

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 4月11日現在

機関番号：11301
 研究種目：基盤研究（B）
 研究期間：2010～2012
 課題番号：22340142
 研究課題名（和文） 高分散分光観測による地球型惑星の大気ダイナミクス・微量成分変動の研究
 研究課題名（英文） Atmospheric dynamics and variations of minor components in the terrestrial planets by high-dispersion spectroscopic studies
 研究代表者
 笠羽 康正（Yasumasa Kasaba）
 東北大学・大学院理学研究科・教授
 研究者番号：10295529

研究成果の概要（和文）： 兄弟惑星である金星・火星の分光観測・理論研究および将来観測手段の開発を行った。(a) 大気ダイナミクス・組成変動：[A-1. 地上観測] 赤外・サブミリ波観測により、金星大気速度/温度場および火星大気 H₂O₂・H/D 比等変動検出を実施した。[A-2. 探査機観測] Venus Express, Mars Express 探査機により、金星・火星の雲層・温度場・微量大気成分平均描像・変動を求めた。[A-3: 数値モデル] 金星・火星大気大規模循環モデルを開発し、観測研究との結合を行った。(B) 分光システム開発：[B-1. 地上観測用] ヘテロダイン観測システムの実用化に成功した。[B-2. 探査機搭載用] 基礎検討を進め、また火星・木星サブミリ波観測装置開発に貢献した。

研究成果の概要（英文）： We executed the spectroscopic/theoretical studies of Marsian and Venusian atmospheres with the instrument developments. (a) Atmospheric dynamics and variations of minor components: [A-1. groundbased observation] Velocity/temperature/H₂O₂/HDO/ etc. were studied by IR and submm observations. [A-2. Orbiter observations] Temperature/clouds/minor components were studied by Venus Express and Mars Express data sets. [A-3: Numerical models] GCMs were developed and utilized with the observational studies. (B) Spectrometer developments: [B-1. For Ground-based] We succeeded to the development of MIR Heterodyne spectrometer. [B-2. For Orbiter] Base investigation was executed. It was utilized for the studies of Martian / Jovian submm instruments.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	12,400,000	3,720,000	16,120,000
2011年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2012年度	1,500,000	450,000	1,950,000
年度			
年度			
総計	15,400,000	4,620,000	20,020,000

研究分野： 数物系科学

科研費の分科・細目： 地球惑星科学・超高層物理学

キーワード： 赤外分光観測, サブミリ波分光観測, Mars Express 探査機, Venus Express 探査機, 大気大循環数値モデル, 火星大気, 金星大気, 赤外線分光器開発

1. 研究開始当初の背景 | 地球の兄弟惑星は、なぜ異なる大気環境を有

するのか？ その起源は、(1)ダイナミクス変動の鍵を握る「風速場・温度場」および(2)組成変化の鍵を握る「表層での生成と大気中各種反応で決まる微量成分・同位体比」の中に埋もれている。前者のダイナミクス変動、例えば金星の大気運動「スーパーローテーション」の解明は2010年打上の金星周回探査機 Planet-C の主目標だが、その手法は「高空間分解画像から雲移動を捉える」もので、数十 m/s の風速場を直接捉えるものではない。後者の大気組成、例えば最近発見された火星 CH₄ のような「大気の大気非主要成分」を詳細・厳密にトレースするには、高 S/N と分子各振動・回転ライン分離を要する。これらの戦略目標は、従来の「撮像を低分散分光で支援する形の周回探査」ではカバーされない。観測手法と数値モデルの開拓によって、我々はこの解明に向けた以下の研究を進めてきた。

(1) 地上観測：1999年度に申請者が岡山で開始した金星分光撮像観測に始まり、2008年度にはサブミリ波高波長分散観測で火星大気中の微量成分変動指標たる SO₂ (地殻起源)・H₂O₂ (酸化消失) を実施。また NASA/IRTF での近赤外高分散分光観測によって、木星の極域超高層大気運動・雲層下部構造の変動追跡や、金星超高層の温度場計測に成功。

(2) 探査機観測：(1)を補完すべく、2009年度から、欧火星探査機 Mars Express に搭載されたフーリエ分光器 (PFS) 等による、火星大気中の酸化成分 H₂O₂ の初の時間・空間変動追跡を開始。

(3) 数値モデル研究：火星熱圏の Global Circulation Model を拡張した、木星および金星での大気下層～上層をつなぐ力学・化学結合モデル構築に初めて成功。

また、将来観測手段を切り拓くため、より直接情報を得る手段、即ち、多くの分子ラインを含む赤外域での高感度・高分散 (10^{-5-6} [ライン分離] ~ 10^{-7} [速度分解]) 分光装置の開発を進めてきた。

(4) 地上観測用中間赤外域分光 (8~14 μ m) : 東北大は、1990年代に「赤外線レーザーヘテロダイナミクス分光」技術を開発した。電波観測の手法と原理は同じく、天体信号と「局部発振光源」の混合で得られる「光ビート」を高速検出し、波長分解能 10^{-7-8} (数~数十 m/s 相当) を量子雑音限界で達成する。2007年度からは、「高い波長安定度、広い波長可変性、大光度」を要する赤外光源に、2007年末に入手可能となった「量子カスケードレーザー」(波長安定度 10^{-6} 以上、波長可変幅 0.2% 以上、出力数 mW 以上、発振可能波長 5~12 μ m) を用いた開発を再開した。2008年末に光ビート生成に成功、2009年度には他に本方式を開発中の世界唯一のグループ、NASA/GSFC・ケルン大との共同研究を開始、

試験観測システムの構築を順調に進めている。

(5) 探査機搭載用近赤外域分光 (1~5 μ m) : 仏・ロシア・ベルギーチームは、音響光学素子を用いた小型近赤外高分散分光装置 SOIR を欧 Venus Express 探査機に搭載した。我々は、このグループと2009年度から共同開発を開始した。現システムの隘路である「冷却検出器ユニット」を JAXA と共に開発し、これを欧グループ開発の分光部と結合した新分光器の基礎設計を開始。これを欧・米・日の次世代火星探査計画等に搭載提案する準備を鋭意進めてきた。

2. 研究の目的

兄弟惑星である金星・火星は、なぜ地球と異なる大気環境を有するのか？ この究明に向け(1)ダイナミクス変動の鍵を握る「風速場・温度場」および(2)組成変化の鍵を握る「微量成分・同位体」の研究を観測・理論両面で進め、また将来観測手段を確立する。即ち、(A) 地上・探査機観測と数値モデルによる金星・火星大気中のダイナミクス・組成変動の探求 および (B) 地上用中間赤外・探査機用近赤外の高分散分光システム開発によって、本分野を前進させる。

(A) 地上・探査機観測と数値モデルによる金星・火星大気中のダイナミクス・組成変動の探求：[A-1] 惑星の地上観測：地上からの赤外・サブミリ波高分散分光観測を継続発展させ、「金星・火星大気中の速度/温度場・微量成分・同位体比の変動検出」を進める。[A-2] 惑星の探査機観測：欧州の Mars Express (PFS 等) および Venus Express (SPICAV 等) の分光観測グループと共同し、地上観測では取得困難な「連続・全球変動」の全貌を得る。[A-3] 金星・火星大気数値モデル研究：構築中の金星大気下層～上層結合モデルを完成させ、(A-1) (A-2) で見いだされる金星大気変動の機構を明らかにする。また火星へ本モデルを展開し、太陽風に晒される上層及び地表と結合する下層を含めた統合理解を得る。

(B) 地上用中間赤外・探査機用近赤外の高分散分光システム開発 [B-1] 地上観測用中間赤外域分光器の開発：既に関与した基盤技術を基礎に「実用システム」を構築し、国内小口径望遠鏡での試験観測を実施する。また、ハワイ大と協力してハワイ大口径鏡への装着を図り、桁違いの波長分解能で(A-1)に飛躍をもたらす。[B-2] 探査機搭載用近赤外域分光器の開発。欧州グループとの共同で、次世代の探査機搭載用高分散分光装置を確立し、欧・米・日の次世代火星探査計画等への搭載提案を進める。

3. 研究の方法

(A) 地上・探査機観測と数値モデルによる金

星・火星大気のダイナミクス・組成変動の探求。「地上観測研究」「探査機データ研究」「モデル研究」を連結し、上記の解明に新局面を拓く。

A-1. 赤外・サブミリ波の地上分光観測。観測好適期におけるハワイ山頂 NASA/IRTF 望遠鏡等による赤外線分光、名大チームとの協力によるサブミリ波分光、及び新規手段の開拓確保によって、地上観測でこそ得られる「高波長分解能データ」を基礎に、金星・火星大気「速度場・温度場・微量成分・同位体比」の新たな時空間変動を探索する。

A-2. 赤外線の探査機分光観測。欧州 Mars Express (PFS 等)・Venus Express (SPICAV 等) の分光観測機器チームとの共同で、探査機でこそ得られる「高空間分解された長時間・広波長に跨る質の安定したデータ群」により、(A-1)で見えてくる時空間変動の全体像を解明する。

A-3. 金星・火星大気数値モデル研究。金星・火星大気の高～低高度結合モデルを完成させ、時空間の分解能・カバー範囲に制約を受けざるを得ない観測研究 (A-1) (A-2) を補完し、これら大規模変動の全体像の把握およびその背後にある微視的物理・化学過程の解明を目指す。

(B) 地上用中間赤外・探査機用近赤外の高分散分光システム開発

(A-1) (A-2) の将来を切り拓く、次世代の「地上観測機器」「探査機観測機器」を開発する。

B-1: 地上観測用中間赤外域分光器の開発。高 S/N・長時間積分を可能とする実用システムを確立し、東北大・飯館 60cm 鏡、建設中の北大・名寄望遠鏡等や、マウナケア大口径鏡、開発着手した東北大/ハワイ大 2m 望遠鏡等で、桁違いの波長分解能によって (A-1) の飛躍を図る。

B-2: 探査機搭載用近赤外域分光器の開発。小型冷凍機と 2 次元アレイ検出器を統合した「探査機搭載用小型ユニット」のパッケージを開発し、欧州グループが担う分光部と統合した「次世代近赤外高分散分光器」を確立。これを欧・米・日の次世代探査計画へ搭載提案していく。

4. 研究成果

**** 2010 年度 ****

(A) 地上・探査機観測と数値モデルによる金星・火星大気「ダイナミクス・組成変動」の探求

A-1. 赤外・サブミリ波の地上分光観測 : 欧州が運営する南米アタカマ・APEX 望遠鏡により、火星大気微量成分の変動主因とされる「地殻起源放出」と「光化学酸化消失」を、それぞれの代表指標たる SO₂ および H₂O₂ で追跡した (結果解析中)。また、2011 年度観測好適期へ向けた SUBARU・IRTF による火星

分光観測計画 (2011 年 3 月に申請)、およびアタカマミリ波・サブミリ波干渉計 (ALMA) [2012 年度から稼働予定] を用いた金星・火星観測提案 (2011 年 7 月に申請予定) の検討を進めた。

A-2. 赤外線の探査機分光観測 : Mars Express 探査機搭載のフーリエ赤外線分光器 (PFS) データの共同解析をイタリア P I チームと進め、2 火星年に渡る H₂O₂ および温度場の導出に成功した (投稿論文 x2 の準備中)。また、風速場観測 (B-1)・モデル (A-3) に結合させるべく、Venus Express データから大気運動のスケール間結合度を求め、地球との比較を可能とした (投稿論文 x1 の準備中)。

A-3. 金星・火星大気数値モデル研究 : 金星の雲層～熱圏間を統合する力学・化学モデルを完成させ、下層起源波動等がもたらす上層変動、特に風速場・温度場・大気光の高度構造および時空間変動の推定を行った (論文 x1 の投稿中)。また、火星大気への本モデルの展開に着手した。

(B) 地上用中間赤外・探査機用近赤外の高分散分光システム開発

B-1: 地上観測用中間赤外域分光器の開発 : 今年度より導入した広帯域赤外線検出システムおよび中川助教ドイツ・ケルン大滞在等により、「第 1 世代の惑星観測用ヘテロダイナミック分光システム」開発を開始、順調に進捗中である。また、ドイツ・ケルン大グループと共同して、米・キットピークにて金星速度場・温度場の試験観測を実施した (投稿論文 x1 を準備中)。

B-2: 探査機搭載用近赤外域分光器の開発 : 開発途上の冷凍機と実績ある PtSi 検出器を結合した「近赤外線検出ユニット」検討を行った。また中間赤外分光器の検討にも着手した。

2011 年度

A) 地上・探査機観測と数値モデルによる金星・火星大気「ダイナミクス・組成変動」の探求

A-1. 赤外・サブミリ波の地上分光観測 : ハワイ SUBARU 8m 望遠鏡にて、火星大気 CH₄ 観測を 2011 年 11 月・2012 年 1 月に実施し成功した。また金星の大気速度場観測を A-3 と比較実施した。アタカマミリ波・サブミリ波干渉計 (ALMA) への金星・火星観測提案は 2011 年選考では漏れたが、2012 年度選考 (7 月締切予定) へ向けた準備検討を進めた。(投稿論文: 投稿前 x1)

A-2. 赤外線の探査機分光観測 : Mars Express 搭載のフーリエ赤外線分光器 (PFS) による「光化学酸化の指標 H₂O₂」「温度場」の空間・季節変動について成果をまとめた。金星探査機 Akatsuki は周回に至っていないが、Venus Express データ解析を継続し、雲

頂近傍の構造（特に高緯度域及び運動論的解析）の研究を進めた。（論文：出版済 x2、投稿前 x1、修士 x1）

A-3. 金星・火星大気数値モデル研究：金星雲層～熱圏統合力学・化学モデルを完成させ、下層起源波動等をもたらす上層変動（特に風速場・温度場・大気光変動）を定量的に推定した。また、火星・太陽系初期・系外惑星への展開を継続した。（論文：出版済 x1、投稿前 x1、博士 x1、修士 x1）

(B) 地上用中間赤外・探査機用近赤外の高分散分光システム開発

B-1: 地上観測用中間赤外域分光器の開発：震災被害から立て直した「第1世代惑星観測用ヘテロダイン分光システム」で2011年9月・2012年1月に広島大・東広島天文台にて試験観測に成功した。この成功を受け、東北大ハワイ・ハレアカラ観測施設へ向けた小型化改造へ着手した。

B-2: 探査機搭載用近赤外域分光器の開発：震災等もあって停止したJAXAの「小型軽量・低出力・長寿命の冷凍機」の開発再興に着手した。海外協力による「近赤外高分散エッセンス分光ユニット」は、欧米経済混乱を受けた惑星探査計画見直し等で仕切り直したが、基礎開発を進めていく。

****2012年度****

(A) 地上・探査機観測と数値モデルによる金星・火星大気のダイナミクス・組成変動の探求

A-1. 赤外・サブミリ波の地上分光観測：ハワイSUBARU 8m望遠鏡にて、火星大気CH₄観測およびH₂O/HDO観測を2012年4月に実施し成功した。また金星の大気速度場観測およびA-3と比較実施した結果を論文として結実させた。アタカマミリ波・サブミリ波干渉計(ALMA)への金星・火星観測提案を行い、金星温度場・風速場観測が採択されて2013年に観測予定となった（投稿論文：出版 x2）

A-2. 赤外線探査機分光観測：Mars Express搭載のフーリエ赤外線分光器(PFS)による「光化学酸化の指標H₂O₂」について投稿論文にまとめた。Venus Expressデータ解析を継続し、雲頂近傍の構造（特に高緯度域及び運動論的解析）の研究を進め投稿論文にまとめるとともに、手法が共通する木星雲層解析へ発展させた。（論文：出版 x1、投稿 x2、修士 x1）

A-3. 金星・火星大気数値モデル研究：金星雲層～熱圏統合力学・化学モデルを完成させ、下層起源波動等をもたらす上層変動（特に風速場・温度場・大気光変動）を定量的に推定した。また、火星GCMによるCO₂雲生成消滅の再現に成功し、論文にまとめた。さらに、太陽系初期・系外惑星への展開を継続した。（論文：出版 x1、修士 x1）

(B) 地上用中間赤外・探査機用近赤外の高分散分光システム開発

B-1: 地上観測用中間赤外域分光器の開発：2014年度の東北大ハワイ・ハレアカラ観測施設へ向けたヘテロダイン分光器の小型化改造を進めた。

B-2: 探査機搭載用近赤外域分光器の開発：経費の面から「冷凍機」の開発再興はうまく進めることができなかったが、将来火星探査（および木星探査）に展開可能なサブミリ波観測装置の開発に参画し、特にサイエンス定義へA-1/A-2/A-3と絡んで貢献した。（論文：出版 x1）

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計8件）

① Nakagawa, H., N. Hoshino, M. Sornig, Y. Kasaba, G. Sonnabend, D. Stupar, S. Aoki, and I. Murata, Comparison of general circulation model atmospheric wave simulations with wind observations of Venusian mesosphere, *Icarus*, in press, 2013. (査読有)

② Kuroda, T., A.S. Medvedev, Y. Kasaba and P. Hartogh, Carbon dioxide ice clouds, snowfalls, and baroclinic waves in the northern winter polar atmosphere of Mars (2013), *Geophys. Res. Lett.*, 40, 8, 1484-1488, DOI: 10.1002/grl.50326. (査読有)

③ Sato, T.M., T. Satoh, and Y. Kasaba, Retrieval of jovian cloud structure from the Cassini ISS limb-darkening data. I. Continuum scattering phase functions for cloud and haze in the South Tropical Zone (2013), *Icarus*, 222, 100-121, DOI: 10.1016/j.icarus.2012.09.035. (査読有)

④ Hoshino, N., H. Fujiwara, M. Takagi, Y. Takahashi, and Y. Kasaba, Characteristics of planetary-scale waves simulated by a new venusian mesosphere and thermosphere general circulation model (2012), *Icarus*, 217, 813-830, DOI: 10.1016/j.icarus.2011.06.039. (査読有)

⑤ Sato, T.M., H. Fujiwara, Y.O. Takahashi, Y. Kasaba, V. Formisano, M. Giuranna, and D. Grassi, Tidal variations in the Martian lower atmosphere inferred from Mars Express Planetary Fourier Spectrometer temperature data, *Geophys. Res. Lett.*, 38, 24205, doi:10.1029/2011GL050348, 2011. (査読有)

⑥ Nakamura, M., (他: 30名, Y. Kasaba: 22番目), Overview of Venus orbiter, Akatsuki

(2011), Earth Planet. Space, 63, 443-457, DOI: 10.5047/eps.2011.02.009. (査読有)

⑦ Kasaba, Y., H. Nakagawa, K. Aoki, I. Murata, T. Sakanoi, and S. Okano, High resolution laser spectroscopy in mid-infrared, Kogaku, 39, 595-597, 2010 (査読無)

[学会発表] (計 98 件)

- (1) Aoki, S., H. Nakagawa, Y. Kasaba, M. Giuranna, A. Geminale, G. Sindoni, H. Sagawa, J. Mendrok, Y. Kasai, and V. Formisano, Study of trace gases in the Martian atmosphere: Ground-based observation using SUBARU/IRCS and development of radiative transfer model for MEX/PFS limb observation, European Planetary Science Congress 2012, 2012 年 9 月 23-28 日, Madrid, Spain.
- (2) Giuranna, M., A. Geminale, A. Aronica, G. Sonnabend, M. Sornig, S. Aoki, Y. Kasaba, H. Nakagawa, G. Villanueva, and M. Mumma, Methane on Mars: PFS and VLT, Keck, IRTF, SUBARU joint observations campaigns, European Planetary Science Congress 2012, 2012 年 9 月 23-28 日, Madrid, Spain.
- (3) Kuroda, M., Y. Kasaba, I. Murata, H. Nakagawa, T. Kuroda, P. Drossart, and G. Piccioni, Latitudinal cloud characteristics in the Venusian northern high-latitude region evaluated from VEX/VIRTIS observations, European Planetary Science Congress 2012, 2012 年 9 月 23-28 日, Madrid, Spain.
- (4) Kuroda, T., H. Sagawa, H. Nakagawa, Y. Kasai, N. Terada, and Y. Kasaba, Modeling and observations of the atmospheric water cycle and isotopic fractionation on Mars, European Planetary Science Congress 2012, 2012 年 9 月 23-28 日, Madrid, Spain.
- (5) Teraguchi, T., Y. Kasaba, N. Hoshino, T.M. Sato, Y. Takahashi, S. Watanabe, M. Yamada, Y. Matsuda, T. Kouyama, D. Titov, and W. Markiewicz Venusian atmospheric turbulence evaluated from cloud brightness distribution in VEX UV images, EPSC-DPS Joint Meeting 2011, 2011 年 10 月 2-7 日, Nantes, France.
- (6) Kuroda, T., A.S. Medvedev, and Y. Kasaba, Influence of atmospheric dynamics on the CO₂ ice cloud formation on Mars studied with a general circulation model, EPSC-DPS Joint Meeting 2011, 2011 年 10 月 2-7 日, Nantes, France.
- (7) Nakagawa, H., S. Aoki, M. Kuroda, Y. Kasaba, I. Murata, and S. Okano, Mid-infrared Heterodyne Spectroscopy

Dedicated to Observation of Planet at Haleakala, Hawaii, EPSC-DPS Joint Meeting 2011, 2011 年 10 月 2-7 日, Nantes, France.

(8) Aoki, S., Y. Kasaba, M. Giuranna, A. Geminale, G. Sindoni, H. Nakagawa, Y. Kasai, I. Murata, D. Grassi, and V. Formisano, Detection of hydrogen peroxide (H₂O₂) in the Martian atmosphere with MEX/PFS, EPSC-DPS Joint Meeting 2011, 2011 年 10 月 2-7 日, Nantes, France.

(9) Hoshino, N., H. Fujiwara, M. Takagi, and Y. Kasaba, Effects of mesospheric wind on the propagation of planetary-scale waves, EPSC-DPS Joint Meeting 2011, 2011 年 10 月 2-7 日, Nantes, France.

(10) Kasaba, Y., S. Aoki, H. Nakagawa, I. Murata, V. Formisano, M. Giuranna, A. Geminale, and D. Grassi, Oxidant Component in the Martian Atmosphere Observed by MEX/PFS, The 41st annual meeting of Div. Planetary Sci. / American Astron. Soc., 2010 年 10 月 3-8 日, Pasadena Convention Center, Pasadena, California, USA

(11) Nakagawa, H., Y. Kasaba, S. Aoki, I. Murata, S. Okano, H. Maezawa, H. Sagawa, Y. Kasai, Searches for volcanic or crustal gas in the recent Martian atmosphere by ground-based observation, COSPAR 2010 General Meeting, 2010 年 7 月 18-25 日, Bremen, Germany.

(12) Aoki, S., Y. Kasaba, H. Nakagawa, I. Murata, V. Formisano, M. Giuranna, A. Geminale, Oxidant component in the Martian atmosphere observed by MEX/PFS, COSPAR 2010 General Meeting, 2010 年 7 月 18-25 日, Bremen, Germany.

(13) Hoshino, N., H. Fujiwara, M. Takagi, Y. Kasaba, Y. Takahashi, The impact of atmospheric waves on the O₂ 1.27- μ m nightglow distribution, COSPAR 2010 General Meeting, 2010 年 7 月 18-25 日, Bremen, Germany.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

笠羽 康正 (KASABA YASUMASA)
東北大学・大学院理学研究科・教授
研究者番号: 10295529

(2) 研究分担者

中川 広務 (NAKAGAWA HIROMU)
東北大学・大学院理学研究科・助教
研究者番号: 30463772

村田 功 (MURATA ISAO)
東北大学・大学院環境科学研究科・准教授
研究者番号: 00291245

坂野井 健 (SAKANOI TAKESHI)
東北大学・大学院理学研究科・准教授
研究者番号：80271857

岡野 章一 (OKANO SHOICHI)
東北大学・大学院理学研究科・名誉教授
研究者番号：10004483

藤原 均 (FUJIWARA HITOSHI)
東北大学・大学院理学研究科・准教授
研究者番号：50298741
(2010年まで)