

## 彗星の核

渡部 潤一 < jun.watanabe@nao.ac.jp >

### (1) 彗星の構造

彗星の正体は宇宙空間を旅する巨大な雪の塊である。彗星の本体を「核」と呼んでいる。その成分は80%ほどが水( $\text{H}_2\text{O}$ )、残りの20%には二酸化炭素( $\text{CO}_2$ )、一酸化炭素( $\text{CO}$ )、それに微量成分として炭素、酸素、窒素に水素が化合した種々の分子が含まれ、これに砂粒のような塵(ダスト)が混ざっている。雪の少ないときにつくった「雪だるま」を想像していただく。ころがしているうちに地上の土や砂がついて黒く汚れてしまう。表面だけでなく、内部もそういった不純物が混じっていく。このような成分をもつ「汚れた雪だるま」、大きさは数kmから数十kmもある巨大な雪だるまが宇宙を飛んでいるのが彗星なのである。

この雪だるまが太陽に近づくと太陽から受ける熱でその表面は少しずつ融けていく。雪が融けると地上では液体になるが、宇宙の場合にはまわりが真空なので、すぐに気体となって蒸発してしまう。これが彗星から放出されるガスの正体である。このガスに引きずられるように、細かな塵も一緒に宇宙空間に吐き出される。

このように彗星から飛び出したガスの一部は、本体の核のまわりにぼやとした薄い大気をつくる。大気とはいっても、地球などとは違ってどんどん拡散して逃げ出していくものである。逃げていく分と、彗星核から供給される分でバランスする状態になった大気が、ぼやーとした丸い頭部として見える。これが、彗星の頭部の正体である。この大気を彗星の「コマ」と呼んでいる。主成分は電気を帯びていない中性の分子で、炭素原子がふたつくったものや、窒素と炭素がくっついたシアンガスが光を発している。

一方、ガスの中には電気を帯びてしまうものがある。化学の言葉では、分子などが電気を帯びたものをイオン、そうなることをイオン化するという。一旦、イオンになってしまうと、電気的な力が強く働く。太陽からは電気的な力を及ぼす風、いわゆる太陽風が流れている。この風が彗星のまわりのイオン化した分子をひきずっていく。太陽風の流れは早くて、毎秒数百キロメートルもあるので、彗星から出たイオンはどんどん吹き流され、太陽と反対側にすーっと伸びた細い尾をつくる。これが「イオンの尾(別名プラズマの尾)」である。光っているのは一酸化炭素や水の分子のイオンである。

こういったガスと共に、彗星を飛び出した塵がたくさんある。岩のような大きなものは(あれば)彗星本体の重力に逆らって飛び出すことはないが、小さな塵はガスと一緒に飛び出してくる。このような塵は、太陽の光の圧力(放射圧)を受けて、やはり反太陽方向へたなびく。比較的粒の小さなものはエンベロープと呼ばれる円錐形のコーン構造をつくり、大きなものは尾となる。これが「塵の尾(別名ダストの尾)」と呼ばれるものだ。ただ、いくら小さいとはいっても塵は固体だから、流されるスピードはイオンに比べてゆっくりである。そのために塵の尾は細くはならず、かなりの幅を持った尾を作る。彗星が昔から「ほうき星」と呼ばれるのは、明るい彗星で幅の広い塵の尾が発達して、あたかもほうきのように見えるからである。これらのそれぞれの構造については、今後に詳述する。

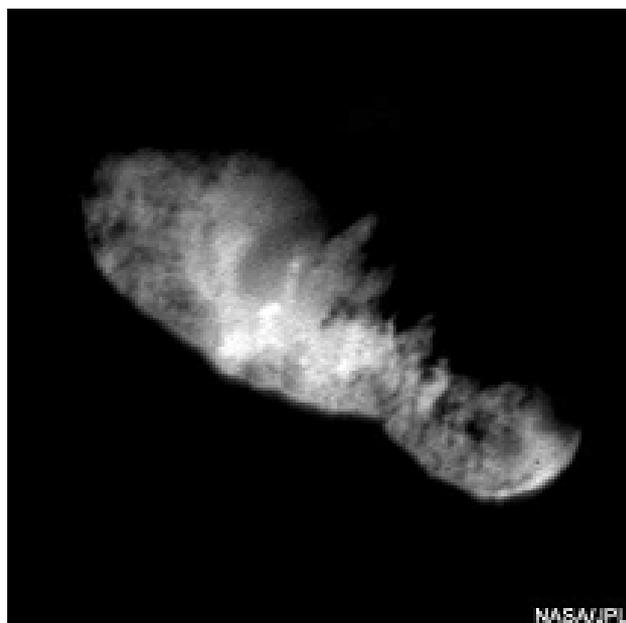
## (2) 彗星核の観測方法

彗星の核の直接的な観測はなかなか難しい。というのも、彗星から吐き出される塵やガスによってベールのように厚く覆われるために、核そのものを直接見ることができないからである。そのため、観測方法としては3パターンに分けることができる。太陽から遠方で、ガスやちりを吹いていない状態の核を観測する方法、地球に接近したときに観測する方法、それに探査機による接近観測である。最初の方法は、大口径の望遠鏡によって、主に短周期彗星について行われるようになってきた。が、エンケ彗星のように遠日点付近でも活動がある場合が多く、なかなか難しいことは変わらない。二番目の方法は、地球にいながらにして接近する探査機のような観測ができるので、可視光だけでなく、レーダーや赤外線といった各種の観測が行われることが多い。3番目の彗星核への探査機の接近観測は、これまで2例あり、1986年にハレー彗星について旧ソ連のベガ1、2号、ヨーロッパ連合のジオットが、また2001年にはボレリー彗星にアメリカのディープスペース1号が成功している。

## (3) 彗星核の大きさ

探査機の観測をのぞいて、彗星核の大きさの推定は難しい。かつては空間的に分解できないために種々の仮定をして推定していた。たとえば、遠方で彗星核の明るさが、核だけからの反射光であると仮定すると、反射率さえ仮定すれば大きさがわかる。彗星核の大きさは、天体の中では一般に小さく、数百mからせいぜい百kmまでの間と思われる。最近では、赤外線と可視光による観測によって、核の大きさと反射率とを同時に推定することが可能になってきた。詳しい説明は省くが、これまで比較的信頼のおける方法によって得られた彗星核の大きさの一覧を表1に示す。

探査機の接近観測は、核の周りを周回する軌道ではなく、フライバイと呼ばれる通過観測になるので、ごく短時間の間に、主に一方向から断片的な情報しか得られないものの、地上からは不可能な詳細な観測が可能である。ボレリー彗星の核については、形状がいびつであるほかに、表面に様々な地形があり、衝突によってできたクレーターらしきものや、ガスが吹き出す領域などが鮮明に捉えられている。



ディープスペース1号によって得られたボレリー彗星の核の画像。

表 1 : 彗星核の大きさと反射率(Campins &amp; Fernandez 2002 より)

彗星名	有効直径 (球を仮定、km)	反射率(%)
1P/Halley	5.2±0.1 (15.3×7.2×7.2)	4±1
2P/Encke	2.4±0.3	4.6±2.3
9P/Tempel 1	2.9±0.4	5 ±2
10P/Tempel 2	5.9+0.25 - 0.7	2.2+0.4 - 0.6
19P/Borrelly	2.5±0.1 (8.8×3.6)	2.2±0.3
22P/Kopff	1.5±0.2	5 ±1
28P/Neujmin 1	10.0±0.5	2.5±0.8
49P/Arend-Rigaux	5.1±0.25	2.8±0.5
55P/Tempel-Tuttle	1.8±0.4	6 ±1.5
107P/Wilson-Harrington	2.0±0.25	5 ±1
C/1983 H1 IRAS-Araki-Alcock	4.6±0.5	2 ±1
C/1995 01 Hale-Bopp	30 ±10	4 ±3
95P/Chiron	80 ±10	15 ±3

#### (4) 彗星核の反射率

赤外線と可視光の両方の波長を用いて、彗星核の大きさを推定すると、反射率も同時に求められる。その手法だけではないが、これまで反射率が求められた彗星核の値を、表1に示す。これでわかるように、彗星核の表面の反射率は一般に非常に低い。10%を超えるのは、エッジワース・カイパー・ベルトから内部へ軌道進化している途中と見られるキロンだけで、いわゆる彗星については2%から6%までの間である。これは、ほとんど真っ黒な塊と言ってよいほどの値である。どうして、氷の塊である彗星核の反射率が、これほど低いのだろうか。

彗星の核には、水や二酸化炭素といった揮発性成分の他に、塵や有機物がかなり含まれている。その割合は、個々の彗星でまちまちであるが、いずれにしろ、そういった揮発成分が先に蒸発していくと、核の表面に不揮発性物質が残されていくことは想像に難くない。有機物が塵とともに表面に残されて、それらが堅い殻(ダスト・マントルとも呼ぶ)を作っていると思われる。この殻の部分が厚くなると、その下層に熱が伝わっても、揮発成分が吹き出してくることができない。そのために、殻の弱い部分に集中して、吹き出してくる。これが核からのジェットとして観測される(詳しくは核近傍現象の章を参照のこと)。もうひとつ、殻を作るメカニズムとしては、宇宙線照射があげられる。有機物は、宇宙線を浴びると、赤く、そして暗くなるといわれている。この両者のメカニズムによって、彗星核の殻の部分は反射率が低く、しかも核表面の大部分を覆うようになるので、全体としての反射率が数%という値になっているとされている。

### (5) 彗星核の色

表面の色は、いろいろな指標で表すことができる。後述するように、天文学では一般にバンドごとの等級の差（ $B - V$ など）を用いて表すことが多いが、彗星の反射光は、特徴のないならかな分布をしていることが多いので、その傾きをとることがある。波長が100nmごとに反射率がどの程度変化するか、というもので反射率勾配（Reflectivity Gradient）と呼ぶ。ここではあえて数値は示さないが、これらを眺めると彗星核はほぼニュートラルから、やや赤い傾向がある。しかし、きわめて赤いというほどではない。彗星核そのものの中でも、個々の値はずいぶん違っている。また、彗星への道を辿っていると思われるケンタウルス族や、その故郷にいたエッジワース・カイパー・ベルトの天体の中には、彗星核よりも非常に赤い天体も存在している。これら非常に赤い物質がいったい何なのか、どうして彗星核では見つからないのか、大きな謎となっている。非常に赤い物質は、先にも触れたように宇宙線の照射による変成物質かもしれない。その物質が彗星への進化の途上、何らかの原因、おそらく彗星活動によって、表面が再び変質して、喪失してしまったとも考えられる。

### (6) 彗星核の構造と核近傍現象

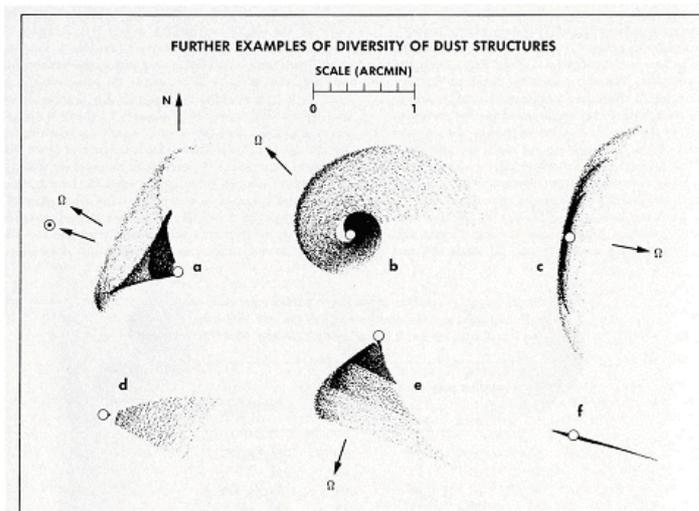
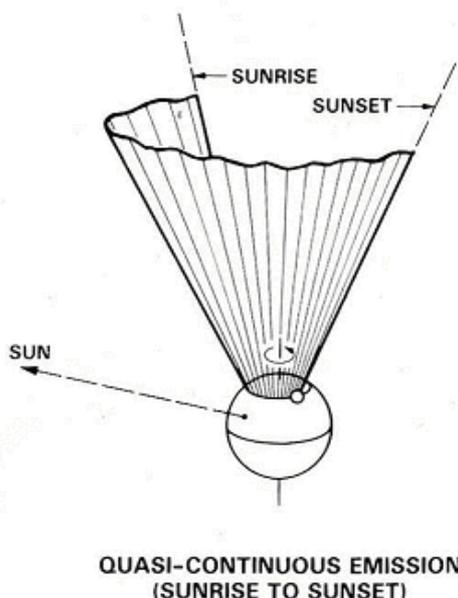
彗星核の構造、特に内部の構造はよくわかっていない。

その表面は不揮発性物質の殻（ダスト・マントル）に覆われていることはわかっている。彗星の表面の一部には、穴の空いた領域がある。ここが太陽に向くと、そこからジェットが吹き出す。そのため、こういったジェットの根本にある領域を活動領域と呼ぶ。この活動領域の存在は、古くから指摘されてきたが、探査機の接近観測でも、いくつかのジェットが確かに、そういった特定の領域から吹き出しているのが確認されている。活動領域が全表面に占める割合は彗星によって異なるが、一般的には数%から10%程度と、非常に少ない。このような活動領域が、核の表面のどこにあるか、どの程度の強さのジェットを吹くかによって、彗星軌道の非重力効果の効き方が異なってくる。

この活動領域を代表として、核表面の不均一性に由来するコマの内部を総称して「核近傍現象」と呼ぶ。これはコマの中でも内側の核に近い部分に見られる不均一性で、活動領域から吹き出した塵やガスのジェットが、まっすぐなジェットとして見えたり、時には円錐状に見えたり、あるいは扇型（ファン）構造、あるいは渦巻き（スパイラル構造）などに見えたりする。これだけのバラエティがあるのは、ジェットの時間変化が激しいことも一因である。活動領域は、太陽が当たらなくなるとジェットを吹かなくなり、自転によって再び朝を迎えると、ジェットを吹き始めるようになる。同じようなジェットでも、核の場所（特に自転を考えたときの緯度）によって、見え方は異なる。赤道付近のジェットは自転とともに渦巻き模様を描くし、高緯度のジェットは、自転速度が早い場合は円錐状となる。さらにヘール・ボップ彗星のように自転周期が非常に早く、激しいジェット源があるときには、幾重にも取り巻いた同心円状の構造を作る。こういった模様は、核の自転周期や自転軸の向きと視線方向の幾何学的関係などによって見え方が大きく変わってくる。核近傍現象の観測は、彗星核の様々な物理量を導く上で大変重要である。また、アマチュアにも可能な観測であり、むしろ時間変化を追うという意味では、アマチュアの方が（継続的な観測時間をとりにくいプロよりも）向いているテーマかもしれない。

こういった核近傍の観測から、表面の構造は推定できるものの、内部構造を知るのは困難である。後述するが、小惑星の中には軌道が彗星的なものがあり、その表面も反射率が低いために、彗星の核の残骸ではないかとされているものがある。そういった天体が存在するということは、彗星の内部に岩のように塊が含まれている可能性も無視できない。しかし、通常の彗星の観測から、そういった内部構造を探るのは難しい。

彗星核はもともと微惑星そのものか、あるいはその複合体と考えられ、構造的にはかなり弱いのではないかと考えられる。その証拠に、しばしば核の分裂が観測される。分裂には、いくつかのパターンがあり、核がまっぴたつに割れるものの、どちらも彗星核として生き残るものや、主核からぼろぼろ破片がはがれ落ちていくような分裂もある。後者の場合、破片のほとんどは短時間で消失するケースが多い。これまでの非重力効果などの研究から、彗星核の密度は相当に小さく、 $1 \text{ g/cm}^3$ にも達しないとされている。ハレー彗星の場合、密度の値は、 $0.55 \pm 0.25 \text{ g/cm}^3$ と推定されている。



活動領域から放出されたジェットが自転につれて描く円錐状の形状の様子（左）と、その活動領域の緯度と、視線方向がさまざまな場合に観測される模様が多様になる様子（右）。（Sekanina 1987）

### (7) 彗星核の自転

当然ながら彗星核は自転をしている。自転周期を知るには、彗星の核近傍現象を観測するか、なるべくコマのない時をねらって、測光観測を行う。前者では、たとえば周期的な現象（ジェットのスパイラル構造の時間変化など）が捉えられ、それが周期に対応するケースが多い。また、後者では球形の核でなければ、かならず明るさ変光するので、その周期は自転周期に一致する。これまで、これらの方法で自転周期が得られた彗星は10個あまりに上っている。短いものは6時間程度、長いものでは数日である。自転軸の方向は、前者のジェットの時間変化や形状の変化が

ら推定するのが普通である。

ところで、自転というのは形がいびつな場合、単純でないことがある。角運動量ベクトルが、もっとも安定な形状軸（慣性モーメントがもっとも大きくなる軸）に一致すると、周期が縮退して、一つの周期しか見えない。大部分の小惑星は、がんばって観測しても周期はひとつである。ところが、何らかの理由でその条件が満たされないことがある。彗星の場合はジェットを吹き出したりすることで、トルクがかかり、角運動量ベクトルが形状軸とずれることが予想される。こうなると、自転も複雑な運動となる。自由歳差運動とか、オイラー運動、あるいは非主軸自転運動などと呼んでいる。二つの周期が観測され、自由歳差運動が励起されているのが確かめられているのは、ハレー彗星（約2.2日と約7日周期）とシュワスマン・ワハマン第一彗星（14時間と32時間）である。このような場合も含めて、自転軸の方向はかなり時間変化すると考えられる。

さらに自転周期も変化する例も観測されている。1990年に現れたレビー彗星では、周期（光度変化の周期）は18.9時間から17.0時間へ変化した。これを活動領域と自転で考えるならば、核がスピンアップしたことになる。そのメカニズムとして、核からの放出が核に回転のトルクを与えたのではないかと、というジェットモデル（Shleicher et al. 1991）と、核自身が崩壊し、縮む事によって慣性能率が小さくなり、結果として角速度が上昇したというアイススケーターモデル（Watanabe 1992）が提案されている。

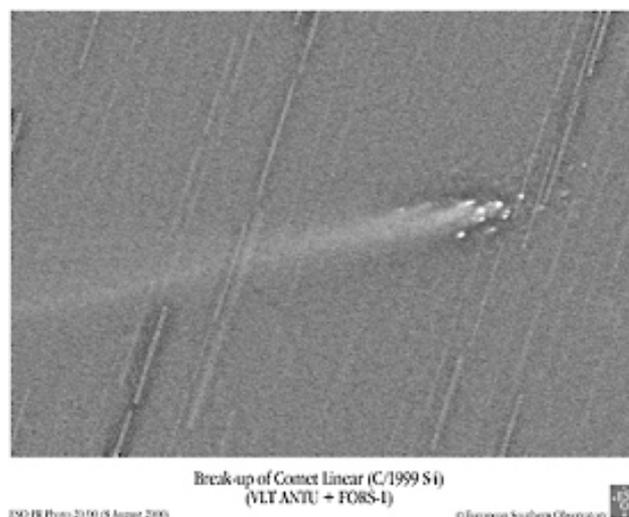
#### (8) 彗星核の運命

もともと彗星核は太陽に近づき、自らの成分を蒸発させることによって華麗な姿となっているので、短周期彗星の場合、いずれは蒸発し尽くすか、あるいは彗星の残骸が小惑星として残るか、どちらかであることは想像に難くない。

彗星の物理的な運命としては、(a) 完全に蒸発して何も残さない、(b) 何らかの残骸が残り、小惑星となってしまう、(c) 惑星など他の天体に衝突して消失する、(d) 惑星に接近して双曲線軌道に放出され、星間空間彗星になる、の4種類のパターンがある。

(a) は、もっとも考えやすい。短周期彗星は、毎回かなりのガスや塵を放出している。ドライアイスのように、最後には蒸発し尽くしてなくなってしまうことは容易に想像できる。なにしろ氷の塊だから、どんどん蒸発して短いものでは数千年、長いものでも数十万年程度で揮発性物質を失うはずである。この例としてはピエラ彗星がある。1772年に発見されたこの彗星は、それ以降4回ほど順調に帰ってきた。ところが、5回目の1845年には大小2つの核に分裂していた。そして6回目、1852年の回帰ではふたつの核は並んで帰ってきた。しかし、それがわれわれがピエラ彗星を見た最後となった。予定された7回目の出現にあたる1859年にはどちらも帰ってこなかった。そのために、この彗星は溶けて粉々になってしまったのではないかと考えられたのである。実際、それ以降、今日にいたるまでこの彗星は全く観測されていない。そして、それを裏付ける様な出来事が起こった。1872年11月27日、1時間に数千個という雨のような流れ星が地球に降り注いだ。アンドロメダ座流星群の大出現である。そして、この大出現は1885年、1892年にも引き続いて起こった。流れ星というのは彗星から放出された塵が、その軌道上にばらまかれ、地球がその軌道を横切るときに、それらの塵が地球大気に降

り注いで起きるものである。そして、このアンドロメダ座流星群の塵粒は、あの消えてしまったピエラ彗星の軌道に一致していた。この流星群が突然、こんなにたくさんの流れ星をふらせたことで、おそらくピエラ彗星が分裂後に完全にバラバラになって雲散霧消し、その亡骸である塵が一挙に地球に降り注いだ、と考えるとつじつまが合う。2000年のリニア彗星なども、核が崩壊した例としてあげられる。



ヨーロッパ南天天文台の8m望遠鏡VLTが捉えた崩壊直後のリニア彗星。

(b)の例は、地球に近づく小惑星の中に見られる。氷だけ蒸発して、その後に岩のようなものを残すのか、よくわかっていないが、最近の研究では、地球に近づく小惑星のうち、10%程度は彗星の亡骸である可能性が強いと言われている。実際、そういった彗星らしい軌道を持っている小惑星のうち、彗星の特徴である流星群を伴っているものさえある。小惑星として3200番の番号が与えられたフェートンが好例である。フェートンの軌道は、毎年12月中旬に出現するふたご座流星群の軌道にぴたりと一致する。小惑星フェートンの軌道周期はわずか1.6年である。これは短周期彗星でもっとも短い周期を持つエンケ彗星の半分ほどの周期である。したがって、いままで太陽に何度も回帰しているはずだ。その熱で氷の成分を蒸発し尽くしてしまった彗星の亡骸なのではないか、とも考えられる。一方、フェートンを詳しく観測しても、小惑星的という報告もあるので、決着が付いたわけではない。

(c)は分かりやすい。惑星に衝突してしまう実例は、1994年のシューメーカー・レビー第9彗星の木星への衝突である。木星では平均的に1000年に1度、このような衝突があるとされている。さらに、その間接的な証拠は、木星の化学成分にもあらわれている。木星は基本的には原始太陽系星雲からできたガス成分をそのまま保っているはずであるが、水素、ヘリウムなどに比べて、炭素、酸素、窒素などの量が4倍から7倍にも増えており、ガリレオ探査機の観測でもはっきりしている。これは今までにかなり多くの彗星が衝突したため、彗星特有のこういった重い元素が増えてしまっているからだ、といわれている。地球では、大型彗星の衝突の実例こそ経験がないものの、地球に存在する多くのクレーターのうち、巨大なものはかなりの確率で彗

星起源と考えられている。恐竜絶滅の原因となったメキシコのチクシュループクレーター、カナダのケベック州にある直径100 kmのマニコーガン・クレーターなどがその代表である。彗星の場合には、小惑星に比べると衝突頻度こそ少ないものの、衝突速度が一般に大きいために、エネルギー的に大きな衝撃となる。

(d)のように、永遠に太陽系から放り出されて、銀河の中をさまよう星間空間彗星になってしまう例は、実際1770年に発見されたレクセル彗星で起きている。彗星は、その発見直前の1767年に木星に近づいていたことが判明した。おそらく、この接近で軌道をかえられ、観測可能な短周期彗星になったのだろう。その後、この彗星は1779年7月に再び木星へ接近し、放物線軌道に近い軌道へと放り出されてしまったのである。双曲線になって星間空間彗星になってしまったかどうかは不明であるが、その可能性は十分にある。

(c)(d)はともかく、われわれは彗星を観測しているとき、あまりその運命を意識することはないが、いずれにしろ(a)(b)への道筋にあることは確かである。彗星核の分裂などを経て、消失していく彗星の例が増えているが、こういった観点から個々の彗星の観測結果を解釈し直してみるのもおもしろいかもしれない。

#### 【参考文献】

- Campins, H., Fernandez, Y., Earth, Moon, and Planets, v.89, Issue 1,  
p.117-134 (2002)
- Sekanina, Z., in Proc. Diversity and Similarity of Comets, ESA SP-278, 315-336(1987)
- Schleicher, D. G.; Millis, R. L.; Osip, D. J.; Birch, P. V., Icarus, vol. 94,  
p.511-523(1991)
- Watanabe, J., Publications of the Astronomical Society of Japan, vol. 44,  
p.163-166(1992)