重力波解像大気大循環モデルデータに適用して中層大気の残差平均流の3次元的な描像を示し、波強制を反映した残差平均流の顕著な経度依存性を明らかにした。本研究はこの手法を現実大気データに適用したものである。

極域成層圏では、最終昇温と呼ばれる極渦の消滅により冬から夏へと季節が移行する。この大きな変化は極を中心とする西風循環から東風循環への移行を伴う。一方、成層圏の変動が下方に伝播し、対流圏の循環に大きな影響を与えることが示唆されている (Baldwin and Dunkerton 2001; Thompson et al. 2005 など)。最終昇温に伴う成層圏の変動も対流圏に反映されることが指摘されている (Black and McDaniel 2007 など)。

南半球春季にはオゾンホールに象徴される大規模なオゾン破壊が起こり、そのオゾン量の低下と最終昇温のタイミングの遅れが大きく関係していることが多くの研究により示されている。しかしながら、最終昇温のタイミングには波活

動に関連する断熱的な温度変化も無視できないはずである。ところが、南半球においてこの視点に立った研究は少ない。

本研究では、南半球の最終昇温の年々変動に対し、波強制により駆動される循環の役割の解明を目的とする。Kinoshita and Sato で導出された理論式を用いて、東西平均場と 3 次元構造の解析を行う。再解析データとして JRA55 を用いた。解析期間は 1979 年から 2013 年の 35 年間である。

まず、南半球における最終昇温日と波活動との関係を東西平均で調べた。Black and McDaniel (2007) の基準に従って、最終昇温日を 60S、50 hPa の東西平均東西風に基づいて定義した。100 hPa における EP フラックスの鉛直成分は最終昇温日と強く関係していることがわかった。最終昇温日にオゾンと強い関係があることは Haigh and Roscoe (2009) などで指摘されていたが、本研究により波活動とも関係することがわかった。最終昇温日の年々変動における波が駆動する循環の役割を調べるために、最終昇温を早く起こった年と遅く起こった年に分け、その差を計算した。極域の温度の差を計算すると、9 月までは有意な差は見られないが、10 月になるとその差は急激に上昇する。この急激な温度上昇の原因を探るために、温位の時間変化、残差平均流の南北成分及び東西成分による温位の移流、長波および短波による非断熱加熱の差を計算した。中部成層圏の温位の時間変化の差が正である領域が、残差平均流の鉛直成分による温位の移流が強化される領域とよく一致した。一方、短波による加熱の差は小さかった。これは、南半球春季の温度、すなわち最終昇温日の年々変動に対する下降流に伴う断熱加熱の重要性を示唆する。次に、TEM 系では見ることのできない経度方向の構造を調べるために 3 次元解析を行った。基本的な特徴は 2 次元における解析結果と同様だが、東西方向の非一様性を明らかにすることができた。すなわち、大西洋南部で、温位の時間変化及び残差平均流の東西成分による温位の移流が強化される領域が見られた。

最後に、最終昇温に対する対流圏の応答の東西非一様性を、最終昇温日に関するコンポジット解析によって調べた。下部成層圏と対流圏では、東南極で下向きの残差平均流が、最終昇温日の 44 日前から 14 日後まで連続して見られた。東南極では、成層圏の波強制により駆動された下向きの循環が対流圏にまで達しており、正の温度偏差を形成している可能性が示唆された。

大型大気レーダー観測と高解像大気大循環モデルの統合に向けたデータ同化研究の展望

宮崎 和幸 [1]
[1] 海洋研究開発機構

For integration of radar observations with a high-resolution general circulation model using data assimilation techniques

Kazuyuki Miyazaki[1]
[1] JAMSTEC

<https://sites.google.com/site/kazuyukimiyazaki/>

For integration of radar observations with a high-resolution general circulation model using data assimilation techniques.

観測とモデル情報による情報を統合し時空間に連続的で物理的に整合性のある場を作成するために、データ同化手法が広く利用されている。各種観測から取得される情報は近年益々精密化を遂げており、観測情報を適切に統合するためのデータ同化フレームワークに関して慎重な考察が必要とされている状況にある。

大型大気レーダーにより取得される精密な観測情報は、局所的な乱流や重力波から惑星スケールを含む各種大気擾乱の一端を映し出す。数 10~100km 程度の空間分解能を持つ従来の大気大循環モデルとは取得される情報の時空間代表性および捉えられる現象が異なり、モデル予報値（データ同化における背景場）と観測情報の比較から物理的に意味のある修正を施し解析値を作成することは容易ではない。日本国内では KANTO プロジェクトにより重力波を陽に表現する高解像モデルシミュレーションが実現しており (Watanabe et al. 2008)、大型大気レーダーによる観測値との直接比較に耐え得る背景場を提供できる可能性がある。

世界の大型大気レーダー観測網と高解像モデルとを統合利用する試みは、中層大気の階層構造とその全球分布を理解する上で重要なものとなることが期待される。しかしながら、データ同化に基づきそれらを統合する上で多くの課題が存在しており（観測演算子の開発・時空間代表性の見積もり・様々なスケールの現象が混在する状況下におけるデータ同化ウィンドウの最適化、等）、時間をかけて効果的なシステムを構築していく必要がある。対して、衛星観測網により得られる相対的に粗い中層大気の日々の変動に関する情報をデータ同化で統合することは比較的容易に実現可能であると考えている。

しかしながら、中層大気を対象とした客観解析は依然として世界でも例が少ない。最新のデータ同化技術の中層大気に強い感度を持つ衛星観測データに適用することで、中層大気 3次元構造の日々の変動を再現する客観解析を独自に実現する計画を進めている。作成したデータを高解像モデルの初期値として利用し予報過程において微細な構造を生成することで、中層大気の階層構造の瞬間的な姿を露わにし、点在する大型大気レーダー観測による情報を面として繋いだ際に得られるであろう理解が浮かび上がるかもしれない。

本講演では、これらの関連研究について、これまでの進展と今後の展望について議論したい。

非定常な波強制に対する子午面循環形成過程

林 佑樹 [1]; 安田 勇輝 [1]; 佐藤 薫 [1]
[1] 東大・理

The response of the meridional circulation to unsteady wave forcings

Yuki Hayashi[1]; Yuki Yasuda[1]; Kaoru Sato[1]
[1] Graduate School of Science, Univ. of Tokyo

The Lagrangian-mean meridional circulation in the middle atmosphere not only transports ozone but also changes the temperature structure in the atmosphere. This meridional circulation is driven by the momentum redistribution by atmospheric waves. In many previous studies, the steady-state assumption is used in the analysis of the meridional circulation. In general, however, the wave forcing changes transiently and the understanding with the steady-state assumption has limitation. Therefore, in this research, we investigate the response of the meridional circulation to the unsteady wave forcing.

The large-scale atmospheric response to the forcing can be described by the linear response because Rossby number is sufficiently small. Green's function is one of useful methods for the analysis of the linear response to the forcing. Thus, we obtained the horizontal divergence, which describe the meridional circulation, by using the Green's function method. As the wave forcing, we set an external forcing for the zonal momentum equation. The dependence of the shape and time variation of wave forcing on the formation of the meridional circulation is examined.

For the forcing with a step function in time, gravity waves in a wide range of frequencies are radiated as a transient response, and a quasi-steady meridional circulation as well as inertial oscillations finally remain. This meridional circulation is composed of two cells in the vertical, and accords with the circulation which was analytically obtained as the steady state. Time scale needed for the formation of the meridional circulation depends on the shape of the wave forcing, as is consistent with a theoretical expectation. In addition, it is shown that the group velocity of gravity waves radiating from the source region determine the time scale of the circulation formation. We also investigate the case for the forcing changes gradually, slower than the inertial period. The response is mainly in the form of meridional circulation and changes slowly following the changing force.

中層大気のラグランジュ的の子午面循環は、オゾン等の物質を輸送するだけでなく、大気の温度構造を力学的に変化させる。この子午面循環は、主に大気波動が運動量を再分配することによって駆動されている。多くの先行研究では、定常の仮定のもと子午面循環を解析している。しかし、一般に波強制は過渡的であり、定常を仮定した理解には限界がある。そこで、本研究では、東西平均した f 平面静水圧ブシネス系を用いて、非定常な波強制に対する子午面循環の形成過程を線形解析により調べた。

大気の大規模運動はロスビー数が十分小さいため、非線形項が小さく、強制に対する応答として線形応答が支配的であると考えられる。線形応答を調べるのに適した手法の1つにグリーン関数の方法がある。この手法を用いて、循環を記述する変数の1つである水平発散 δ の時間発展を求めることにした。強制は東西方向の運動方程式における波強制として与えた。そして、子午面循環の形成過程が、この波強制の形や時間変化の仕方にどのように依存するのかを調べた。

まず、強制の強さを時間方向にステップ関数的に変化させると、過渡的な応答として広い帯域に亘る振動数を持つ重力波が放射されるが、最終的には慣性振動と準定常な子午面循環が残ることがわかった。この子午面循環は鉛直2細胞型の構造を持っており、解析的に求めた子午面循環の定常解とほぼ一致する。また、循環形成の時間スケールに着目した解析を行ったところ、波強制の形の依存性については、次元解析による理論的予想と調和的であった。また、過渡的に生じる重力波の群速度がほぼその時間スケールを決定していることがわかった。次に、強制の強さがゆっくりと変化する場合についても解析を行った。その結果、強制の時間スケールが慣性周期より大きい場合は、応答は強制に隷属した状態となり、循環は波強制の変化に追従して緩やかに変化することがわかった。

3次元伝播を考慮した重力波パラメタリゼーションに関する研究

雨宮 新 [1]; 佐藤 薫 [2]
[1] 東大院・理・地惑; [2] 東大・理

A study on gravity wave parameterization including three dimensional propagation

Arata Amemiya[1]; Kaoru Sato[2]
[1] The Univ. of Tokyo; [2] Graduate School of Science, Univ. of Tokyo

Recent studies suggest the importance of horizontal propagation of gravity waves (GWs), especially in high latitudes of the winter Southern Hemisphere (SH), although most standard gravity wave parameterizations (GWPs) treat GW simply as vertical. In this study, a new orographic GWP including three-dimensional GW propagation is developed and its impact on large-scale dynamical fields is examined. Our GWP calculates the horizontal location and change of wavenumbers of GWs explicitly by vertical integration of the ray tracing equations, and the body forces due to horizontal refraction of GWs, that exist even without dissipation. In addition, the computational cost for ray tracing is greatly reduced by effective parallelization using Taylor's series approximation for background fields of the ray tracing. Two numerical experiments are performed by Model for Interdisciplinary Research of Climate (MIROC)-AGCM, to which the new orographic GWP and a conventional one are respectively implemented. For the experiment with the new GWP, westward forcing above the core of the polar vortex in the Southern Hemisphere is enhanced in winter. This is mainly because latitudinal propagation of parameterized GWs which amounts to 30 degrees at most toward the axis of the jet. It is also shown that the forcings produced by the refraction contributes to the significant amount. The zonal wind in SH winter is slightly stronger in the polar upper stratosphere for the experiment with the new GWP, which is consistent with the differences in the GW forcings. The strength and seasonal evolution of polar vortex is less affected by the GW forcings possibly because of the compensation by EP flux divergence by resolved waves. These results suggest the potential importance of the three-dimensional propagation in GWPs for better representation of the momentum budget of the middle atmosphere in climate models.

本研究は気候モデルにおける重力波パラメタリゼーションにおいて、伝播を鉛直のみと近似する従来の手法の代わりに、より現実的な3次元伝播を考慮した計算方法を開発し、大規模場への影響を調べたものである。

大気重力波(重力波)による主に対流圏からの運動量輸送は中層大気の運動量収支を大きく支配し、放射とともに大規模な風・温度の場を特徴づけている。短い波長の重力波は通常気候モデルの水平格子(約100~300km)のもとでは十分に表現できないが、中層大気において大きな運動量輸送を担っている。そこで、気候モデルでは重力波パラメタリゼーション(GWP)を用いて解像されない重力波による運動量輸送(波強制)を計算している。

重力波は大気中を鉛直のみならず水平方向も含めた3次元経路をとって伝播する。このことが実際に運動量輸送の大きさや空間的分布に大きく影響することは、近年の衛星観測や高解像度モデルを用いた運動量フラックスの推定から明らかになりつつある。一方で、重力波パラメタリゼーションではほとんどの場合伝播は鉛直方向のみと近似され、また背景場の非一様性による重力波の屈折も無視されてきた。そこで、本研究では3次元伝播を考慮したパラメタリゼーションを作成し、特に地形性重力波に適用したものを気候モデルに導入した。そのモデルを用いた比較実験により再現される大規模場への影響を、特に南半球の極渦に注目して調べた。

本研究のGWPは、波源から放射されるそれぞれの重力波について、従来は一定と近似されていた水平位置と波数を各高度においてRay tracing方程式から計算する点に特徴がある。同様の手法を用いたSong and Chun (2008)のGWPとは異なり、波の伝播に要する時間を無視することによって時間積分を鉛直積分に置き換え、計算を大幅に効率化している。さらに、通常気候モデルで用いられる分散メモリ型並列計算において計算効率を向上させるため、Ray tracingの計算における背景場を水平方向のテイラー展開を用いて近似し、MPI通信の必要性を最小限に抑えた。これにより3次元伝播を考慮しつつ、実用に耐えうる計算速度を実現することができた。

地形性重力波について3次元伝播の考慮の影響を調べるため、作成したGWPを導入した大気大循環モデルModel for Interdisciplinary Research on Climate (MIROC)-AGCMを用いて数値実験を行った。3次元伝播を考慮するもの(OGW3D)、考慮しないもの(CONTROL)の2種類について50年分の積分を行い、南半球冬季についての気候平均場を比較した。

まず、計算された地形性重力波の波強制の水平分布は、OGW3DではCONTROLに比べ成層圏・中間圏で水平方向により広い分布を示した。これは衛星観測から推定されている運動量フラックスの分布と整合的であった。次に、東西平均した波強制の東西成分の分布は中間圏の高緯度でOGW3Dではより強い西向き強制を示していた。この違いは波の緯度方向の伝播経路の変化が原因であることが示唆された。また、波の屈折に伴って発生する波強制も成層圏上部で特徴的な分布を示した。

両実験でこのように波強制の明瞭な違いが見られたにもかかわらず、東西平均した東西風・温度の気候平均場の季節進行は、年々変動に比べて大きな違いを示さなかった。その原因としては、モデルで解像される波の変調が有力である。高緯度中間圏において、両実験の重力波強制の差と、EPflux発散の差は逆符号の似た分布を示した。したがって、重力波強制の変化の東西平均場への影響は、重力波によって引き起こされた解像される波による間接的な影響によって大部分が打ち消されていることが示唆されている。

以上をまとめると、重力波の3次元伝播の影響は本研究の重力波パラメタリゼーションによって効率的かつ十分に表現され、その気候場への影響は東西平均場のみならず東西非一様な場に対しても現れることがわかった。このような

パラメタリゼーションは今後のモデルによる中層大気の表現の向上に寄与するものとして、考慮する価値がある。

PANSY レーダーで観測された成層圏対流圏風速擾乱の周波数スペクトル解析

南原 優一 [1]; 佐藤 薫 [1]; 堤 雅基 [2]; 佐藤 亨 [3]; 中村 卓司 [2]; 西村 耕司 [2]; 富川 喜弘 [2]; 高麗 正史 [1]
[1] 東大・理; [2] 極地研; [3] 京大・情報学・通信情報システム

A study of frequency power spectra of wind disturbances based on observation data by the PANSY in the Antarctic

Yuichi Minamihara[1]; Kaoru Sato[1]; Masaki Tsutsumi[2]; Toru Sato[3]; Takuji Nakamura[2]; Koji Nishimura[2]; Yoshihiro Tomikawa[2]; Masashi Kohma[1]

[1] Graduate School of Science, Univ. of Tokyo; [2] NIPR; [3] Communications and Computer Eng., Kyoto Univ.

1. Introduction

Atmospheric waves mainly originating from the troposphere play an important role driving the general circulation in the middle atmosphere by redistributing momentum. Gravity waves are most difficult to observe because their spatial and temporal scales are small. Especially observations of gravity waves in the polar region are still not sufficient. However, recent studies indicate the importance of gravity waves in high latitudes for improving climate models such as cold bias in the polar stratosphere and bias in the timing of the polar vortex breaking (e.g. Geller et al., 2013). The PANSY radar provides wind vectors with high temporal and vertical resolutions continuously by using five beams pointing to the vertical, to the north, east, south, and west at a zenith angle of 10 degrees. The purpose of this study is to elucidate dynamical characteristics of wind disturbances in the polar region in terms of the frequency spectra by using the PANSY radar observation data.

2. Data and Analysis

An analysis was made of three-dimensional wind vectors over about three years from May 2012 to May 2015 with the time intervals of 180-240s. This time resolution and duration of observations are sufficient to analyze a full range of the gravity wave frequency, from the inertial frequency to the buoyancy frequency, if we can assume that the Doppler effects by the background wind are weak. For comparison, reanalysis data (JRA55) and JMA radiosonde observation data for the same time period are also used. As the observations were performed by a partial system of the PANSY radar before March 2015, the data in the height range from 1.5 to 5 km, where data quality is sufficiently high, is used for the spectral analysis. The vertical resolution is 150 m in the line-of-sight direction.

3. Results

Figure 1a shows the frequency spectra of the zonal wind fluctuations calculated using the PANSY radar data over the whole time period of three years. It is clear that the spectra slopes are different between the high (wave periods shorter than 10 d) and low (longer than 10 d) frequency ranges. For the low frequency range, the spectrum slope is about -0.4. This is consistent with the spectrum obtained from JRA55. For the high frequency range, its slope is about -1.9. This is much different from that of JRA55 whose slope is about -2.4. The spectra of meridional wind fluctuations have similar structure. The vertical wind spectrum obtained by the PANSY radar observations is shown in Fig. 1b. The spectral shape is different from that of the horizontal wind spectrum in terms of the spectral slope and transition frequency. For high frequency range (wave periods longer than 1 d), the spectral slope is about -0.3, which is consistent to the spectrum by JRA55. For low frequency range (shorter than 1d), the spectral slope is about -1.0, which differs from the JRA55 spectrum whose slope is about -1.5.

1. はじめに

大気波動は主に対流圏で発生し、中層大気に伝播して、運動量再分配することで大気大循環を駆動する役割を担っている。このうち重力波については時空間スケールが小さく観測が難しい。特に極域重力波の実態把握は不十分である。多くの気候モデルに共通する極渦崩壊期の再現バイアス (10日~2週間遅れ) の解決の鍵は、極域の重力波パラメタリゼーションの改善であると考えられている (e.g. McLandress et al., 2012)。

PANSY レーダーは鉛直方向を含む風速ベクトルの鉛直プロファイルを高分解能高精度で連続観測することができる南極初の大型大気レーダーである。本研究の目的は、PANSY レーダーの長期観測データを用いて南極域の重力波を含む風速擾乱の力学特性、特に周波数スペクトルの特性を明らかにすることである。

2. データと解析手法

解析期間は2012年5月~2015年5月の37ヵ月。観測物理量は鉛直および東西南北各方位の天頂角10°の視線速度である。鉛直分解能は150m。時間分解能は時期によるが180~240秒であり、(背景風によるドップラー効果が弱い場合) 慣性周波数から浮力振動数までの重力波の持つ周波数帯域をほぼ全て解析できる。比較のため再解析データ (JRA55) と気象庁のラジオゾンデによる高層気象観測データも用いた。

まず、Blackman-Tukey法を用いて、PANSY レーダーで観測された約3年分の対流圏成層圏データからの東西風、南北風、鉛直風の周波数スペクトルを求めた。なお、水平風の周波数スペクトルは、各視線速度の周波数スペクトルを組み合わせた精度の高い方法で推定した。同期間のJRA55、ラジオゾンデのデータについても同様に、周波数スペクトル

を計算した。

3. 結果

図1 (a) に PANSY レーダーの東西風の周波数スペクトルを示す。10 日周期付近にスペクトルの折れ曲がりが見られる。10 日より長周期（低周波数）では傾きはおよそ-0.4 である。これはラジオゾンデ、JRA55 のスペクトルと整合的である。10 日より短周期（高周波数）では傾きはおよそ-1.9 である。これはラジオゾンデのスペクトルと整合的であるが、JRA55 のスペクトルとは異なっている。

鉛直風（図1b）についても1日周期付近に折れ曲がりが見られる。1日の周期よりも長周期（低周波数）では傾きはおよそ-0.3 である。これはJRA55 のスペクトルとも整合的である。1日よりも短周期（高周波数）では傾きはおよそ-1.0 である。これはJRA55 のスペクトルとは大きく異なるものになっている。

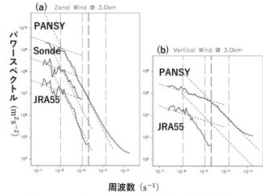


図1. $z = 3(\text{km})$ の周波数スペクトル（両軸対数）。
 $P_e(\omega)$ 東西風スペクトル (a), $P_v(\omega)$ 鉛直風スペクトル (b) を示している。各スペクトルは縦方向に1桁ずつずらしてある。破線は10日周期、1日周期、慣性周期（約13時間）、半日周期、2時間周期を示し、点線はPANSYの近似直線を示している。

$P_e(\omega)$	$\tau > 10d$		$\tau < 10d$	
	$\tau > 10d$	$\tau < 10d$	$\tau > 1d$	$\tau < 1d$
PANSY	-0.46	-1.98	-0.28	-1.01
Sonde	-0.29	-1.79		
JRA55	-0.41	-2.30		

表1. 東西風 (a) 及び鉛直風 (b) の周波数スペクトルの値

EMU-RASSによるUTLSの気温変動の詳細観測に関する提案

田畑 啓 [1]; # 津田 敏隆 [2]
[1] 京大・情報学; [2] 京大・生存研

Proposal of detail observation of temperature variation in the UTLS region with EMU-RASS

Hiraku Tabata[1]; # Toshitaka Tsuda[2]
[1] Informatics, Kyoto Univ.; [2] RISH, Kyoto Univ.

There are a number of interesting phenomena in the upper troposphere - lower stratosphere (UTLS) region in the tropics, including transport and exchange of energy and atmospheric minor constituents. It is important to observe structure and variations of wind velocity and temperature in UTLS. We have been promoting to construct the Equatorial Middle and Upper atmosphere (EMU) radar at Koto Tabang (E100.320, S0.204), Indonesia. The EMU radar is a high power Doppler radar similar to the MU radar at Shigaraki, Japan, and it can measure three components of wind velocity up to about 25 km height. In addition, we plan to apply the radio acoustic sounding system (RASS) to the EMU radar. RASS is an advanced radar observation method, by combining an acoustic transmitter and a radar, to measure a temperature profile. Adding RASS in the EMU radar enables us to observe the height profiles of temperature in the entire troposphere and lower stratosphere with good accuracy and high time resolution. In order to estimate a possible height range of RASS measurements in the equatorial region, we analyzed the sound propagation characteristics using ray-tracing method, assuming realistic profiles for horizontal winds and temperature. Although it is known that wind velocity is relatively weak in the equatorial region, the zonal winds sometimes become strong at a height range of 5 -15 km, and a sharp bent in the temperature gradient near the tropopause affects the RASS observation. The quasi-biennial oscillation (QBO) of the zonal winds in the stratosphere also gives large influence on the observation height range of RASS. We also investigated that steering of radar antenna beam and relative position between an acoustic speaker and the radar enable us to observe temperature from the ground up to 25 km height throughout a year, where the speakers should be moved along the wind direction by 200 to 500 m.

熱帯域の上部対流圏・下部成層圏 (upper troposphere - lower stratosphere: UTLS) においては、エネルギー、及び大気微量物質の輸送と交換が起こっており、数多くの興味深い大気現象が観測される。したがって、UTLS での風速や温度の構造や変動を測定することは、これらの大気現象を理解する上で非常に重要である。そこで、我々は、インドネシアのコトタバング (E100.320, S0.204) に赤道 MU(EMU) レーダーの建設計画を進めている。EMU レーダーは、信楽 MU レーダーと同じ高出力ドップラーレーダーであり、約 25km までの風速 3 成分を測定することが可能である。さらに、EMU レーダーに radio acoustic sounding system (RASS) を適用することを計画している。RASS は、音波発振器とレーダーを組み合わせることによって、気温プロファイルを測定する斬新なレーダー観測手法である。よって、EMU に RASS を付加することによって、高精度でかつ高時間分解能で対流圏から下部成層圏における気温の高度プロファイルを得ることが出来る。赤道域における RASS 観測可能な高度範囲を見積もるために、水平風と気温の現実的なプロファイルを仮定して、レイトレース法による音波の伝搬特性を解析した。赤道域における風速は比較的弱いことが知られているが、東西風は時折、5 - 15km の高度域で強くなる。また、対流圏界面付近における温度勾配の急激な変化は、RASS 観測に影響する。成層圏における東西風の準 2 年周期振動 (Quasi-Biennial Oscillation: QBO) もまた RASS の観測高度範囲に影響を与える。さらに、我々は、レーダーアンテナビーム操作、及びスピーカーとレーダーの相対位置によって 1 年を通じて地上から高度 25 km までの気温測定の可能性を調べた。その場合、スピーカーを風速の方向に沿って 200-500 m ほど移動させる必要があることが判明した。

南極昭和基地上空対流圏下層における水平風変動

山森 美穂 [1]; 佐藤 薫 [2]; 富川 喜弘 [3]
[1] 都留文大; [2] 東大・理; [3] 極地研

Lower-tropospheric horizontal wind variability over Syowa Station, Antarctica

Miho Yamamori[1]; Kaoru Sato[2]; Yoshihiro Tomikawa[3]
[1] Tsuru Univ.; [2] Graduate School of Science, Univ. of Tokyo; [3] NIPR

Characteristics of lower-tropospheric horizontal wind variability over Syowa station (69 degrees S, 39 degrees E) in the Antarctica are investigated by using high vertical resolution data of the routine radiosonde observation by the Japan Meteorological Agency for January 2011 to January 2014. We particularly consider the intensification of northeasterlies which is sometimes observed in the lower troposphere, usually below the 1.5 km altitude, and lasts for 1–2 days.

It has been described that the prevailing surface wind direction at the Syowa Station is northeasterly throughout the year. One of the main causes of these northeasterly winds is orographic effects. Since the Syowa station is located on an island to the west of the steeply rising edge of the Antarctic continent, the katabatic wind from the continent has westward component and also southward component due to Coriolis effect (Sato and Hirasawa, 2007). Another is low pressure systems developing on the equator side of the station. There are some features that are not simply accounted for with both mechanisms in the above mentioned northeasterly intensification.

Statistical analyses show that variances of the zonal and meridional wind components are maximized at the altitude of 1.2 km and 8 km, and minimized around the altitude of 3 km. At the 1.2 km altitude, increased power spectral density is observed around period of 3 days. Phase differences between zonal and meridional wind components below the 2 km height are distributed in the vicinity of 0 degree, consistent with that prevailing wind is northeasterly. Cospectrum between meridional wind component and temperature is significantly negative in periods longer than 3 days, and especially large in the vicinity of the period of 7 days. On the other hand, the cospectrum is small in periods shorter than 3 days, suggesting that these components have large amplitude of horizontal wind components but do not contribute to the net meridional heat transport.

It is found that the northeasterly intensification in the lower troposphere is often accompanied by an elevated temperature inversion layer at similar altitudes. The inversion layer is sometimes observed as an enhancement of the echo power of PANSY radar when the layer is located higher than the altitude of 1.5 km. We expect detailed examination of the phenomena using the PANSY data.

昭和基地近傍の南極氷床表面の顕著な融解現象

平沢 尚彦 [1]
[1] 極地研

A prominent surface melting event of Antarctic ice sheet near Syowa station

Naohiko Hirasawa[1]
[1] NIPR

A prominent surface melting of Antarctic ice sheet occurred near Syowa station in 2012/13 summer. This study discusses the mechanism of the event with limited in-situ data, satellite data and numerical model.

2012/13年夏季に南極氷床の海岸線から50km、標高1200mの地域で氷床表面にできた沢山の凹部に氷が形成されているのが発見され、それは表面が融解を経験した痕跡と考えられた。この表面融解がいつ、どのような過程で起こったのかについて、大気データ、衛星データ、数値モデルを用いて明らかにする。

Correlation between PMWE and CNA and its height dependance: first simultaneous and common volume observations by the PANSY radar

Takanori Nishiyama[1]; Kaoru Sato[2]; Takuji Nakamura[1]; Masaki Tsutsumi[1]; Toru Sato[3]; Koji Nishimura[1];
Yoshimasa Tanaka[1]; Yoshihiro Tomikawa[1]; Masashi Kohma[2]

[1] NIPR; [2] Graduate School of Science, Univ. of Tokyo; [3] Communications and Computer Eng., Kyoto Univ.

In the lower thermosphere at the altitude of around 100 km, both neutral turbulence and ionization of atmosphere due to solar radiations cause irregularities of refractive index, and as a result back scatter echoes from that altitude are frequently observed by radars on the ground. In the mesosphere, Polar Mesosphere Summer Echo (PMSE) is reported to be a strong echo associated with ice particles, which are produced around the coldest mesopause region in the polar summer, by a number of past radar observations [Cho and Rottger, 1997; Rapp and Luebken, 2004]. It should be also noted that occurrence rate of PMSE is very high (80-90%) [Bremer et al., 2003]. On the other hand, Polar Mesosphere Winter Echo (PMWE) is also known as back scatter echo from 55 to 85 km in the mesosphere, and it has been observed by MST and IS radar in polar region during winter [e.g., Ecklund and Balsley, 1981; Czechowsky et al., 1989; Luebken et al., 2006; Strelnikova and Rapp, 2013]. Due to the lack of free electrons and ice particles in the dark and warm mesosphere during winter, it is suggested that PMWE requires strong ionization of neutral atmosphere associated with precipitations of Solar Energetic Particles (SEPs) during geomagnetically disturbed periods [Kirkwood et al., 2002; Zeller et al., 2006]. However, the detailed generation process of PMWE has not been identified yet, partly because the reported PMWE occurrence rate was quite low (2.9%) [Zeller et al., 2006].

The PANSY (Program of the Antarctic Syowa MST/IS) radar radar already observed many PMWE events since it has started mesosphere observations in June 2012 [Nishiyama et al., 2015]. In this presentation, we would like to focus on occurrence characteristics of PMWE during both Solar Proton Event (SPE) and big geomagnetic storms. When PMWE was detected by the PANSY radar, highly energetic particle precipitations, either protons or electrons, were frequently observed by Polar Operational Environmental Satellite (POES) / Medium Energy Proton and Electron Detector (MEPED) above Syowa Station. In order to estimate background electron density for PMWE altitudes, we established an application method of the PANSY radar as riometer using measured temporal variations of background noise level. For example, one event study during the SPE that occurred in May 23, 2013 is presented. After large flux of precipitating protons were observed by POES/MEPED above Syowa Station, sudden appearance of PMWE around 65 km and strong Cosmic Noise Absorption (CNA) of ~0.8 dB were detected simultaneously. This strongly suggested that energetic proton precipitations triggered electron density enhancement at altitudes for 60-100 km. Moreover, a statistical study on a relationship between observed height of PMWE and CNA in May 2013 was done. As a result, strong CNA (>0.4 dB) during SPE has good correlations to PMWE below 70 km. Therefore, it is revealed that PMWE for lower altitudes (60-70 km) can be generated when strong ionization enough to observe CNA occurred. However, the most of PMWE occurred without CNA, and therefore, electron density enhancements by precipitations are not necessarily required for PMWE.

PANSY レーダーを用いた極域中間圏夏季エコー (PMSE) と中間圏界面付近の風速の解析

高麗 正史 [1]; 佐藤 薫 [1]; 佐藤 亨 [2]; 堤 雅基 [3]
[1] 東大・理; [2] 京大・情報学・通信情報システム; [3] 極地研

Statistical analyses of polar mesosphere summer echoes and mesospheric winds observed by the PANSY radar

Masashi Kohma[1]; Kaoru Sato[1]; Toru Sato[2]; Masaki Tsutsumi[3]
[1] Graduate School of Science, Univ. of Tokyo; [2] Communications and Computer Eng., Kyoto Univ.; [3] NIPR

Strong radar echoes are observed in the VHF wavelength range in the polar summer around the mesopause region. This echo is called Polar mesosphere summer echo (PMSE). Since the number of observations of PMSEs in the Antarctic is small compared to that in the Arctic, its regional dependence and interannual variability are still unclear. In the present study, the PMSEs and wind velocities estimated from PMSE's Doppler frequency were examined statistically using observations from the PANSY radar installed at Syowa Station, which started continuous observations from 2012.

The vertical interval and height resolution of data in the mesosphere are about 4 minutes and 600 m, respectively. The analyzed period is two PMSE seasons, namely, from November 2013 to February 2014 and from November 2014 to February 2015. PMSEs are defined here as signal-to-noise ratio (SNR) of scattering echoes greater than -12 dB in the altitude range of 80-95 km.

PMSEs were observed from November 15 to February 15 and were most frequently observed around 85 km. These characteristics of PMSEs are consistent with previous observational studies (e.g., Morris et al., 2005). In the following analyses, the altitude range of 82-90 km, where PMSE's occurrence frequency is greater than 20%, is examined.

In order to examine momentum fluxes of gravity waves, we calculated high-pass-filtered components with a cut-off period of 1 day, and gravity waves are defined here as subtraction of tidal components from the high-pass-filtered components. Momentum fluxes associated with gravity waves are calculated following Vincent and Reid (1983). In the altitude range of 83-89km, the zonal (meridional) component of the vertical momentum flux is positive (negative), which is consistent with previous studies based on MU radar observations (Tsuda et al., 1990). However, almost all kinetic energy and momentum fluxes associated with gravity waves are attributable to low-frequency components with periods longer than 1 hour, which means that spectral characteristics in the Antarctic are different from those in the mid-latitudes.

夏季の極域中間圏界面付近において VHF レーダーで非常に強いコヒーレントエコーが観測される。これは、極域中間圏夏季エコー (Polar Mesosphere Summer Echo、以下 PMSE) と呼ばれる。PMSE の南半球での観測例は限られており、地域依存性や年々変動はあまり調べられてない。本研究では、2012 年以降、南極昭和基地大型大気レーダー (PANSY レーダー) で得られた中間圏データを用いて、PMSE 及び、推定された風速場の統計解析を行った。

PANSY レーダーによる中間圏観測データの時間間隔は約 4 分、高度分解能は 600 m である。今回、2013 年 11 月～2014 年 2 月と 2014 年 11 月～2015 年 2 月の観測データを解析した。高度 80～95 km における散乱エコーの SN 比が -6 dB 以上となるものを PMSE と定義し、PMSE のドップラー周波数より、ビーム方向の風速を推定した。

PMSE の検出期間は、11 月 15 日～2 月 15 日であった。出現頻度は高度 85 km で最大となる (約 70%)。これらの特徴は、Davis 基地の観測 (Morris et al., 2005) と整合的である。以下では、PMSE の出現頻度が 20 % 以上となる高度 82～89 km について詳しく解析した。

本研究では、重力波成分は、「1 日以下の周期成分から潮汐成分を差し引いたもの」として定義し、Vincent and Reid (1983) の手法を用いて運動量フラックスを推定した。高度 83～89 km において、東西運動量の鉛直フラックスは正、南北運動量の鉛直フラックスは負であり、その大きさは、信楽 MU レーダーによる先行研究と、同程度であった (Tsuda et al., 1990)。周期が 1 時間より長い成分と短い成分で分けると、1 時間以上の周期の重力波が、運動エネルギー、運動量フラックスのほとんどを説明することが分かり、スペクトル特性は中緯度とは異なることがわかった。

Propagation characteristics of mesospheric gravity waves observed by Antarctic Gravity Wave Imaging/Instrument Network (ANGWIN)

Takashi Matsuda[1]; Takuji Nakamura[2]; Masaki Tsutsumi[2]; Mitsumu K. Ejiri[2]; Michael J. Taylor[3]; Yucheng Zhao[4]; P.-Dominique Pautet[4]; Damian Murphy[5]; Tracy Moffat-Griffin[6]

[1] Sokendai; [2] NIPR; [3] Utah State University; [4] Utah State University; [5] Australian Antarctic Division; [6] British Antarctic Survey

Gravity waves, generated in the lower atmosphere, can propagate to the mesosphere and the lower thermosphere, and transport energy and momentum, and release them at various altitude regions. Among many parameters to characterize gravity waves, horizontal phase velocity is very important to discuss vertical propagation and where the momentum is released. Near the mesopause region, OH and other airglow imaging has been used for investigating the horizontal structures of gravity waves for more than two decades. Although the huge amount of the image data has been observed at various observation sites distributed globally, the same procedure has been used for detailed data analyses of horizontal propagation characteristics, and causes difficulty in obtaining a global map of gravity wave characteristics in the mesopause region. Another important fact on the mesospheric gravity wave studies is that observations over the Antarctic region were significantly rare despite a significant amount of gravity waves generated in this region.

ANGWIN (Antarctic Gravity Wave Imaging/Instrument Network) is an international airglow imager (and other instruments) network in the Antarctic, started in 2011. It seeks to reveal characteristics of mesospheric gravity waves, and to study sources, propagation, breaking of the gravity waves over the Antarctic and the effects on general circulation and upper atmosphere. In this study, we obtained distributions of horizontal phase velocity of the gravity waves at around 90 km altitude over different locations using our new statistical analysis method using 3-D Fourier transform, developed by Matsuda et al. (2014). Results from the airglow imagers at four stations: Syowa (69S, 40E), Halley (76S, 27W), Davis (69S, 78E) and McMurdo (78S, 156E) out of the ANGWIN imagers have been compared, for the observation period between April 6 and May 21 in 2013. We have also compared the results at Syowa and Davis with blocking diagram using wind profiles from re-analysis data and MF radar data, and found that effect of wind filtering by critical level could only explain the directionality over Syowa. It suggests that gravity waves observed at Davis could be secondary waves generated above the polar night jet.

全球雷活動の周期的変動と地球気候変動および太陽活動との関係

佐藤 光輝 [1]; 高橋 幸弘 [2]; 鴨川 仁 [3]
[1] 北大・理; [2] 北大・理・宇宙; [3] 東京学芸大・物理

Global lightning variability and the relation to climate change and solar activities

Mitsuteru SATO[1]; Yukihiro Takahashi[2]; Masashi Kamogawa[3]
[1] Hokkaido Univ.; [2] CosmoSciences, Hokkaido Univ.; [3] Dept. of Phys., Tokyo Gakugei Univ.

Lightning activity is one of the good proxies representing the intensity of the vertical deep convection in the troposphere. Since ~80% of lightning discharges occur in the tropical and subtropical zones, monitoring of lightning activities enables us to assess the activities of the deep convection at the tropical and subtropical atmosphere. For this purpose, observation systems of electromagnetic waves in the ELF range excited by lightning discharges and DC electric field maintained by lightning discharge currents are installed at Syowa station in Antarctica. According to ELF data analyses, it is found that global lightning activities dynamically change with a periodicity of ~5, ~10 and ~30 days. ~5-day and ~10-day variations of lightning activities are possibly related to the passage of the low- and high-pressure air masses over the continental regions. On the other hand, ~30-day variation of lightning activities is considered to be related with the variations of the solar activities. We also found ~30-day periodicity in the tropical and subtropical cloud amount variability and found the antiphase relation between the cloud amount variations and lightning activities. Recently, it is reported that lightning activities and the upper tropospheric water vapor variability in the tropics are well correlated. Such water vapor, which is a potent greenhouse gas, was transported from the lower altitude to the upper troposphere through the deep convections related with the active lightning activities. It is reported that the ~11-year variations of global cloud amount and cosmic ray flux are closely correlated and that the amplitude of the variations peaked at the solar minimum period. To the contrary, recent studies on the global lightning activities revealed that there is ~11-year periodicity in the amplitude variations of ELF electromagnetic waves excited by lightning discharges and that the amplitude of the variations peaked at the solar maximum period. Thus, it is deduced that the antiphase relation between the ~11-year cloud variability and ~11-year variations of the global lightning activities are also exist. In order to nowcast and forecast the short/long period variations related with the global climate change and effects of the solar activities on the Earth's climate, continuous monitoring of global lightning activities are very useful. Future collaboration between the measurements by the large atmospheric radars newly installed at Syowa station and ELF and DC electric field measurements will contribute more quantitative understanding of the deep convection in the tropical and subtropical zones, global climate change and possible Sun-Earth connection.