解説

アモルファス氷星間塵の起源と進化¹⁾

香内 晃²⁾

要 旨

宇宙空間にはアモルファス氷が大量に存在し、太陽系の起源と深くかかわっている。アモルファス氷の構造と性質および生成条件を紹介するとともに、惑星科学上の意義を解説する。

キーワード：アモルファス氷、彗星、氷星間塵、分子雲、原始太陽星雲

Key words: amorphous ice, comet, interstellar icy grain, molecular cloud, protosolar nebula

1. はじめに

通常の氷とは異なり、結晶構造を持たない固体の H_2O 、すなわちアモルファス氷が、水蒸気を150K (−123°C) 以下の金属板上に凝結させることによって生成されることは1930年代から知られていた。しかし、できる試料の量が限られていたので、その性質についてはほとんどわかっていなかった。わずかに、X線・電子線回析、比熱の測定、赤外線吸収スペクトルの測定などの研究が細々と行われてきたにすぎなかった (Sceats and Rice, 1982)。

1980年代に入ってから、アモルファス氷の種々の作製法——液体急冷法、高圧法、放射線損傷法——が開発され、新たな研究の展開が開始された (香内・黒田, 1991)。また、天文学、惑星科学においても、氷星間塵の起源と進化および氷惑星・氷衛星・彗星など太陽系内の氷天体の起源と進化における重要性が認識されるようになって、アモルファス氷の研究は大きく進展しつつある (香内, 1991)。

本稿では、アモルファス氷の構造と特徴から始め、生成条件、さらに、宇宙空間のどこにアモルファス氷が存在するかを簡単に紹介する。これらをもとに、アモルファス氷の惑星科学上の重要性を明らかにしたい。

2. アモルファス氷の構造と物性

2.1 アモルファス氷とは？

アモルファス (非晶質, amorphous state) とは、原子または分子の配列に結晶のような規則性をもたず、液体の流動性も示さない固体状態のことである。したがって、アモルファス氷は、水分子の配列に氷結晶のような規則性をもたない固体状態の水 (H_2O) であると、定義できる。通常、アモルファス物質を呼ぶ時は、アモルファス・シリコンのように、アモルファスの後に元素名または組成式を書くことが多い。この例にならうと、アモルファス水 (amorphous water, amorphous solid water) またはアモルファス H_2O (amorphous H_2O , 略して a- H_2O) と呼ぶべきであるが、慣用的にアモルファス氷 (amorphous ice) が多用されているので、ここでもこれに従う。

ガラス質氷 (vitreous ice, glassy ice) という用語も広義にはアモルファス氷と同様な意味で使われることもある。しかし、ガラス質氷は、狭義には、液体の水を急冷して、過冷却状態、ガラス転移点を経てつくられた固体状態の水のことであり、アモルファス氷のうちの一部を示す術語であるので、両者を同義に用いるのは避けるべきである。液体急冷法によるアモルファス氷、すなわちガラス質氷の作製法が開発される前は、アモルファス氷の作製法としては水蒸気の凝結法しか知られていなかった。アモルファス氷と広義のガラス質氷を混用しても問題とはならなかった。しかし、現在ではガラス質氷の性質は水蒸気の凝結法で作ったアモルファス氷の性質とかなり違うことが明らかになっており、その意味でも両者を区別して用いることが重要である。なお、本

1) Origin and evolution of interstellar amorphous icy grain

2) 北海道大学低温科学研究所

〒060 札幌市北区北19条西8丁目

(Akira KOUCHI, Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University, Sapporo 060, Japan)

稿では水蒸気の凝結法で作ったアモルファス氷のみを話題として取り上げるので、アモルファス氷という用語を使用する。

2.2 アモルファス氷の構造

アモルファス氷の構造を氷 I 結晶 (氷 Ih, 氷 Ic) の構造と比較しながら見てみる。いうまでもなく、氷 Ih はふつうの条件でつくられる六方晶系の氷結晶であり、通常の圧力下では唯一の安定相である。また、水蒸気を低温 (約200K 以下) の基板上に凝結させた時などのできる立方晶系 (酸素原子の配列はダイヤモンドと同じ構造) の氷結晶、すなわち氷 Ic は準安定相である。氷結晶では、ある酸素原子近傍の原子配列に着目した時、原子は規則正しく秩序的に配列している (短距離秩序)。また、遠く離れたところの原子も規則的である (長距離秩序)。

いっぽう、アモルファス氷は非結晶状態にあるので、分子配列は乱れているが、完全にランダムではない。氷 Ih と同様に、ある着目した酸素原子のまわりの酸素原子はほぼ規則的に配列している (短距離秩序はある)。しかし、着目した酸素原子から10Å 程度離れると、着目した酸素原子に対する配列はランダムである (長距離秩序がない)。

Narten et al. (1976) は77K で作ったアモルファス氷の X 線構造解析を行い、酸素原子の分布に関する情報を得た。それによると、第1, 第2 近接原子までの距離は、それぞれ2.76Å, 4.5Å であり、氷 Ih とまったく同じであるが、第2 ピークはかなりブロードであった。また、第1 と第2 ピークの分離も不完全で、第2 と第3 ピーク以降はかなり重なりあっていた。さらに、X 線回折データから求めた密度は0.94g/cm³で、77K における氷 Ih の密度0.93g/cm³とほぼ同じであった。

2.3 マクロな欠陥

アモルファス氷への N₂ や Ar などの吸着量の測定から、比表面積および空隙の体積を求めることができる。さらに、それらを詳細に解析することによって、アモルファス氷中には直径10~数百 Å の大きさの穴がかなり多く含まれることが明らかになった (Mayer and Pletzer, 1986; Schmitt et al., 1987)。また、Zhang and Buch (1990) による分子動力学法によるアモルファス氷の生成過程の研究でも、図1のAの部分のようなすきま (欠陥) が導入されることが示された。これらの欠陥はマイクロポアと呼ばれ、他の分子、たとえば CO や CO₂ が大量にトラップされ、彗星からの蒸発ガスを議論する際に重要となる。

筆者たちはアモルファス氷の熱伝導率の測定から、ア

図1 分子動力学法によるアモルファス氷
大小の球は酸素原子, 水素原子に対応する。
(Zhang and Buch, 1990)

図2 アモルファス氷の欠陥構造
島状の部分は水分子が密につまっている部分であり、それらの間のクラック状の部分は何もない真空の部分である。立方体の一辺の長さは0.1~10μm のオーダー。(Kouchi et al., 1992b)

モルファス氷中には図2のようなクラックが多く入っていると考えている (Kouchi et al., 1992b)。このような巨視的なクラックはアモルファス Ge, アモルファス C などの薄膜についても、透過電子顕微鏡観察によりその存在が確認されている。

2.4 アモルファス氷の物性

アモルファス氷の物性はほとんど測定が行われておらず、筆者たちのグループによって、蒸気圧 (Kouchi, 1987), 熱伝導率 (Kouchi et al., 1992b) が測定され、

また、自己拡散係数 (Kouchi et al., 1994) が推定されているだけである。

宇宙空間におけるアモルファス氷の凝縮や蒸発、あるいは彗星からの蒸発ガスを議論する時には、アモルファス氷の飽和蒸気圧が必要となる。筆者は、アモルファス氷の蒸気圧は氷 Ic の蒸気圧より 1～2 桁大きいことを示した。さらに、蒸気圧はアモルファス氷の生成条件、とくに、生成時の凝縮温度、凝縮速度に大きく依存することを示した (図3)。この結果により、アモルファス氷からできていると思われる新彗星からの蒸発 H_2O の量をよく説明できるようになった (香内, 1988)。

アモルファス氷の熱伝導率は後述するように彗星核の熱的な履歴 (熱史) を明らかにする上で重要な量であるが、これまで測定例はまったくなかった。筆者たちは、アモルファス氷の熱伝導率の測定に成功し、これまで考えられてきたアモルファス氷の熱伝導率の推定値より 1～4 桁ほど小さいことを示した (Kouchi et al., 1992a, b; 香内, 1994) (図4)。さらに、熱伝導率は生成時の凝

図3 アモルファス氷の蒸気圧
a- H_2O で示す曲線群がアモルファス氷の測定値生成時の凝縮温度 (T_c) や凝縮速度 (R) によってアモルファス氷の蒸気圧が大きく変化する。 (Kouchi, 1987) 記号○は Bryson et al. (1974) による氷 Ic の蒸気圧。

図4 アモルファス氷の熱伝導率
f が筆者たちの測定値で、a～e は文献データにもとづく推定値で上限値のみを示している。実線は Klinger による経験式。 (Kouchi et al., 1992a)

縮速度に大きく依存し、凝縮速度が小さいほど小さな値となる。このような小さな値は、図2に示したようなアモルファス氷中のマクロな欠陥によると考えられる。

筆者たちは、アモルファス氷の自己拡散係数を、アモルファス氷の結晶化の速度論的解析から推定し、氷 Ih の自己拡散係数より 1～2 桁大きくなることを示した (図5)。さらに、アモルファス氷表面上の水分子の拡散係数の推定も試みている。

3. アモルファス氷の生成条件

アモルファス氷がどのような条件で生成されるかを明らかにすることは、実験室でアモルファス氷を作る時に役立つばかりでなく、宇宙空間での氷の凝縮を議論する時にも重要である。Blackman and Lisgarten (1957) はこれまで行われてきたいくつかの実験を、温度にのみ着目して整理し、アモルファス氷の生成される条件 (温度) を議論した。その後も、高名な研究者が無批判に

図5 H₂Oの自己拡散係数

a, 液体の水; b, 氷 Ih; c, アモルファス氷; d, 氷 Ih (0001) (結晶の主軸に垂直な結晶面) 上の水分子の表面拡散係数; e, 多結晶氷 Ic 上の水分子の表面拡散係数. アモルファス氷表面上の水分子の表面係数は図のドットを打った領域にあると考えられる. (Kouchi et al., 1994)

次々と同様の整理を行い, Hobbs (1974) もそれに従った. ここにいたって, “アモルファス氷は, 凝結時の基板の温度が低ければ生成される” という誤った考えが通説となってしまった. ちなみにアモルファス Si や Ge の場合, 生成条件は1960年代にすでに実験的に明らかになっており (たとえば, Krikorian and Sneed, 1960), “アモルファス半導体をつくるためには基板温度が低く, かつ, 凝縮速度が臨界値より大きくなければならない” というのは経験的な常識であった.

筆者たちは, アモルファス氷の生成条件を理論的に検討し, かつ, それを実験的に検証することで, 誤った通説を打破できると考えた. 詳細は省略するが, 結論として, “アモルファス氷を作るためには基板温度 T_c が低く, かつ, 凝縮速度が臨界値より大きくなければならない” という常識的な答えを理論的に得るとともに, 実験

的に確認した (Kouchi et al., 1994). 図6は, 氷単結晶表面上に水蒸気を凝結させた時に, 温度 T_c と水蒸気のフラックス F (凝縮速度) によりどんな構造の水が形成されるかを示したものである. ここに, 縦軸の F は単位時間, 単位面積あたりに入射する水分子の個数をあらわす. また, 横軸は絶対温度の逆数をとっているので, 右側ほど温度が低くなる. アモルファス氷の生成条件を満足するのは図の斜線の領域である. 後で議論するが, この図を用いてはじめて, 宇宙空間で凝縮する氷の構造の推定が可能となった.

4. 宇宙のアモルファス氷

4.1 氷星間塵の一生

氷は地球上だけでなく, 宇宙空間にも大量に存在する. 太陽系では外惑星の衛星やリング, それに彗星などで氷の存在が確認されている. 太陽系以外にも, 質量放出星周辺星雲や暗黒星雲に氷の微粒子 (氷星間塵) が存在することが明らかになった (Klinger et al., 1985).

図6 アモルファス氷の生成条件

氷 Ih の (0001) 上に水蒸気を凝結させた時にできる氷の構造. アモルファス氷は水分子のフラックスが F_c より大きく, かつ, 基板温度が T_c より低い時に形成される. (Kouchi et al., 1993)

以下、この氷微粒子の挙動を図7にそって説明する。

大量のガスを放出している質量放出星（たとえばM型巨星（giant star））の周辺星雲（circumstellar envelope）では、そのガスの冷却に伴い固体微粒子が形成される。最初に約1000Kでケイ酸塩鉱物（silicate）が凝縮し、さらにガスの冷却が進むと100K前後で氷結晶が鉱物の微粒子上に凝縮する（この時に、図6から氷結晶が凝縮することがわかる）。やがて、この微粒子は星間空間へ広がり、恒星からの強い紫外線（UV）のため氷は分解し、鉱物の微粒子だけが残される。

星間ガスが収縮し、比較的密度の高い分子雲（molecular cloud）が形成されると、鉱物の微粒子上にアモルファスの氷が凝縮する（図6参照）。分子雲の温度は10Kと低いためH₂とHe以外のすべての分子が凝縮する。さらに紫外線照射により複雑な光化学反応が進行し、氷の中で有機物（organic matter）が形成される（香内, 1993）。このような鉱物・有機物・氷からなる微粒子が私達の太陽系を作るもとになった物質である。

宇宙空間を漂っていた分子雲は、やがて収縮し、円盤状の原始太陽系星雲（protosolar nebula）が誕生した。そして、星雲の中心部では原始太陽（protosun）が輝きはじめる。この時、太陽に近い領域では、微粒子はすべ

て蒸発して、宇宙組成のガスになった。木星（Jupiter）や土星付近では、氷だけが蒸発し、鉱物の微粒子は部分的に蒸発したか、あるいはほとんど変化を受けずに生き残ったと考えられる。その後、太陽系星雲ガスが冷えていく過程で、固体微粒子が再凝縮する。地球軌道付近ではケイ酸塩鉱物が凝縮し、木星や土星領域では、蒸発をまぬがれたケイ酸塩鉱物上に氷結晶が凝縮する。いっぽう、太陽から十分に遠いところでは、分子雲の固体微粒子がそのまま生き残った。しかし、原始太陽系星雲は20～40Kと分子雲に比べて少し温度が高いので、O₂やN₂といった分子はこの段階で蒸発してしまう。

微粒子はやがて星雲の中心に向かって沈殿し、さらに、重力不安定により無数の直径数km～10km程度の微惑星（planetesimal）に分裂する。その後、微惑星は衝突と合体をくり返し、惑星にまで成長する。この時、惑星に合体せずに取り残された氷微粒子を多く含んだ微惑星が彗星核（comet nucleus）となった（山本, 1989）。

ここに示したように、氷星間塵は一連の進化過程で、凝縮・紫外線照射・蒸発などを経験している。筆者たちは、これらの諸過程のシミュレーション実験をおこなっているが、すでに他誌で解説したので（香内・黒田, 1991; 香内, 1991）、本稿では、分子雲中および原始太陽

図7 氷星間塵の一生

系星雲でのアモルファス氷星間塵の進化について述べる。

4.2 分子雲の中で

星間空間を漂っていたガス（原子）や質量放出星で作られた鉱物微粒子はやがて暗黒星雲へと集まる（可視光で観測すると何も見えないので暗黒星雲と呼ばれる。いっぽう、電波では分子の存在がわかるため分子雲と呼ばれる。オリオン座の馬頭星雲が一例）。暗黒星雲は星間空間（interstellar space）に比べて密度が大きいため、星からの紫外線が入ってこない。従って、星間空間では原子であった H, C, O, N などは H_2 , NH_3 , CO, O_2 , N_2 などの分子となる。暗黒星雲の温度は 10K 前後と低いので、 H_2 と He 以外の大部分の分子は氷として凝縮する。

このようにして凝縮した氷の構造や組成がどのようなのかは、暗黒星雲と実験室で作った氷の赤外線吸収スペクトルの比較からある程度推定できる。暗黒星雲の一例であるオリオン星雲中の BN 天体のスペクトルと、実験室で作った氷 Ic とアモルファス氷のスペクトルを図 8 に示す。BN 天体のスペクトルは氷 Ic のスペクトルとは明らかに異なっており、10K で作ったアモルファス氷のスペクトルによく似ている。これから、暗黒星雲にはアモルファス氷が存在すると結論される。また、§ 3 の議論（図 6）からも、暗黒星雲ではアモルファス氷が凝縮すると予想され、スペクトルの比較からの結論と一致する。

さらに、 H_2O 以外のどんな分子が入っているかも同

図 8 BN 天体とアモルファス氷の赤外スペクトル

様に議論できる。図 9 に W33A 天体（これも暗黒星雲の一例である）と、実験室で作った $H_2O : CH_3OH : CO : NH_3 = 6 : 3 : 3 : 2$ の氷の赤外吸収スペクトルの比較を示す（Greenberg, 1989）。図中に破線で示したように、W33A のスペクトルにおいて試料と対応する波長で強い吸収が見られることから、W33A 天体では H_2O の他に、CO や CH_3OH が氷に含まれていることがわかる。暗黒星雲については一般に、 H_2O の次に多いのが CO で、 $CO/H_2O = 0.05 \sim 0.3$ となる。他の分子は H_2O の数%以下の存在度である。

4.3 原始太陽系星雲で

原始太陽系星雲が誕生した際に、分子雲にあった氷星間塵がどの程度蒸発したかが、彗星の形成領域を推定する時に重要となる。これまでは、氷星間塵に含まれる CO, CH_4 , CO_2 などの分子はすべて平衡温度で蒸発が起こると仮定して彗星の起源などの議論が行われてきた。しかし、筆者の実験によると（Kouchi, 1990）、実際の

図 9 W33A 天体(a)と実験室で作った氷の(b)の赤外吸収スペクトル (Greenberg, 1989) (a)で実線は W33A の中心星による黒体輻射のスペクトルの計算値、点線が W33A のスペクトルである。従って、実線と点線との差が W33A 中の氷微粒子による吸収スペクトルに対応する。

蒸発過程は非常に複雑であることが明らかになった。平衡温度で蒸発する分子はそれぞれの分子の含有量の1/3以下であり、平衡温度以上の温度でも、アモルファス氷表面に大量の分子が吸着していることがわかった。また、分子の数%~10%程度はアモルファス氷が結晶化する130~140Kまでアモルファス氷中に含まれていて残っていることも明らかになった。

結局、分子雲の氷星間塵に含まれていた揮発性の分子(O_2 , N_2 , CO)の一部は原始太陽系星雲の外縁部でも蒸発したことは確かだが、どの程度の量が蒸発したかは不明である。このことが、彗星の形成領域の推定を困難にしている。いずれにせよ、アモルファス氷中に他の分子をある程度含んだ氷星間塵が集って彗星核が形成されたと考えられるので、次節では彗星の進化を考える。

5. 彗星の熱史

彗星核は分子雲に存在していた氷星間塵がふり積ったばかりの新雪のようにふわりと集って形成された天体である。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氷星間塵の熱伝導率よりさらに小さくなる。熱伝導率がどれくらい小さくなるかは氷星間塵の接触状態に大きく依存するのではっきりしたことは言えないが、1/10~1/100になると考えられている。従って、彗星核の熱伝導率はアモルファス氷の熱伝導率($\$2.4$)よりさらに小さく、 $0.1\sim 0.01 \text{ erg} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ と非常に小さな値となる。

この結果はこれまでに行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。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。彗星核の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するが、その前に彗星の進化をおおまかに述べておく。

\\$4.1で示したように、原始太陽系星雲の太陽から100天文単位ぐらいの領域で形成された彗星核は木星、土星などの重力により、太陽から非常に遠く離れたオールト雲へもたらされる。オールト雲は太陽から10万天文単位ほど離れ、太陽系を球殻状にとりかこむ「彗星の巣」といわれるところである。大部分の彗星核は太陽系の年齢の約45億年の時間をオールト雲内ですごす。

オールト雲にあった彗星核はときおり、他の恒星など

の重力的摂動で現在の太陽系内部へもたらされる。太陽に近づいた彗星核表面からは氷が蒸発し、彗星特有のコマ(彗星核のまわりの球状のガス雲)や尾をつくる原因となる。太陽系内部へはじめてやってくる彗星は放物線軌道を取り、再び太陽系内部へ戻ってくることはない。これらの彗星のうち、木星や土星などの惑星の重力で太陽系内部にとらえられてしまったものは楕円軌道に変化し周期彗星となる。周期76年のハレー彗星や周期3.3年のエンケ彗星などが周期彗星の例である。

5.1 オールト雲にて

放射性元素の崩壊熱それ自体は微々たるものだが、45億年もの長時間にわたると、彗星核内部の温度上昇をもたらし、それによって彗星核を構成する氷の性質が変化する可能性がある。この可能性が、Haruyama et al. (1993)によって検討された。彼らはオールト雲での彗星の熱史を調べ、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に生き残る。

さらに、Haruyama et al. (1993)は彗星核内部で結晶化が起きかどうかの条件式を求め、彗星核の半径や熱伝導率に依存することを示した。これらの結果によると、半径が3 kmより小さな彗星のみが結晶化を免れ、彗星核の形成時とほぼ同じ状態を保ったアモルファス氷が保存されることが明らかになった。

5.2 周期彗星

これまでの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いた。しかし、上に示したように、アモルファス氷が残る場合と、完全に結晶化してしまう場合の2つの極端な場合を考慮する必要があることがわかった。

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(図4)、これまでの研究結果の再検討が必要である。筆者たちは彗星核内部での熱伝導のメカニズムを検討し(Kouchi et al., 1992a)、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(Kouchi et al., 1992b)。たとえば、地球軌道上に彗星核を100~1000年おいても、表面から数10cm~1m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。半径が3 kmより小さな彗星核の内部、といっても表面から数10cm程度、には太陽系形成時、あるいはそれ以前の分子雲での歴史が刻み込まれたアモルファス氷微粒子が存在しているのである。ヨーロッパ宇宙機構(ESA)と

アメリカ航空宇宙局 (NASA) は西暦2000年前後に、彗星核に探査機を送り、彗星核内部の氷を持ち帰る計画をたてている。もし、これが成功すれば、持ち帰った氷は彗星の起源のみならず、太陽系の起源と進化を明らかにするロゼッタ・ストーンになるであろう。

6. おわりに

氷星間塵や彗星の起源・進化を理解するための、アモルファス氷に関する私達の知識はまだ不十分であり、アモルファス氷の物性研究を強力に推進する必要がある。雪氷学で培ってきた氷結晶の物性についての知識が、アモルファス氷の物性研究に際しても大いに役に立つはずである。

文 献

- Blackman, M. and Lisgarten, N.D., 1957: The cubic and other structural forms of ice at low temperature and pressure. *Proc. Roy. Soc.*, **A239**, 93-107.
- Bryson III, C.E., Cazcarra, V. and Levenson, L.L., 1974: Sublimation rates and vapor pressures of H₂O, CO₂, N₂O, and Xe. *J. Chem. Eng. Data*, **19**, 107-110.
- Greenberg, J.M., 1989: Interstellar dust: an overview of physical and chemical evolution. *Evolution of Interstellar Dust and Related Topics*, eds. A. Bonetti, J.M. Greenberg and S. Aiello, Amsterdam, North Holland, 7-52.
- Haruyama, J., Yamamoto, T., Mizutani, H. and Greenberg, J.M., 1993: Thermal history of comets during residence in the Oort cloud: effect of radiogenic heating in combination with the very low thermal conductivity of amorphous ice. *J. Geophys. Res.*, **98**, E8, 15079-15090.
- Hobbs, P.V., 1974: *Ice Physics*. Oxford, Clarendon Press, 837pp.
- Klinger, J., Benest, D., Dollfus, A. and Smoluchowski, R., 1985: *Ices in the Solar System*. Dordrecht, Reidel, 954pp.
- Kouchi, A., 1987: Vapour pressure of amorphous H₂O ice and its astrophysical implications. *Nature*, **330**, 550-552.
- 香内 晃, 1988: アモルファス H₂O の蒸気圧と天文学への応用. *日本物理学会誌*, **43**, 601-603.
- Kouchi, A., 1990: Evaporation of H₂O-CO ice and its astrophysical implications. *J. Cryst. Growth*, **99**, 1220-1226.
- 香内 晃, 1991: アモルファス氷と惑星科学. *日本結晶成長学会誌*, **18**, 173-180.
- 香内 晃, 1993: 宇宙にたどよう氷の起源と進化. *化学と生物*, **31**, 703-713.
- 香内 晃, 1994: アモルファス氷の熱伝導率と彗星の熱史. *天文月報*, **87**, 15-20.
- 香内 晃・黒田登志雄, 1991: アモルファス氷. *日経サイエンス*, 7月号, 96-107.
- Kouchi, A., Greenberg, J.M., Yamamoto, T. and Mukai, T., 1992a: Extremely low thermal conductivity of amorphous ice: relevance to comet evolution. *Astrophys. J.*, **388**, L73-L76.
- Kouchi, A., Greenberg, J.M., Yamamoto, T., Mukai, T. and Xing, Z.F., 1992b: A new measurement of thermal conductivity of amorphous ice: preservation of protosolar nebula matter in comets. *Physics and Chemistry of Ice*, eds. N. Maeno and T. Hondoh, Sapporo, Hokkaido University Press, 229-236.
- Kouchi, A., Yamamoto, T., Kozasa, T., Kuroda, T. and Greenberg, J.M., 1994: Conditions for condensation and preservation of amorphous water ice and crystallinity of astrophysical ices. *Astron. Astrophys.*, in press.
- Krikorian, E. and Sneed, R.J., 1966: Epitaxial deposition of germanium by both sputtering and evaporation. *J. Appl. Phys.*, **37**, 3665-3673.
- Mayer, E. and Pletzer, R., 1986: Astrophysical implications of amorphous ice -- a microporous solid. *Nature*, **319**, 298-301.
- Narten, A.H., Venkatesh, C.G. and Rice, S.A., 1976: Diffraction pattern and structure of amorphous solid water at 10 and 77°K. *J. Chem. Phys.*, **64**, 1106-1121.
- Sceats, M.G. and Rice, S.A., 1982: Amorphous solid water and its relationship to liquid water: a random network model for water. *Water Vol. 7*, ed. F. Franks, New York, Plenum, 83-214.
- Schmitt, B., Ocampo, J. and Klinger, J., 1987: Structure and evolution of different ice surfaces at low temperature adsorption studies. *J. Phys. Paris*, **48**, C1, 519-525.
- 山本哲生, 1989: 彗星物質からみた彗星の起源. 彗星, 桜井邦明・清水幹夫編, 東京, 朝倉書店, 52-77.
- Zhang, Q. and Buch, V., 1990: Computational study of formation dynamics and structure of amorphous ice condensates. *J. Chem. Phys.*, **92**, 5004-5016.

(1993年10月15日受付)