様　式　C－19、F－19、Z－19　(共通)

科研費 KAKENHI

科学研究費助成事業　　研究成果報告書

平成 26 年　 5 月 22 日現在

機関番号：34304

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2013

課題番号：22540257

研究課題名（和文）カイパーベルト起源彗星の近赤外線高分散分光観測サーベイ

研究課題名（英文）Near-infrared high-resolution spectroscopic survey of comets originated in Kuiper-belt

研究代表者

河北　秀世（KAWAKITA, Hideyo）

京都産業大学・理学部・教授

研究者番号：70356129

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費）　3,200,000円、（間接経費）　960,000円

研究成果の概要（和文）：彗星は46億年前の太陽系形成の記憶をとどめる始原天体である。現在、彗星はオールト雲およびカイパーベルトを供給源としているが、その形成の起源は更に太陽に近い領域であったと考えられる。これら二つの力学的起源は、形成期においても異なる領域であったと考えられ、彗星核に含まれる氷の組成比などに違いが見られると予想される。本研究では特にカイパーベルト起源の彗星に焦点を当て、氷に含まれる有機分子の組成比を探った。サーベイの結果、カイパーベルト彗星とオールト雲彗星を比べた場合、前者のほうが有機物が欠乏していることが明らかになった。

研究成果の概要（英文）：Comets are the remnants of planetesimals formed in the early solar system 4.6 giga-years ago. Present sources of comets are the Oort cloud and the Kuiper-belt far from the Sun. However, the original birth place of the comets are thought to be inner region than those dynamical sources. Comets originated in different sources are formed in different birth areas. Especially, comets originated in the Kuiper-belt played an important role to deliver the pre-biotic molecules into the early Earth. This program are focused on the organic molecules in Kuiper-belt comets. Based on our survey, organic molecules are depleted in the comets originated in Kuiper-belt.

研究分野：天文学

科研費の分科・細目：天文学、天文学

キーワード：彗星　微惑星　原始太陽系円盤

１．研究開始当初の背景

彗星は約 46 億年前の太陽系形成時に存在した物質を保持しており、太陽系が分子雲から形成された履歴を探るための重要なプローブの一つと考えられる。彗星氷の化学組成については、赤外線・電波領域における観測によって明らかにされてきた。特に、この 10 年間における近赤外線・高分散分光器の発達は非常に目覚しく、彗星に含まれる有機分子の探査が大きく進んだ。2001 年以降、大型望遠鏡(8~10m クラス)に装備された波長分解能 R~20 000 程度の高分散分光器を用いた観測的研究が進んでいる。

２．研究の目的

本研究の目的は、太陽系始原天体である彗星の化学組成を手掛かりとして我々の太陽系の形成初期の状態(温度　環境・物質循環)を探るとともに、彗星氷中に含まれる種々の有機分子のサーベイを行うことである。特に、これまでに十分な研究かが進んでいない木星族短周期彗星のサンプルを集中的に増加させ、その実態を明らかにすることが本研究の目的である。

３．研究の方法

本研究を進めるにあたり、これまで十分な観測的研究が進んでいない近赤外線波長域について、高分散分光観測を実施した。観測波長域は 2.8μm から 4.7μm であり、地球大気中の水蒸気などによる吸収を避けて観測を行う必要があるため、主に米国ハワイ州ハワイ島マウナケア山（標高 4200m）の山頂に設置された W.M.Keck 望遠鏡および近赤外線高分散分光器 NIRSPEC を利用した。波長分解能（λ／Δλ）は R=25000 であり、地球大気の吸収線と彗星起源の輝線を分離することができる。この波長域で観測可能な分子は、H_2O，CH_4，C_2H_2，C_2H_6，H_2CO，NH_3，CH_3OH，CO などである。これらの分子の組成比（対 H_2O）は、太陽系起源物質が原始太陽系円盤中での微惑星形成期までに化学進化した履歴をたどるために貴重な情報となる。

４．研究成果

本研究では主にカイパーベルトに起源を持つと考えられる彗星について、集中的に観測を行った。表１に本研究で行ったサーベイ結果および他の研究成果からの引用した結果をまとめて示した。この結果から、平均的にはオールト雲起源の彗星に比べてカイパーベルト起源の彗星はいくつかの分子種において欠乏傾向にあることが分かる。特に炭化水素分子関係は欠乏の度合いが大きい。

最近の太陽系形成初期の微惑星力学進化モデル（Grand-Tack モデル、Nice モデル）によれば、原始太陽系円盤中で形成された微惑星は、大惑星の形成および軌道進化に伴い、大きく散乱され、本来の形成領域が異なる微惑星が混合された可能性が指摘されている。その結果、太陽系の内側および外側で形成された微惑星であっても、最終的にカイパーベルトやオールト雲に到達した段階では、そもそもの形成領域がどこであったかという情報をどこまで保持しているか、明らかではなかった。今回のサーベイの結果から、オールト雲とカイパーベルトに力学的起源を持つ彗星については、そもそもの形成領域がある程度は重複するものの、平均的にはやはりカイパーベルト起源の彗星のほうが太陽系の内側（比較的暖かい領域）で形成されていた可能性を示唆している。

一方、こうした揮発性有機分子の欠乏は、彗星核が太陽のまわりを何度も周回することによって後天的に生じた特徴である可能性も否定できない。総じてカイパーベルト彗星には短周期なものが多く、太陽の周りを何度も周回しているため、太陽光加熱によって揮発性の高い分子が失われている可能性がある。こうした観点で重要になる彗星として 81P/Wild2 彗星がある。この彗星は観測された回帰の数回前の回帰において、木星との接近による大きく軌道をかえている（特に近日点距離が大きく変わって太陽に近づくようになった）。そのため、太陽による加熱の影響をあまり受けていない、比較的始原的性質を強く残した彗星であると考えられる。この彗星と他のカイパーベルト彗星との違いは、後天的なものである可能性がある。しかし、表１からは、平均的なカイパーベルト彗星の組成比と大きな違いはない。このことは、そもそもの起源においてカイパーベルト起源彗星とオールト雲起源彗星の違いが存在していたことを支持している。

本研究で得られた成果は、今後、原始太陽系円盤中での物質化学進化を探る上で重要な手かがりとなるとともに、微惑星軌道進化モデルの改良にも資するものである。

表１：カイパーベルト起源彗星の組成比

Comet	CH_3OH[b]	HCN	NH_3	H_2CO	C_2H_2	C_2H_6
2P/Encke[c]	3.5 ± 0.3	0.09±0.01		< 0.13	< 0.10	0.32±0.03
6P/d'Arrest[d]	2.8 ± 0.5	0.03±0.01	0.52±0.15	0.36±0.09	< 0.05	0.28±0.05
9P/Tempel 1[e]	1.3 ± 0.2	0.21±0.03		0.84±0.14	0.13±0.04	0.35±0.03
10P/Tempel 2[f]	1.6 ± 0.2	0.13±0.02	0.83±0.20	< 0.11	< 0.07	0.39±0.04
17P/Holmes[g]	4.1 ± 0.6	0.54±0.08	< 0.33		0.34±0.05	1.8 ± 0.3
21P/G-Z[h]	1.2 ± 0.1					0.14±0.02
73P/SW3-B[i]	0.54±0.11	0.28±0.03	< 0.16	0.14±0.02	0.03±0.01	0.18±0.02
73P/SW3-C[i]	0.49±0.06	0.22±0.02	< 0.29	0.11±0.02	< 0.03	0.11±0.01
103P/Hartley 2[j]	2.8 ± 0.3	0.25±0.03	0.80±0.13	0.20±0.04	0.11±0.01	0.71±0.07
81P/Wild 2[k]	0.9 ± 0.2	0.27±0.03	0.6 ± 0.3	0.22±0.08	0.15±0.05	0.45±0.05
JFC Average[l]	1.8 ± 0.4	0.18±0.04	0.50±0.12	0.27±0.10	0.08±0.02	0.35±0.06
OCC Average[m]	2.8 ± 0.2	0.24±0.03	0.6 ± 0.3	0.38±0.08	0.18±0.03	0.73±0.07

[a]Encke, d'Arrest, Tempel 2, Holmes, and Hartley 2 are optically characterized as carbon-chain typical, G-Z, SW3 and Wild 2 are characterized as carbon-chain depleted, and Tempel 1 appears to be on the borderline of typical and depleted (A'Hearn et al. 1995; Schleicher 2007; Fink 2009). Table entries in red and blue denote depleted or enhanced abundances respectively.
[b]Where necessary, values for CH_3OH are normalized to g-factors based on Villanueva et al. (2012).
[c]Averaging results from three nights in Radeva et al. (2013).
[d]Averaging results from two nights in Dello Russo et al. (2009).
[e]From post-impact observations on UT July 4, 2005 in Mumma et al. (2005).
[f]From observations on UT July 26, 2010 in Paganini et al. (2012).
[g]Averaging results from two nights in Dello Russo et al. (2008), NH_3 from Dello Russo et al. (2009).
[h]From observations on UT June 3, 2005 in DiSanti et al. (2013).
[i]Averaging results from two nights in Dello Russo et al. (2007).
[j]Averaging results from nine dates in Mumma et al. (2011), Dello Russo et al. (2011), and Kawakita et al. (2013).
[k]This work.
[l]Average of all Jupiter-family comets in this table except 17P/Holmes and counting only 73P/SW3 only once using values for fragment B.
[m]Average values measured at infrared wavelengths in long-period Oort cloud comets. CH_3OH (10 comets), HCN (14 comets), NH_3 (4 comets), H_2CO (10 comets), C_2H_2 (13 comets), C_2H_6 (15 comets). References: Brooke et al. 1996; Mumma et al. 1996; Magee-Sauer et al. 1999; Dello Russo et al. 2001; Mumma et al. 2001; Mumma et al. 2001b; Dello Russo et al. 2002; DiSanti et al. 2002; Magee-Sauer et al. 2002; Mumma et al. 2003; DiSanti et al. 2006; Bonev et al. 2008; Magee-Sauer et al. 2008; Bonev et al. 2009; Dello Russo et al. 2009b; DiSanti et al. 2009; Kobayashi and Kawakita 2009; Kobayashi et al. 2010; Radeva et al. 2010; Kawakita and Mumma 2011; Villanueva et al. 2011b; Gibb et al. 2012; Paganini et al. 2012b.

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１６件）

① Shinnaka, Yoshiharu; Kawakita, Hideyo; Kobayashi, Hitomi; Nagashima, Masayoshi; Boice, Daniel C., "14NH2/15NH2 Ratio in Comet C/2012 S1 (ISON) Observed during its Outburst in 2013 November"、Astrophysical Journal、査読有、782 巻、16、2014
DOI: 10.1088/2041-8205/782/2/L16

② Nagashima, M.; Arai, A.; Kajikawa, T.; Kawakita, H.; Kitao, E.; Arasaki, T.; Taguchi, G.; Ikeda, Y.、"The Transient Molecular Envelope in the Outflow of the Nova V2676 Oph during its Early Phase"、Astrophysical Jouanal Letters、査読有、780 巻、26、2014
DOI: 10.1088/2041-8205/780/2/L26

③ Shinnaka, Yoshiharu; Kawakita, Hideyo; Kobayashi, Hitomi; Naka, Chiharu; Arai, Akira; Arasaki, Takayuki; Kitao, Eiji; Taguchi, Gaku; Ikeda, Yuji、"Optical low-dispersion spectroscopic observations of Comet 103P/Hartley 2 at Koyama Astronomical Observatory during the EPOXI flyby"、Icarus、査読有、222 巻、734、2013
DOI: 10.1016/j.icarus.2012.08.001

④ Kawakita, Hideyo; Kobayashi, Hitomi; Dello Russo, Neil; Vervack, Ronald J.; Hashimoto, Mio; Weaver, Harold A.; Lisse, Carey M.; Cochran, Anita L.; Harris, Walter M.; Bockelée-Morvan, Dominique; and 3 coauthors、"Parent volatiles in Comet 103P/Hartley 2 observed by Keck II with NIRSPEC during the 2010 apparition"、Icarus、査読有、222 巻、723、2013
DOI: 10.1016/j.icarus.2012.08.006

⑤ Dello Russo, Neil; Vervack, Ronald J.; Weaver, Harold A.; Lisse, Carey M.; Kawakita, Hideyo; Kobayashi, Hitomi; Cochran, Anita L.; Harris, Walter M.; Bockelée-Morvan, Dominique; Biver, Nicolas; and 2 coauthors、"A high-resolution infrared spectral survey of 103P/Hartley 2 on the night of the EPOXI closest approach"、Icarus、査読有、222 巻、707、2013
DOI: 10.1016/j.icarus.2012.05.023

⑥ Ootsubo, T.; Kawakita, H.; Kobayashi, H.; Usui, F.; AKARI SOSOS Team、"AKARI Near-Infrared Spectroscopic Survey for Cometary Volatiles"、Publications of The Korean Astronomical Society、査読有、27 巻、161、2012
DOI: 10.5303/PKAS.2012.27.4.161A

⑦ A'Hearn, Michael F.; Feaga, Lori M.; Keller, H. Uwe; Kawakita, Hideyo; Hampton, Donald L.; Kissel, Jochen; Klaasen, Kenneth P.; McFadden, Lucy A.; Meech, Karen J.; Schultz, Peter H.; and 13 coauthors、"Cometary Volatiles and the Origin of Comets"、Astrophysical Journal、査読有、758 巻、29、2012
DOI: 10.1088/0004-637X/758/1/29

⑧ Ootsubo, Takafumi; Kawakita, Hideyo; Hamada, Saki; Kobayashi, Hitomi; Yamaguchi, Mitsuru; Usui, Fumihiko; Nakagawa, Takao; Ueno, Munetaka; Ishiguro, Masateru; Sekiguchi, Tomohiko; and 4 coauthors、"AKARI Near-infrared Spectroscopic Survey for CO2 in 18 Comets"、Astrophysical Journal、査読有、752、15、2012
DOI: 10.1088/0004-637X/752/1/15

⑨ Hashimoto, Mio; Kobayashi, Hitomi; Kawakita, Hideyo、"Near-Infrared High-Dispersion Spectroscopic Observations of Water in Comet 81P/Wild 2 with Subaru/IRCS"、Publications of the Astronomical Society of Japan、査読有、64、27、2012
DOI: 10.1093/pasj/64.2.27

⑩ Shinnaka, Yoshiharu; Kawakita, Hideyo; Kobayashi, Hitomi; Boice, Daniel C.; Martinez, Susan E.、"Ortho-to-para Abundance Ratio of Water Ion in Comet C/2001 Q4 (NEAT): Implication for Ortho-to-para Abundance Ratio of Water"、Astrophysical Journal、査読有、749 巻、101、2012
DOI: 10.1088/0004-637X/749/2/101

⑪ Dello Russo, N.; Vervack, R. J., Jr.; Lisse, C. M.; Weaver, H. A.; Kawakita, H.; Kobayashi, H.; Cochran, A. L.; Harris, W. M.; McKay, A. J.; Biver, N.; and 2 coauthors、"The Volatile Composition and Activity of Comet 103P/Hartley 2 During the EPOXI Closest Approach"、Astrophysical Journal、査読有、734 巻、8、2011
DOI: 10.1088/2041-8205/734/1/L8

⑫ Shinnaka, Yoshiharu; Kawakita, Hideyo; Kobayashi, Hitomi; Jehin, Emmanuël; Manfroid, Jean; Hutsemékers, Damien; Arpigny, Claude、"Ortho-to-para Abundance Ratio (OPR) of Ammonia in 15 Comets: OPRs of Ammonia Versus 14N/15N Ratios in CN"、Astrophysical Journal、査読有、729 巻、81、2011
DOI: 10.1088/0004-637X/729/2/81

⑬ Kawakita, Hideyo; Mumma, Michael J.、"Fluorescence Excitation Models of Ammonia and Amidogen Radical (NH2) in

Comets: Application to Comet C/2004 Q2 (Machholz)”、Astrophysical Journal、査読有、727 巻、91、2011
DOI: 10.1088/0004-637X/727/2/91

⑭ Kobayashi, Hitomi; Kawakita, Hideyo、”Water Production Rate of the Jupiter-Family Comet 46P/Wirtanen in the 2008 Apparition with the Subaru Telescope/IRCS”、Publications of the Astronomical Society of Japan、査読有、62 巻、1025-1033、2010
DOI: 10.1093/pasj/62.4.1025

⑮ Ootsubo, Takafumi; Usui, Fumihiko; Kawakita, Hideyo; Ishiguro, Masateru; Furusho, Reiko; Hasegawa, Sunao; Ueno, Munetaka; Watanabe, Jun-ichi; Sekiguchi, Tomohiko; Wada, Takehiko; and 6 coauthors、”Detection of Parent H20 and CO2 Molecules in the 2.5-5 μm Spectrum of Comet C/2007 N3 (Lulin) Observed with AKARI”、Astrophysical Journal Letters、査読有、717 巻、66、2010
DOI: 10.1088/2041-8205/717/1/L66

⑯ Shinnaka, Yoshiharu; Kawakita, Hideyo; Kobayashi, Hitomi; Kanda, Yu-Ichi、”Revisit to the Nuclear Spin Temperature of NH3 in Comet C/2001 Q4 (NEAT) Based on High-Dispersion Spectra of Cometary NH2”、Publications of the Astronomical Society of Japan、査読有、62 巻、263-271、2010
DOI: 10.1093/pasj/62.2.263

〔学会発表〕(計５件)

① Kawakita, Hideyo; Dello Russo, N.; Vervack, R. J. J.; Kobayashi, H.; DiSanti, M. A.; Opitom, C.; Jehin, E.; Weaver, H. A.、”Hyper-volatiles in Comet C/2010 G2 (Hill)”、米国天文学会惑星科学分科会、第 45 回、#413.27、Denver (USA)、6-11 Oct. 2013

② Kawakita, Hideyo; Dello Russo, N.; Vervack, R. J., Jr.; Kobayashi, H.; Weaver, H. A.; Harris, W. M.; Cochran, A.; Biver, N.; Bockelée-Morvan, D.; Crovisier, J.、”Outgassing Of Parent Molecules In Comet C/2010 G2 (Hill) During Its Outburst At Rh=2.5 AU”、米国天文学会惑星科学分科会、第 44 回、#314.17、Reno (USA)、14-19 Oct. 2012

③ Kawakita, H.; Kobayashi, H.; Dello Russo, N.; Vervack, R. J.; Weaver, H. A.; Lisse, C. M.; Cochran, A. L.; Harris, W. M.; Bockelee-Morvan, D.; Biver, N.; and 2 coauthors、”Spatial Distribution of Parent Volatiles in the Coma of Comet 103P/Hartley 2: Possible Segregation of Highly Volatile Ices”、Asteroids, Comets, Meteors 2012、#1667、id.6411、、新潟（ときメッセ)、16-20 May 2012

④ Kawakita, H.; Dello Russo, N.; Vervack, R. J., Jr.; Lisse, C. M.; Weaver, H. A.; Kobayashi, H.; Cochran, A. L.; Harris, W. M.; McKay, A. J.; Biver, N.; and 2 coauthors、”Parent Volatiles in Comet 103P/Hartley 2 Observed by Keck II with NIRSPEC during the 2010 Apparition”、EPSC-DPS Joint Meeting 2011、Nanto (France)、2-7 Oct. 2011
http://meetings.copernicus.org/epsc-dps2011

⑤ Kawakita, Hideyo; Kobayashi, H.、”Fluorescence Excitation Model of Ammonia in Low-Activity Comets”、米国天文学会惑星科学分科会、第 42 回、#28.10、Pasadena (USA)、3-8 Oct. 2010

６．研究組織

(1)研究代表者

河北　秀世（KAWAKITA, Hideyo）
京都産業大学・理学部・教授
研究者番号：70356129