

アモルファス氷の熱伝導率と彗星の熱史

香 内 晃

〈北海道大学低温科学研究所 〒060 北海道札幌市北区北19条西8丁目〉

彗星核は分子雲にあった氷星間塵が集ってできた天体であり、彗星の熱的進化を考える時、アモルファス氷の熱伝導率が重要な物理量となる。これまではアモルファス氷の熱伝導率の測定は行われてこなかったが、著者たちの測定によりこれまでの推定値より4桁程小さいことが明らかになった。この結果は、これまでの彗星の熱史に関する議論をすべて書き換えなければならないという重要な意味を持つ。

1. はじめに

彗星は分化してしまった惑星などと異なり太陽系の初期状態をかなりよく保存した始原的天体である。したがって、彗星の研究は彗星自体の起源のみならず、太陽系の起源と進化を明らかにする上で重要である。では、いったい彗星はどのぐらい始原的であるのだろうか？この問いに答えるためには彗星の熱史、すなわち1) 放射性元素の崩壊熱によって彗星内部がどのぐらい加熱されたか？ 2) 彗星が太陽に近づく過程で、内部がどのぐらい加熱されるか？を明らかにする必要がある。事実、これまでにこのような観点に立った研究が数多くおこなわれてきた¹⁾。

ところで、彗星核は分子雲に存在していたケイ酸塩鉱物を核とし、そのまわりにアモルファス氷のマントルをまとった $1\mu\text{m}$ 以下の微粒子がふり積ったばかりの新雪のようにふんわりと集って形成された天体である。したがって、彗星の熱史を研究する上で、アモルファス氷の熱伝導率は最も重要な物理量となる。しかし、これまでにアモルファス氷の熱伝導率の測定値は全くなく、Klingerによる経験的な推定値²⁾が広く用いられてき

た¹⁾。

最近、私達はアモルファス氷の熱伝導率の直接測定にはじめて成功し、これまでの推定値²⁾より4桁も小さいことを見出した³⁾。本稿ではこれらの結果を紹介するとともに、彗星の熱史研究上の意義を明らかにしたい。

2. 熱伝導率の測定法

一般の物質で熱伝導率を測定する時には、試料の一端をヒーターで加熱し、その時の試料の両端(場合によっては一端)の温度変化を熱電対などで測定すれば比較的簡単に熱伝導率が求められる(図1 a)。しかし、アモルファス氷の場合には以下のような理由で通常の測定法の適用は困難である：1) アモルファス氷は150 K以下の低温、真空中でしか作製できない、2) アモルファス氷は厚さが $1\mu\text{m}$ 以下の薄膜状であり、表面温度を通常の温度計(熱電対でもアモルファス氷薄膜の厚さよりはるかに大きい)で測定するのはほとんど不可能である(図1 b)、3) 氷の薄膜を真空中で均一に加熱する適当な熱源がない。このようなわけで、これまでにアモルファス氷の熱伝導率の測定はおこなわれなかった。

私達は以上の難点を次の方法で解決し、アモルファス氷の熱伝導率の測定にはじめて成功した

Akira Kouchi: Thermal Conductivity of Amorphous Ice and its Relevance to Comet Evolution

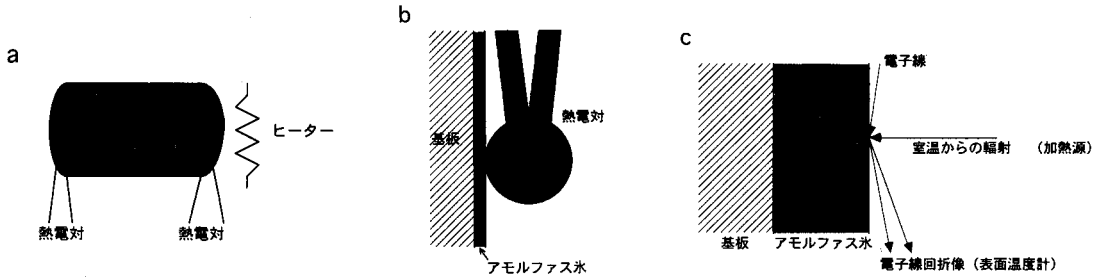


図1 熱伝導率の測定法
 a) 通常の測定法. b) アモルファス氷は薄膜状であり、表面温度を熱電対で測るのは困難である. c) 筆者たちの測定法. 室温からの輻射と水蒸気の凝縮熱でアモルファス氷薄膜の表面を加熱し、電子線回折像から表面温度を測定する。

(図1 c)³⁾. 1) 熱電対のかわりにアモルファス氷の結晶化を表面温度計として利用する. 通常、結晶化は140 Kでおこり、アモルファス氷表面の構造を反射電子回折法で非接触的に調べることでモニターが可能となる. 2) 加熱源としてはヒーターのかわりに、室温からの輻射と水蒸気がアモルファス氷として凝縮する時の凝縮熱を熱源とした。

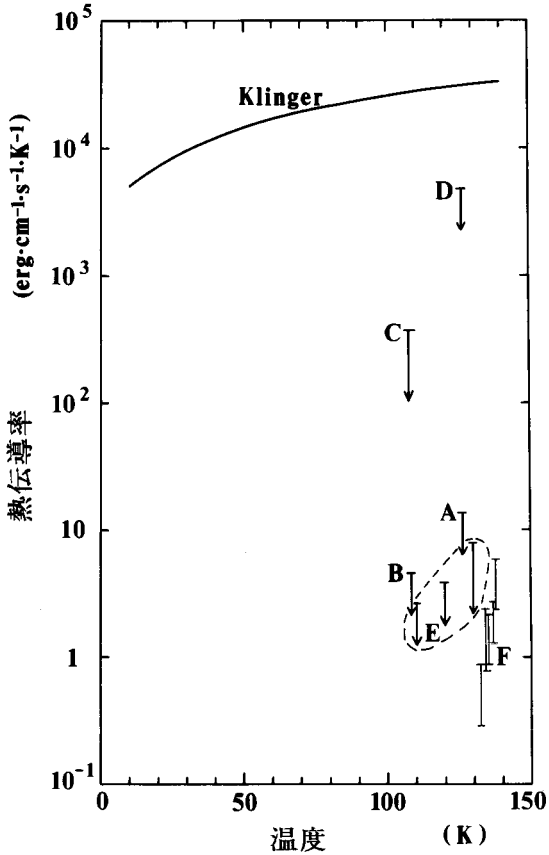
実際には、次のような方法で測定をおこなった。真空チェンバー中の金属基板をアモルファス氷ができるTs (140 K以下) に保持しておく。真空チェンバーに水蒸気を導入すると、金属基板上にアモルファス氷の薄膜が形成される。さらに水蒸気の導入を続けると、室温からの輻射と水蒸気の凝縮熱により、アモルファス氷表面の温度Thが徐々に上昇してくる。表面温度Thがアモルファス氷の結晶化温度140 Kを越えると表面で結晶化が始まる。表面で結晶化が起きたかどうかは反射電子線回折で常時モニターしているのでただちに検出できる。また、アモルファス氷薄膜の厚さはHe-Neレーザーを用いた干渉法で測定する。以上の方法でアモルファス氷薄膜の両面の温度、TsとTh=140 K、および薄膜の厚さが測定できたので、アモルファス氷薄膜の熱伝導率の測定が可能となったわけである。

3. アモルファス氷の熱伝導率

図2にアモルファス氷の熱伝導率を示す。私達の測定結果(F:青色)はこれまでのKlingerによる推定値²⁾より4桁程小さい。ある物性値が理論的あるいは経験的な推定値と4桁も異なるということは重大なことなので、結果は慎重に吟味されなければならない。

まず、過去に私達と似たような実験をおこなったデータがないかどうかを調べた。過去におこなわれた実験はいずれも熱伝導率の測定を意図したものではなかったが、使えそうなデータがいくつかあった。どの実験も金属板の上にアモルファス氷を作り、さらに水蒸気の導入を続けると結晶化が起るといふ、私達の観察と同じであった。しかし、結晶化が起った時のアモルファス氷の厚さを測定した例はなく、アモルファス氷と氷結晶をあわせた全体の厚さだけが測定されている。したがって、これらのデータからはアモルファス氷の熱伝導率の上限値のみが求められる(図2, A~E)。図2から明らかなようにKlingerの推定値と一致した例は全くなく、少なくとも最低1桁は小さいと言えるだろう(D)。さらに、ABEのデータは私達の測定値とほとんど同じであった³⁾。

さらに、私達の実験の追試がSackたちによっておこなわれている⁴⁾。彼らはアモルファス氷の

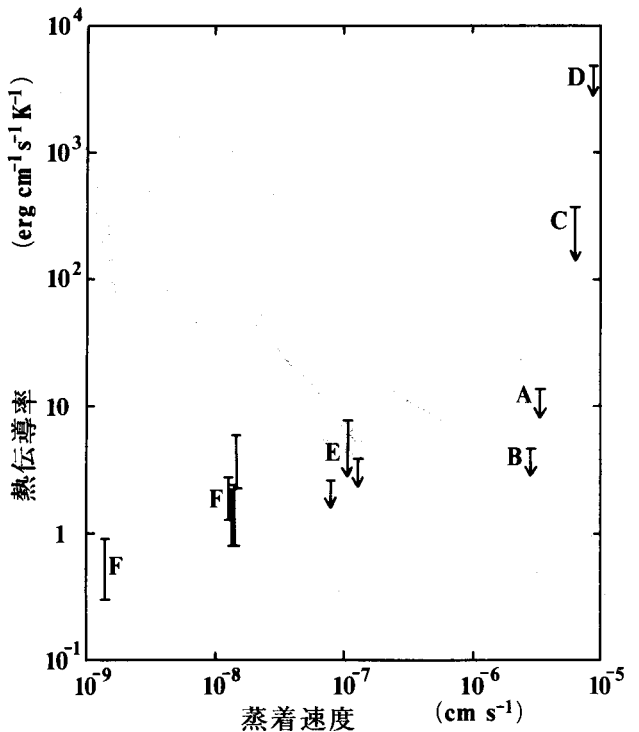


◀ 図2 アモルファス氷の熱伝導率
F (青色) が筆者たちの測定値。A~E は過去のデータをもとに筆者たちが推定した値で上限値のみを示している。実線は Klinger による経験的な推定値。

薄膜を作製し、次に私達と同じく室温からの輻射でアモルファス氷表面を加熱した。表面温度が上昇するとその温度にみあう水蒸気が水表面から蒸発してくるので、蒸発水蒸気量の測定によって表面温度がわかることになる。彼らはアモルファス氷の熱伝導率は $100 \text{ erg} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 以下であると報告しており、私達の結論を支持する結果となっている。

図2を見るとアモルファス氷の熱伝導率はかなりばらついているように見えるが、アモルファス氷の熱伝導率と蒸着速度（アモルファス氷を作った速度）の関係に直すと規則性がわかる(図3)。蒸着速度が小さい時は熱伝導率も非常に小さいが、蒸着速度が大きくなると熱伝導率が急激に大きくなるのがわかる。アモルファス・カーボンでは電気抵抗の蒸着速度依存性が調べられており⁵⁾、私達の

▼ 図3 アモルファス氷の熱伝導率の蒸着速度依存性



結果と同じ傾向を示している。これらのことから、分子雲のアモルファス氷は実験室よりもはるかにゆっくりと作られるので、熱伝導率もかなり小さくなるであろうと結論される。

4. アモルファス氷の構造

アモルファス氷の熱伝導率が非常に小さいということは、アモルファス氷の中に小さな穴(数~数100 Å程度)やクラックなどの欠陥がたくさん入っている可能性を示唆する。事実、アモルファス氷の表面積の測定からもこの種の欠陥の存在が支持される^{6),7)}。いっぽう、密度が $0.9 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ であることから、小さな穴が非常にたくさんあるとは考えにくい。したがって、アモルファス氷の熱伝導率が小さいことは、アモルファス氷中にクラックがネットワーク状に入っていると考えることで説明できる(図4 a)⁸⁾。青色の部分は水分子が密に詰まっているアモルファス氷であり、それらの間は何もない真空の部分である。

私達は、アモルファス氷の熱伝導率が非常に小さいことから、図4 aのような構造を考えた。いっぽう、アモルファス・カーボンやアモルファス・ゲルマニウムでは図4 aのようなクラックのネ

ットワークが電子顕微鏡を使って実際に観察されている^{5),9)}。クラックのネットワークは蒸着速度が小さい時に観察され、蒸着速度が大きくなるとなくなってしまふ。このことから、アモルファス氷でも蒸着速度が小さい時にはクラックのネットワークが形成され、蒸着速度が大きくなるとクラックがなくなると考えることができよう。図3の熱伝導率の蒸着速度依存性はこのような考え方で説明できる。

5. 彗星核の熱伝導率

5.1. 氷星間塵の熱伝導率

私達は純粋な H_2O だけからなるアモルファス氷の熱伝導率を測定した。次にアモルファス氷をマントル状にまとった氷星間塵の熱伝導率について考えてみよう。実際の氷星間塵は図4 bに示すように、中心にケイ酸塩鉱物の核があり、そのまわりを有機物のマントルが、さらに外側をアモルファス氷がとり囲んでいる¹⁰⁾。

まず、氷マントルの熱伝導率に影響を与える因子を考える。アモルファス氷は H_2O だけでなく CO , N_2 , CH_4 , CO_2 など入っている。これらの分子は図4 aに示したクラックのネットワーク中(すなわち、アモルファス H_2O の表面)に選択的に凝縮・吸着する。この効果はアモルファス氷の熱伝導率を大きくする方向に働く。いっぽう、分子雲の氷星間塵が原始太陽系星雲の彗星形成領域へもたらされると、 CO や N_2 などの蒸発しやすい分子が蒸発し、再びクラックのネットワークが発達する。こちらは熱伝導率を小さくする方向に働く。現在のところこれらの効果は定量的には評価されておらず、 H_2O 以外の分子を含んだアモルファス氷の熱伝導率は $1 \sim 10 \text{ erg} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 程度であると考えられる。

図4 bに示すコア-マントルグレインの熱伝導率は Haruyama たち¹¹⁾によって評価されており、アモルファス氷マントルとケイ酸塩鉱物コアの質量比に依存することが示されている。結局、コア

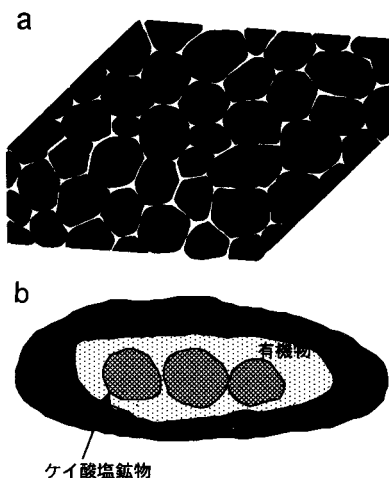


図4 アモルファス氷の欠陥構造(a)と氷星間塵(b)の四角で囲んだ部分を拡大したものが(a)に対応する。氷星間塵の長径は $1\mu\text{m}$ 程度。

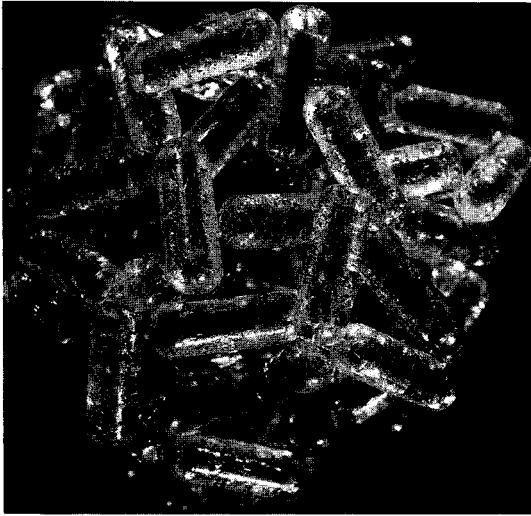


図5 彗星核のグリーンバーグモデル
 図4(b)に示した水星間塵がこのように集って彗星核を作っている。全体積の80%が空隙であり、密度は $0.2\sim 0.3\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ とかなり小さくなる。

マントルグレインの熱伝導率は、アモルファス氷マントルの2倍程度になり、桁で大きく変化することはない。したがって、以後の議論ではアモルファス氷の熱伝導率のみを考えることにする。

5.2. 彗星核の熱伝導率

図5のモデルに示すように、彗星核は水星間塵がすきまだらけに集った構造をしている¹⁰⁾。たとえば、ハレー彗星の密度の推定値から彗星核の空隙率(空隙の体積/核の全体積)を推定すると0.8程度になり、すきまの多い構造であることが納得できる。これだけすきまが多いと彗星核の熱伝導率は水星間塵の熱伝導率よりさらに小さくなる。熱伝導率がどれだけ小さくなるかは水星間塵どうしのくっつき方に大きく依存するので確定的なことは言えないが、 $1/10\sim 1/100$ になると考えられている¹²⁾。したがって、彗星核の熱伝導率は $0.1\sim 0.01\text{erg}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ と非常に小さな値となる。

この結果はこれまでにおこなわれてきた彗星の熱史の研究を根本から見直す必要があることを示

している。

6. 彗星の熱史

彗星核の熱伝導率がこれまで考えられてきた値より非常に小さいということは次のことを意味する。彗星核内部は外部からの熱源(太陽、他の恒星)によってはほとんど加熱されず、逆に、彗星核内部の熱源(放射性元素の崩壊熱)により内部が加熱される可能性がある。次に、それぞれの可能性を検討しよう。

6.1. 長周期彗星

アモルファス氷の熱伝導率として Klinger の値²⁾を採用するかぎり、彗星核内部は放射性元素の崩壊熱によって加熱されることはほとんどない¹⁾。しかし、私達の測定値を採ると長周期彗星内部の加熱が起る可能性がある。早速、この可能性が Haruyama たち¹¹⁾によって検討された。彼らはオ尔特雲での長周期彗星の熱史を調べ、次の極端な場合にわかれることを示した。1) 彗星核の大部分の領域でアモルファス氷が結晶化してしまう。2) 結晶化は彗星核の中心部でわずかに起るだけであり、大部分はアモルファス氷がそのまま生き残る。ここで重要なことは、彗星核内部の半分が結晶化し残りの半分がアモルファス氷のまま残るといった、中間の状態がないということである。

さらに、Haruyama たちは結晶化が起るかどうかを定める条件式を求めた。結晶化が起るかどうかは彗星核の半径、彗星核の熱伝導率(彗星核の熱伝導率が水星間塵の熱伝導率よりどのぐらい小さいかという問題：§5.2参照)に依存し、注目すべきは、彗星核を構成している水星間塵のアモルファス氷自体の熱伝導率には依存しないということである。これらの結果によると、半径が3km以上の彗星はオ尔特雲で結晶化してしまったことになる。いいかえると、半径が小さな彗星だけが彗星核が形成された時とほぼ同じ状態を保っている(始原的である)といえる。

彗星核のアモルファス氷が結晶化すると、アモルファス氷中に含まれていたCO, CO₂, CH₄, NH₃などの分子が完全に蒸発してしまう¹³⁾。いっぽう、結晶化が起らなければ、これらの分子は蒸発をある程度免れ、彗星形成時の情報のある程度保持していることになる。このことは、ハレー彗星探査の際に得られたガスの分子組成は、彗星核を構成している氷星間塵の氷マンツルの組成を反映したものではない可能性がかなり大きいといえる。

6.2. 短周期彗星

これまでの短周期彗星の熱史の研究では、初期条件として彗星核がアモルファス氷からできていると仮定してきた。しかし、すでに示したようにオールド雲で結晶化が完全に起ってしまう場合と、結晶化がほとんど起らずアモルファス氷がそのまま残る場合があることがわかった¹¹⁾。したがって、短周期彗星の熱史の研究では初期条件として2つの極端な場合を考慮する必要がある。

後者の場合でも、アモルファス氷の熱伝導率がこれまでの推定値より4桁も小さいことがわかったので、これまでの研究結果を再検討する必要がある。私達は予備的にではあるが、彗星核内部での熱伝導のメカニズムを検討し³⁾、短周期彗星の内部は太陽熱による加熱をほとんど受けないことを示した⁸⁾。たとえば、1 AU に彗星核を100~1000年おいても、表面から数10 cm~1 mが加熱されるだけで内部はまったく加熱を受けないことが示された。短周期彗星の熱史については今後更なる検討が必要である。

7. おわりに

彗星の熱史を議論する上で今のところ不明確な点は彗星核の空隙による熱伝導率の低下率、低温(70~100 K)下でのアモルファス氷の結晶化の時間定数などである。探査および室内実験による解明が待たれるところである。さらに、²⁶Alが彗星に取り込まれたかどうかとも重要な問題である。もし、²⁶Alがわずかでも取り込まれたとすると、更に彗星の熱史の改訂が必要となる。²⁶Alの含有量の推定には彗星のコマサンプルリターンが鍵になるだろう。

参考文献

- 1) Rickman, H. 1991, in *Comets in the Post-Halley Era* Vol.2, ed. Newburn, R. L. et al., (Kluwer Acad. Pub.), 733.
- 2) Klinger, J. 1980, *Science*, **209**, 271.
- 3) Kouchi, A. et al. 1992, *Astrophys. J.*, **388**, L73.
- 4) Sack, N. J. & Baragiola, R. A. 1992, *Abst. of 24th DPS Meeting*, 1019.
- 5) Jensen, C. L. & Hoffman, R. A. 1991, *J. Vac. Sci. Technol.*, **A9**, 116.
- 6) Mayer, E. & Pletzer, R. 1986, *Nature*, **319**, 298.
- 7) Schmitt, B. et al. 1987, *J. Phys. (Paris)*, **48**, C1-519.
- 8) Kouchi, A. et al. 1992, in *Physics and Chemistry of Ice*, ed. Maeno, N. & Hondoh, T. (Hokkaido Univ. Press), 229.
- 9) Donovan, T. M. & Heinemann, K. 1971, *Phys. Rev. Lett.*, **27**, 1794.
- 10) Greenberg, J. M. & Hage, J. I. 1990, *Astrophys. J.*, **361**, 260.
- 11) Haruyama, J. et al. 1993, *J. Geophys. Res.*, **98**, E8, 15079.
- 12) Greenberg, J. M. et al. 1989, *J. Ann. Phys. Fr.*, **14**, 103.
- 13) Kouchi, A. 1990, *J. Cryst. Growth*, **99**, 1220.