

氏 名 榎本 孝之

学位(専攻分野) 博士(理学)

学位記番号 総研大甲第 1911 号

学位授与の日付 平成29年3月24日

学位授与の要件 物理科学研究科 宇宙科学専攻
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 Temporal variations of Venusian upper cloud and haze
inferred from ground-based polarimetric observations

論文審査委員 主 査 教授 早川 基
教授 佐藤 毅彦
准教授 阿部 琢美
准教授 生田 ちさと
教授 今村 剛 東京大学

論文の要旨

Summary (Abstract) of doctoral thesis contents

Venus is entirely shrouded by thick clouds composed of micron-sized droplets of concentrated sulfuric acid (H_2SO_4). In addition to the main cloud, it is known that the submicron hazes overlay and vary with time scale of several years. These particles play important roles in the upper atmosphere of Venus by scattering and absorbing the incident sunlight, thereby affecting the temperature and the chemistry. Therefore, studying generation and sustention mechanism of the massive cloud system is essential for deep understanding of the chemical process, radiative balance of the atmosphere, and atmospheric dynamics. With such background, this thesis focuses on spatial and temporal variability of clouds and hazes of Venus. Three major achievements of this thesis are: A) large-scale temporal variations of the haze are detected and characterized by ground-based observations; B) physical parameters are derived by comparing the observations with model simulations; and C) a possible factor for the temporal variations of haze is proposed.

A) Tracking the temporal variations of the haze

To efficiently study variability of submicron hazes, appropriate observing wavelengths (930 nm for haze abundances and 438 nm for cloud-top altitudes) and solar phase angles (~ 80 degrees) are chosen. Then, strategic imaging-polarimetric observations were carried out from August 2012 to June 2015 with HOPS (Hida Optical Polarimetry System) instrument attached to the 65cm refractor telescope at the Hida Observatory. In addition to the standard processing of polarimetry data, I have developed a procedure to reduce the effect of atmospheric seeing: both disk-integrated polarizations and spatially-resolved polarization maps are produced from raw HOPS data. I measure the disk-integrated polarizations with a technique of aperture photometry, which minimizes the blurring effect due to the atmospheric seeing. Then, I estimate a point-spread function (PSF: a modified-Lorentzian function is introduced) for each image, by blurring a synthetic image to match the observed image, which is used in the model comparisons. In the time series (August 2012, April 2014, and June 2015), a significant change in the disk-integrated polarizations (from -2.2% to -3.6%) is detected. The polarization maps also show large changes in spatial distribution of the haze. The positive polarizations seen in polar regions in August 2012, turned to be negative in April 2014 and June 2015. Such a large-scale variability is reported for the first time since the end of the Pioneer Venus mission.

B) Derivation of physical parameters for the haze variations

To estimate the properties of the haze, I compared observations with theoretical

(別紙様式 2)
(Separate Form 2)

calculations. For model calculations, I refer to Sato et al. (1996) as the vertical structure model, which approximate well the structure of upper cloud of Venus. Optimal parameter space is searched for by comparing the disk-integrated polarizations and the polarization maps with the model computations after blurring with the measured PSF. From the comparisons of 930nm data, I found optical thickness of upper haze $\tau_h=0.15$ and fraction of the haze in cloud layer $f_h=0.047$ in August 2012, decreasing to $\tau_h=0.02$ and $f_h=0.016$ in April 2014, and $\tau_h=0.01$ and $f_h=0.01$ in June 2015. On the other hand, from 438nm data, the cloud top altitudes are lower in polar region in August 2012 and June 2015, while these are at for the entire planet in April 2014. With these results, I have tested the "Cloud lowering hypothesis" (Braak et al. (2002)); the haze particles are distributed uniformly in certain altitude over the whole altitude, thus the lowering of the cloud top leaves relatively more of sub-micron particles above the cloud. My finding that τ_h is small while the cloud top altitude on polar region is lower in June 2015 obviously conicts with that hypothesis. For the first time, such discrepancy is observationally and quantitatively indicated.

C) Possible factor of the temporal variation of haze

In order to explain mechanisms of the variations of haze, I simulated the behavior of τ_h and f_h by altering the cloud top and aerosol scale height profiles by referring to previous studies based on Venus Express [Wilquet et al. (2012), Lee et al. (2012)]. When aerosol scale height is varied, τ_h does not change over some aerosol scale height and f_h increase linearly. From these 2 examinations, I found that the variations of both cloud top altitude and aerosol scale height also cannot explain my observations. However, the simultaneous decrease of f_h and τ_h are realized when the amount of the haze particles is lowered. This shows that the amount of haze itself is the cause of the variation of τ_h and f_h . I propose the relationships to the solar activity as a possible explanation for such variation of haze. To investigate this, I developed a conversion equation from derived τ_h to SO₂ abundance f_{SO_2} of which time history can be found in literature. Esposito et al. (1988) pointed out the correlations in temporal variation of τ_h and f_{SO_2} during PVO mission, which indicate that the source of the haze is SO₂. Using my results and the relationships between them, I estimated the temporal variations of f_{SO_2} . The values obtained from the relations are consistent with the temporal variation of f_{SO_2} reported by Marcq et al. (2013), if the decrease of f_{SO_2} from 2007 has been continued. I found that several phenomena, such as increases of haze and SO₂, seem to correspond to the solar maxima. The photochemical reactions, thus production of SO₂, might become active since the UV flux increase in solar maximum. In order to confirm the relations between solar activity and SO₂ or τ_h , long-term observations over several ten years are needed for the future.

(別紙様式 2)
(Separate Form 2)

My observations captured the situation of epic decrease of the haze since 1980's Pioneer Venus mission by ground-based observations for the first time, which provide new information about the temporal variations of upper haze to the history of Venus. The cause of the temporal variations of the haze and proposed factor to them in this thesis should contribute to the science of Venus in understanding the mechanism of generation and sustention mechanism of the upper haze.

Summary of the results of the doctoral thesis screening

金星は地球と異なり全球が分厚いエアロゾル層（高度およそ50～80kmに存在）により覆われているため、その高度における太陽光吸収が惑星全体の熱収支および大気ダイナミクス（スーパーローテーションに代表される）に大きな影響をもつと考えられている。偏光撮像観測は、そうしたエアロゾルの量や特性（粒径、屈折率）に敏感であり、金星エアロゾルが硫酸液滴であると示すことに大きく貢献した歴史がある（Hansen and Hovenier, 1974など）。本論文はその手法を現在の金星に適用し、上層エアロゾルが増減するメカニズムを考察したものである。

出願者はまず、小粒子（ヘイズ：粒径0.25 μm ）と大粒子（雲：粒径1 μm ）の一次散乱偏光度が観測波長や位相角にどう依存するかを検討した。赤外線（波長930 nm）、位相角80°付近でヘイズと雲の識別が最も鋭敏にできると判定し、2012年から2015年にかけて京都大学飛騨天文台（岐阜県高山市）にて偏光撮像観測を実施しデータを取得した。レイリー散乱による偏光を利用し雲頂高度を判別するための青色（波長438 nm）観測も加えている。大気ゆらぎは地上観測で不可避であるが、金星を含むアパーチャ領域を測光し「空間情報はないが正確な全面積分偏光度」を得、それと空間構造を示す偏光度マップの解析を組み合わせ大気ゆらぎの影響を低く抑えるという手法を開発し適用している。このようなデータの扱い方は、大気ゆらぎの影響を伴う地上観測データ解析に大きく参考になる、出願者の貢献であるといえる。

出願者はこの新たな解析手法により、2012年から2015年にかけて、金星極域のヘイズ（雲の上に存在する小粒子の層）光学的厚さ0.15から0.01へと大きく減少していることを見出した。過去にはパイオニア・ビーナス周回機（PVO）がその10年以上にわたる金星周回中にヘイズの増減を観測しているが、PVO以来初めてこうした大規模な変化をとらえ定量的に示したことは価値が高い。

さらに出願者は、そのような大規模なヘイズの減少（あるいは増加）を引き起こすメカニズムを探るために考察を深めている。Braak et al. (2002)が提唱したメカニズムのうち、移流・滞留モデルは観測を説明し得るもののそれを検証する情報はないと指摘した。雲頂変動モデルは「雲頂高度が低かったにもかかわらずヘイズは少なかった」2015年の観測により棄却されることを明確に示した。さらに出願者は、エアロゾルのスケールハイト（数密度が1/eになる高度差）を変化させモデル計算を行うなどし、観測された2012年から2015年の変化を説明するためには「エアロゾル粒子の数密度そのものが変わる」ことが必要であると結論している。

それではなぜエアロゾル粒子の数密度が変わるのか、その答えは確定しないが、出願者は太陽活動度の変動が金星大気SO₂濃度を変え、それがヘイズ粒子を生成する化学反応に影響するのではないかという説を提唱した。本論文でその有効性が示された偏光撮像観測による継続的モニター、金星を周回中の「あかつき」からのデータなどを組み合わせ、今後続けられるべき研究課題であろう。

本論文は、地上からの偏光撮像という「探査機の時代であってもなお有効」な観測手法

(別紙様式 3)

(Separate Form 3)

を用いて金星上層エアロゾルをモニターし、その大規模な変化をとらえた。モデル計算により得られた物理情報は、探査機 (Venus Express、あかつき) からの情報と相補的に用いることで、金星大気ダイナミクスの理解に貢献する意義深いものである。出願者は、飛騨天文台における観測、データ処理を自ら行うだけでなく、解析ツールの核である偏光を含んだ放射伝達計算プログラムも一から開発するなど、本研究のすべての部分を主体的に実行している。以上のことから、審査委員全員が博士論文として合格であると判断した。