

平成22年6月18日現在

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2007～2009

課題番号：19740106

研究課題名（和文） 酸素禁制線輝線比に基づく彗星コマ中の二酸化炭素量の推定

研究課題名（英文） Evaluation of cometary CO<sub>2</sub> based on forbidden oxygen lines ratio

研究代表者

古荘 玲子 (FURUSHO REIKO)

国立天文台・天文データセンター・研究員

研究者番号：70373040

研究成果の概要（和文）：太陽系の化石天体である彗星の揮発性成分の組成比は、原始太陽系円盤中の温度環境や物質輸送の情報を含み、現在の彗星活動の多様性を探る手がかりとなる。本研究は、彗星の揮発性成分のうち水に次いで主要な成分と考えられている一方で地上から直接観測がほぼ不可能な二酸化炭素について、可視領域のスペクトルに現れる酸素禁制線を基に二酸化炭素/水比を推定し、地上観測のアーカイブデータを再解析するなどして観測例を増やすことに成功した。

研究成果の概要（英文）：The composition ratio of the volatiles in comets, the relics of our solar system, is contains the temperature environment in the proto planetary disk of solar system and information on the matter transport, and becomes a clue that searches for the variation of present cometary activities. While carbon dioxide is thought as one of major element of the volatile of comet after water, it is difficult to observe it directly by ground-based observation. This study succeeded in expanding sample of carbon dioxide to water ratio based on oxygen forbidden lines that appeared in the spectrum of the visible region, by analyzing the archive data of the ground-based observation again.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,000,000	0	1,000,000
2008年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2009年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	3,200,000	660,000	3,860,000

研究分野：太陽系天文学

科研費の分科・細目：天文学・天文学

キーワード：彗星、二酸化炭素、可視高分散分光観測、地上観測

## 1. 研究開始当初の背景

原始太陽系円盤中で形成された氷微惑星の残存物である彗星の揮発性成分（氷）の組成比は、彗原始太陽系円盤中の温度環境や物質

輸送の情報を含んでいると期待される。また、現在の彗星活動の多様性も揮発性成分比に依存すると考えられる。

二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）は、彗星の揮発性成分の

うち、水 (H<sub>2</sub>O) に次いで主要な成分と考えられている。その一方で、地上からは大気中の CO<sub>2</sub> の吸収により直接の観測が困難である。そのため、これまでは天文観測衛星によるごく数例の観測例しかなかった。

しかし、我々は、地上観測で得られる可視領域の高分散スペクトルに現れる酸素禁制線から CO<sub>2</sub> 量を推定する手法を考案した (Furusho et al., 2006)。

彗星の高分散分光スペクトルにみられる酸素禁制線は準安定状態の酸素の発するもので、エネルギー状態の違いにより異なる波長 (可視波長域ではそれぞれ緑と赤) の線スペクトルを示す。この準安定状態酸素は、彗星コマ中の H<sub>2</sub>O や CO<sub>2</sub> 等の分子が太陽紫外線によって壊されること (光乖離) により生成する。これまでの研究では、準安定状態酸素のほとんどが水から生成されたと仮定して、水の生成量の見積が行われてきた。しかし、親分子が異なると、それぞれのエネルギー状態の準安定状態酸素がどのような割合で生成されるかも異なる。つまり、高分散分光データを用いて得られる酸素禁制線の輝線強度比から、準安定状態酸素の何割がどの分子から生成されたかを見積もることができるはずである。すなわち、本手法を用いれば、地上からは直接観測できない CO<sub>2</sub> の量を地上の可視高分散分光観測から推定することが可能である。

我々は、本手法を用いた先行研究として、太陽から 2.4AU(天文単位)という遠方で観測された 144P/Wild 4 の解析結果を報告していた (Furusho et al., 2006) が、多くの彗星は 1AU 付近まで太陽に近づいた時に観測されている。そこで、本研究では、彗星の形成領域や活動度との CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O 量比の関係を比較検討し統計的議論を行うために、サンプル数を増やすことと、そのために必要なモデル改良に取り組んだ。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、高分散分光データを基に彗星コマ中の CO<sub>2</sub> 量について推定する手法 (Furusho et al., 2006) を発展させ、サンプル数を増やすことである。

サンプル数を増やすことで、「オールト雲彗星 (原始太陽系星雲中の木星～海王星領域で形成されたと考えられている)」と「木星族彗星 (より低温領域であるカイパーベルトに起源をもつ)」との間での二酸化炭素量の差異や、太陽より遠方における彗星の活動度との相関を明らかにすることが可能になる。

## 3. 研究の方法

本研究の目的であるサンプル数を増やすため、以下の研究を行う。

(1) 過去に観測された彗星の可視高分散分

光スペクトルを、国立天文台の公開アーカイブ (SMOKA; Subaru-Mitaka-Okayama-Kiso Archive) システムから取得し、再解析する。

(2) モデルの改良と C<sub>2</sub> 分子輝線群による寄与を見積もるための計算コード開発を行う。本研究で扱う可視領域の酸素禁制線のうち、緑の波長域に見られる酸素禁制線の近傍には、通常 C<sub>2</sub> ラジカル分子の輝線が多数存在する。先行研究である Furusho et al., 2006 では、彗星(144P/Wild)が太陽から 2.4 AU という遠方にいるとき観測で C<sub>2</sub> がほとんど発光していなかったため問題とならなかった。しかしこの手法を他の彗星に適用するためには、酸素禁制線(緑)の C<sub>2</sub> 輝線からの分離や混入の見積は必須である。

## 4. 研究成果

(1) 国立天文台公開アーカイブ SMOKA から取得した、過去の可視高分散分光データについて再解析を行った。解析を行ったのは、すばる望遠鏡に取り付けられた高分散分光器(HDS)で観測された C/1999 S4 (LINEAR), C/2001 A2 (LINEAR), C/2001 Q4 (NEAT) の 3 彗星のデータである。

表 1 にこれらの再解析の結果と、比較のため 144P/Wild 4 についての解析結果 (先行研究) を併せて示す。

表 1 再解析結果

彗星名	日心距離 (AU)	地心距離 (AU)	N[CO <sub>2</sub> ]/N[H <sub>2</sub> O]
C/1999 S4	0.8	0.8	0.04
C/2001 A2	1.4	0.5	0.40
C/2001 Q4	0.97	0.6	0.15
144P/Wild 4	2.4	1.4	0.314

① 国立天文台公開アーカイブより取得したすばる望遠鏡/HDS で観測された 3 つの彗星は、いずれもオールト雲彗星である。

② これらのデータの再解析を行った結果、CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O 量比 (N[CO<sub>2</sub>]/N[H<sub>2</sub>O]) は 4% から 40% までの大きな幅がある事が判った。

③ CO<sub>2</sub> の方が水よりも昇華温度が低いため、大きな日心距離では CO<sub>2</sub> の割合が大きくなると考えられる。したがって、144P の結果が再解析した彗星のうち 2 彗星と比べて大きな CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O 量比であるのは自然である。

④ ③ にもかかわらず、C/2001 A2 は 144P より日心距離が小さいにもかかわらず、4 彗星の中で最も大きな CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O 量比を示した。一方で、C/2001 A2 はアウトバースト (一時的な光度上昇) を繰り返したことで知られている彗星であり、他の観測から揮発性の高い分子種の水に対する割合が多いことも報告されている。したがって、他の揮発性分子と同様に CO<sub>2</sub> も水に対する割合が多い結果は

自然である。さらに、CO<sub>2</sub>を含む揮発性物質が豊富であることがアウトバーストを繰り返すという彗星活動特性をもたらした可能性は高い。

⑤C/1999 S4 の解析結果は他の観測結果と整合的である。

以上の結果から、本手法を用いることで、地上観測で得られる高分散分光データからCO<sub>2</sub>の推定が可能であることを示した。

(2) (1) の過程において、対象彗星の地球に対する距離（地心距離）が近い時の酸素禁制線輝線比の見積もりについて、モデルの再検討を行った。

酸素禁制線輝線比を求めるということは、緑と赤それぞれの波長の禁制線の強度はそれらを生じる準安定状態酸素 O(<sup>1</sup>S)およびO(<sup>1</sup>D)の数密度を反映しているからである。つまり禁制線輝線比からCO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O量比を求める際には、O(<sup>1</sup>S)およびO(<sup>1</sup>D)の数密度の割合が彗星コマ中で一定であるという前提がある。しかし、彗星核近傍ではその前提が崩れる領域が生じる。図1に計算例を示し、以下にその原理を述べる。

準安定状態酸素が禁制線を生ずるのは、発光

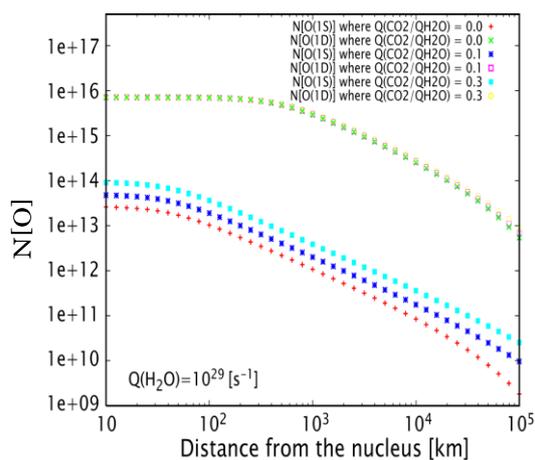


図1

でエネルギー準位の遷移がおこるためである。しかし、発光で遷移するより前に他の水分子などとの衝突をすることによっても、エネルギー準位の遷移は起こる。

準安定状態酸素がエネルギー準位の遷移で失われる割合（Loss Rate）を考える。衝突による遷移のLoss Rateは、準安定状態酸素および衝突する相手の分子（主に水分子）の空間数密度に依存する。準安定状態酸素の衝突によるLoss Rateは水に対するものが支配的であるので、簡単のため衝突遷移の相手としては水分子の場合を考える。水分子の空間数密度も準安定状態酸素の空間数密度も彗星核からの距離にしたがって同様に減少する。すなわち、水分子との衝突による準位の

遷移のLoss Rateは核からの距離に依存する。一方で、発光による遷移のLoss Rateは核からの距離によらず一定である。核からの距離が非常に近いところでは衝突遷移のLoss Rateが禁制線発光による遷移のLoss Rateを上回り、結果として準安定状態酸素の数密度が一定となるため禁制線の強度も一定となる（quenching領域）。しかし水分子の数密度は核から離れるにしたがって減少するから、ある地点で逆転が生じて禁制線発光のLoss Rateが衝突遷移のLoss Rateよりも大きくなる。よって禁制線発光強度は準安定状態酸素の空間数密度に依存するようになり、すなわち核からの距離によって発光強度も減少することとなる。衝突によるLoss Rateと発光によるLoss Rateの逆転がどこで起こるかは、彗星コマ中の水分子の数密度（水の生成率によって決まる）と、準安定状態酸素が禁制線発光の遷移で失われるまでの典型的時間（寿命）に依存する。

緑の禁制線を生ずる準安定状態酸素 O(<sup>1</sup>S)と赤の禁制線を生ずる準安定状態酸素 O(<sup>1</sup>D)の寿命は異なる。O(<sup>1</sup>D)の方が寿命は長いので、quenching領域もO(<sup>1</sup>D)の方が広がる。

したがって、核近傍では核からの距離によって分母となるO(<sup>1</sup>D)の数密度が一定なのに分子となるO(<sup>1</sup>S)の数密度が減少する（そのため輝線比も核からの距離によって減少する）という領域があらわれることになる。図1に示した計算結果例は1P/Halleyと同程度の水生成率の場合のものである。

彗星の地心距離が減少すると、観測時の視野に相当する彗星核からの距離が減少する。すなわち、彗星の地心距離が近い場合は上記効果を考慮したモデルを使用する必要がある。図2aには図1で示したO(<sup>1</sup>D)とO(<sup>1</sup>S)の数密度を基に酸素禁制線輝線比を求めた計算例と、C/2001 A2 (LINEAR)を例としてHDSのスペクトルを切り出す場所をスリットの空間方向で変えて測定した結果も併せて示した。また、図2bは水生成率が図2aの例より一桁少ない場合の結果である。これらの結果から明らかなように、地心距離が小さい場合には、禁制線輝線比から求めたCO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O量比は衝突遷移効果を考慮した場合よりも大きな数値を示すため、注意が必要である。一方でスリット方向の空間プロファイルを求めてパラメータフィッティングをすることもCO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O量比を推定することが可能である。しかしながら、すばる望遠鏡/HDSのような、大口径望遠鏡とエッセル分光器の組み合わせでは、視野が狭いため核から充分離れた領域までのプロファイルが得難いという問題点がある。一方、視野の広いシステムでは一般に分散が足りず緑の酸素禁制線をC<sub>2</sub>輝線群から分離することが困難である。これらの問題は今後のモデル改良における

課題として残された。

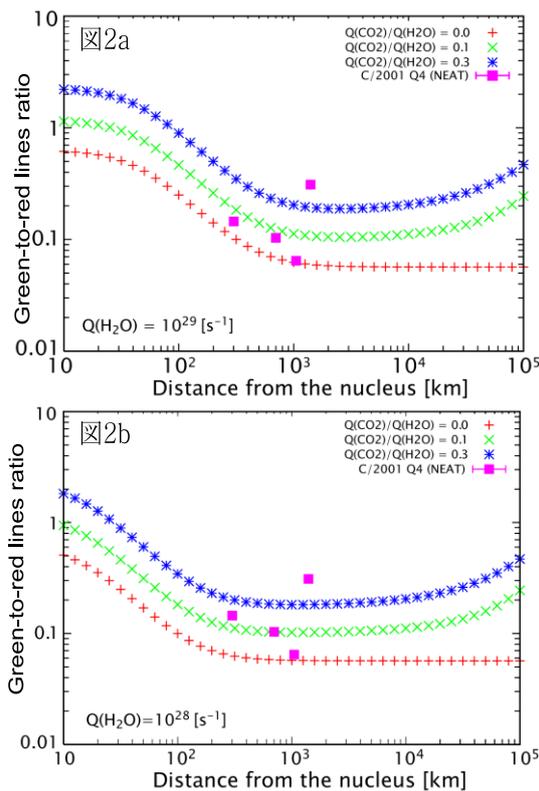


図2

(3)  $C_2$  分子輝線群による寄与を見積もるための計算コード開発に取り組んだ。しかしながら、研究計画時には想定していなかった(2)のモデル改良に先に着手したため、現在はコード開発の最終段階にあり、課題として残されている。なお、(4)の解析では、 $C_2$  輝線が弱かったため、最終的な算出結果において  $C_2$  輝線の混入は問題とならなかった。

(4) 2009年2月に県立ぐんま天文台の150cm望遠鏡と可視高分散エシエル分光器により観測された C/2007 N3 (Lulin) のデータを解析し、 $CO_2/H_2O$  比として約4%という結果を得た。

一方で、この彗星は、赤外線観測衛星「あかり」による  $CO_2$  の直接観測(近赤外波長領域)が行われ  $CO_2/H_2O$  比が約4%という数値が報告されている(Ootsubo et al., 2010)。この結果から、本研究の手法による推算結果は直接観測結果と非常に良く一致していることが示された。

以上の成果から、地上からの直接観測が原理的に不可能な  $CO_2$  量を、地上観測によって水に対する量比として推定可能であることを示した。

また、(1)の結果の通り、アーカイブデータを活用してサンプル数を増やすことに成功した。本研究の範囲内では、統計的議論をするまでの数は得られなかったものの、今後さらに新規での観測を実現し、かつ SMOKA 以外のアーカイブも検索対象に加えて過去のデータを探すことで、サンプル数を増やすことができれば、統計的議論を行うことが可能になる。

加えて、(4)の赤外線天文衛星「あかり」による近赤外観測との比較により、本手法の推算結果と直接観測の結果とがよい一致を示したことは、本モデルの確からしさを示す重要な結果である。

「あかり」衛星による近赤外観測終了後、当面は、直接観測が可能な観測衛星はハッブル宇宙望遠鏡のみという状況にある。したがって、地上観測によってサンプルを得られる本手法の重要性はより増している。

## 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)

[学会発表] (計3件)

- ①古荘 玲子、彗星の酸素禁制線強度比に基づく  $CO_2/H_2O$  比の推定(3)、日本天文学会、2009年9月14日、山口大学
- ②古荘 玲子、彗星の酸素禁制線強度比に基づく  $CO_2/H_2O$  比の推定(2)、日本天文学会、2007年9月27日、岐阜大学
- ③古荘 玲子、酸素禁制線輝線比に基づく彗星コマ中の二酸化炭素量の推定について、日本惑星科学会、2007年9月25日、高知大学

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

古荘 玲子 (FURUSHO REIKO)

国立天文台・天文データセンター・研究員

研究者番号：70373040

### (2) 研究分担者

該当なし

### (3) 連携研究者

該当なし