

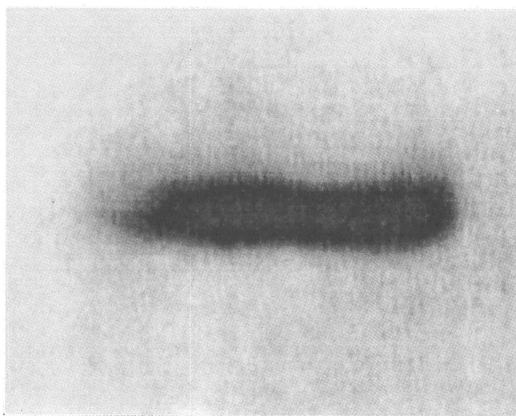
原始太陽系星雲の進化における放射の役割—ダストを中心として*

岡 本 創**

現在の太陽系が現在の姿になるまでに、どのような進化の歴史を経てきたのか。ここでは原始太陽系星雲に存在したダストと呼ばれる固体微粒子が、太陽系形成に果たしてきた役割を中心に、いくつか最近の研究成果を紹介しようと思う。実はこれから述べる事柄は、気象におけるホットな話題である地球の温暖化の問題や、惑星の進化といった議論にも適用できる面が多いので、気象の分野を研究する科学者にとっても興味あるものではないだろうか。コーヒープレイクのつもりで気軽に読んでいただきたい。

1. はじめに

原始太陽系星雲の形成の問題、つまり我々の太陽系の起源を物理的に解明することは、天文学および惑星科学の分野に働く多くの研究者の主要な関心事であり続けてきた。18世紀半ばにカント、そして40年後にラプラスによって論じられた「星雲説」に始まった太陽系形成の問題であるが、数値的なモデル計算としては、1960年代にサフロノフ、林やキャメロンらによって先鞭がつけられた(例えば、Hayashi *et al.*, 1985 を参照されたい)。この頃は、まだ太陽系の過去の姿が観測の対象になるとは期待されてなかったようで理論的な予測がある程度なされただけであった。しかし観測技術の飛躍的な進歩により、近年になって我々の太陽系の進化の様々な段階に相当する、つまり過去の姿の投影である原始惑星系円盤も実際に多数観測されるようになった。ようやく理論と観測との比較が直接できる時代になってきたのである。第1図は、地球大気の影響を避けるため宇宙空間に置かれているハッブル宇宙望遠鏡によって撮影された、オリオン星雲のなかにある惑星系円盤である(Battersby, 1996)。この円盤状の星雲(ディスク)は、中心星とそのまわりに形成され

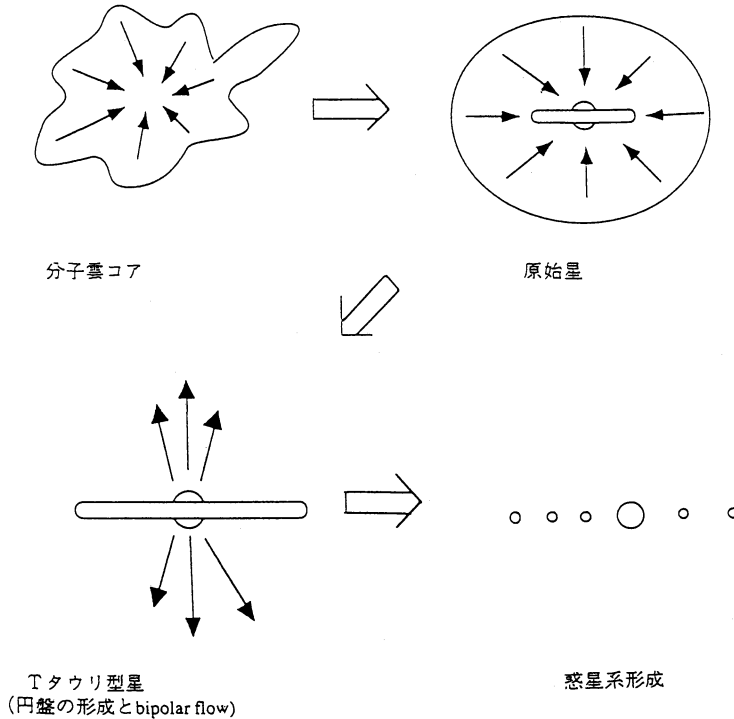


第1図 Hubble Space Telescope によって撮られた原始惑星系円盤 (Battersby, 1996: *Silhouettes of future worlds, Nature*, 380 より転載)。

たダストとガスからなるのだが、真ん中付近にあるはずの中心星はこの濃い星雲に隠されて見ることができない。この状態が、我々の太陽系の若かりし時の姿なのだ。ディスクの境界が非常にきれいに捉えられているのが印象的である。オリオン星雲には、このようにディスクを持つとみられる星が全体のなかで過半数を占めるそうである。また木星質量程度の惑星を伴う他の太陽系もいくつか見つかっている。我々の住む太陽系は、想像されてきた以上にごく普通の存在らしいのだ。このような原始惑星系円盤はこれまでにも多数見つかり、紫外線からミリ波にいたる幅広い波長域で精力的に観測されている。円盤を形成しているダストについての物理的理解も少しずつ進みつつある。第2章では、進化のシナリオを簡単にふりかえる。第3章では観測事実を、第4章ではダストの性質と役割を中心に、理論について記述する。ここでは原始太陽系星雲の進化を調べるには、様々な種類のダストの光学特性が、キーとなっていることが示される。一方地球の温暖化には、その放射の主な担い手となっているエアロゾル、雲(水滴や氷粒子)、ガスの光学特性を知らねばならない。その上で、系全体としての放射特性

* The role of radiation on the evolution of the primitive solar nebular: dusty cocoon.

** Hajime Okamoto, 東京大学気候システム研究センター。



第2図 分子雲から太陽系ができるまで。

を知るために、放射伝達方程式をできるだけきちんと解くことが要求される。また放射過程と、力学過程の結合という観点では、星雲の時間的進化を調べる数値モデルと、地球の気候を研究するうえで広く使われている大循環モデル (General Circulation Model) には多くの共通点が見受けられると思う。例えば、原始太陽系星雲の数値モデルにおいても、GCM の場合も、星雲や大気的最终的な温度構造は、放射収支のアンバランスが熱エネルギーの循環を引き起こすという過程を考慮することにより再現されるのである。

2. 分子雲から太陽系へ (シナリオ)

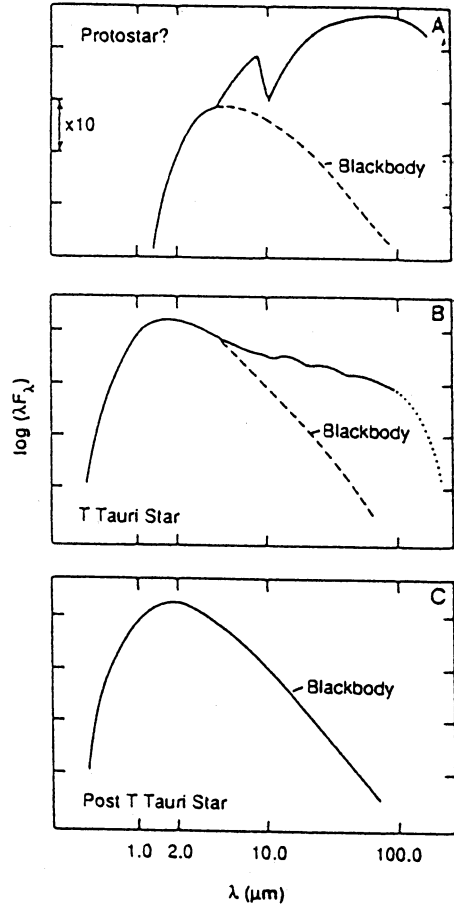
簡単に、ある程度コンセンサスが得られている太陽系形成の進化のシナリオを説明しよう(第2図)。太陽系は、そもそも宇宙のどのような場所で誕生するのか。それは銀河系の中の巨大分子雲と呼ばれる星間ガスの密度の濃い所なのだ。巨大分子雲の大きさは、 3×10^{15} km くらいある。これは、地球と太陽との距離の2千万倍に相当する。また総質量は太陽の10万倍と見積られている。このような“巨大”なシステムは、水素分子と星間に存在するダストで満たされている。ダストの起源は、すでに死んだ星から放出されたものや宇宙

が誕生した初期にできたものなどである。分子雲の温度は大体 10 K と非常に冷たい。その巨大分子雲のなかに密度の濃い部分と薄い部分という構造ができていて、全体の質量のうち1%から10%は密度の濃い場所(分子雲コア)にあると見積もられている(Lada and Shu, 1990)。その濃い部分の空間的な大きさは、地球と太陽との距離の約1万倍である。原始太陽系形成は、特にこの濃い部分で起こるのである。この分子雲コアとよばれるガスとダストの混合の状態がゆっくりと回転し、お互いの重力で引っ張りあいながら縮み始める。分子雲コアの中心部分の密度の濃い部分は、落下してくるガスの重力エネルギーを解放し、電磁波を放射し始める。中心星の誕生である。その周辺はガスとダストでできた希薄なエンベロープと呼ばれるものに包まれている。ガスとダストは中心星の周りを回転しながら、その回転軸に垂直な面に向かって落下していくので、ディスクがある自転軸と直交する向きに形成され始める。これは原始星と呼ばれる。さらにディスクの形成とともに、原始星の回転軸から外向きに、つまり太陽の北極と南極から双極分子流というガスが高速(数 km/秒~数百 km/秒)で吹き出している。典型的なディスクの大きさは、現在の太陽と地球の距離の

約100倍である。ちなみにこの数字は現在の太陽と冥王星との距離の2倍よりも少し大きいというものである。現在は多数の新しい惑星が冥王星の外側にも見ついていることを考えると、典型的な円盤のサイズと最終的な我々の住む太陽系の大きさというのは、同じようなものなのかもしれない。その後中心星への物質の降着がやむ。この段階はTタウリ型星と呼ばれる。Tタウリ型星は、中心部ではまだ温度が低くて水素の核融合反応はおきていないので低温である。また変光星であることがその特徴としてあげられる。中心星は自分の重力で収縮していくことにより内部の温度を上げていくので、やがては水素の核融合反応を始め、今の太陽のいる主系列星とよばれる状態になっていく。またディスクの中ではダストが付着成長しており、やがてそれらが集まって km サイズの微惑星がディスク内で多数つくられる。それらはさらに衝突合体を繰り返し、現在の地球、火星のような惑星や小惑星、彗星になる。ディスクの外側では、まだ存在していたガスが取り込まれ、現在のような大気をまとった木星が形成される。おおざっぱに言って、この道筋にしたがって現在の我々のいる太陽系ができたと推測される。

3. 原始太陽系星雲の放射スペクトルの観測

原始太陽系星雲を可視から赤外、ミリ波といった幅広い波長でみてみると、進化の段階に応じてその放射のエネルギースペクトルにはっきりとした違いが見てとれる。第3図をみて欲しい (Lada and Shu, 1990)。横軸には波長、縦軸はエネルギー分布を表している。進化の若い段階であるAでは、中心星の周りにまだたくさんダストが存在しているので、中心星からの光(主に可視付近)はエンベロップによって隠されて見えず(光学的に厚い)、赤外に大量のエネルギーが放出されるのがその特徴である。このエネルギー源は、円盤内のダストが中心星からの放射を受け、その放射を受けた距離に応じて様々な温度で熱放射したものの重ね合わせである。つまり星の近くでは 1000 K 位のディスクの外縁付近では 30 K の黒体放射をしているのである。水素やヘリウムといったガスの質量はダストの100倍以上であると思われるが、放射スペクトルはほぼ100%ダストが担っていると考えていい。すこし進んだ段階であるTタウリ型星では、ディスクの中心面へのダストの沈降がかなり進行したため、Aの段階に比べ相対的にダストが少なくなり、その結果中心星から可視光が、ディスク内のダストから赤外の熱放射が見ら



第3図 観測された原始惑星系円盤が放射するエネルギー分布。(Lada and Shu, 1990: The formation of sunlike stars, Science, 240より転載)。

れる。このスペクトルの形は、(1)ディスクが差動回転(ディスクの内側と外側では回転速度が違う)していて、その回転エネルギーが粘性によって熱エネルギーに変化してディスクを温め、その結果ダストが熱放射したものの、(2)中心星からの放射をディスクが吸収、そして熱放射したものの、(3)中心星からの放射、の3つの足し合わせである。このようなディスクからの熱放射を正しく計算するには、当然ディスクの幾何学的構造を考慮し、放射伝達を計算せねばならない。この事情は、地球大気の放射収支計算においてガス、エアロゾルや雲の空間分布(緯度、経度、高度)を正しく考慮しなければならないこと、特に雲の放射収支計算には、雲の形状をも考慮する必要性が指摘されている点と似ている。特に人工衛星による雲の観測デー

タの解釈には太陽光の入射角依存性等を考慮したより細かい放射の計算が必要になり、雲の形を正しく考慮する必要がある。Cの段階になると、中心星を取り囲むダストは少なくなってしまうので、中心星の表面温度に対応した黒体輻射だけで記述できる。つまりいったん惑星が出来てしまえば、その表面積は同体積のダストに比べて圧倒的に小さくなるので、暗く見えなくなってしまう。今の我々の太陽系を外から見るとちょうどこのように見えるのだろう。

ディスクの質量(ガスとダストの和)は、光学的に薄いと考えられるダスト雲のサブミリ波での射出率から推定されるが、太陽質量の1%から10%程度とされている(Beckwith and Sargent, 1991)。またこの波長域での射出率の波長に対する傾きを見ることにより、ダストの成長具合をみることもできる。傾きが緩やかな程、ダストが大きくなっていると考えるのである。詳しくは述べないが、星間ダスト(だいたいサブミクロンサイズ)と比べるとディスクの中のダストは大きく成長していることが示唆されている。さて、現在の太陽系内にもダストは存在している。これらは惑星間塵と呼ばれる。この起源としては彗星が太陽に近づいた時に放出したもの、小惑星から出たもの、さらには太陽系外の星間空間からきたものなどが考えられる。実際に地球上からでも惑星間ダストからの熱放射が観測されている。またこれらの塵の一部は地球上にもやってきており、その総量は年間1,000万トンと見積られている(Peterson and Junge, 1971)。

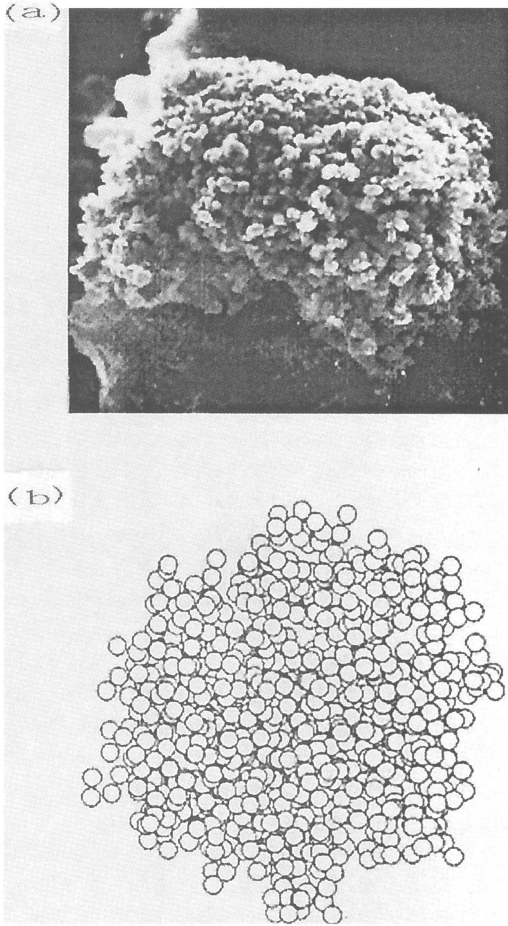
4. 放射とダスト

まず原始太陽系星雲の進化を今の数値的モデルではどう扱うのかを簡単に見ていこう。これまでは前述したように、分子雲(1万AU)から中心星(0.01AU)の形成まで追おうとすると、空間スケールで6桁の範囲をカバーしなくてはならない。さらに円盤中でのダストの成長から惑星形成までを取り扱おうとすると、サブミクロンのダストからkmサイズの微惑星までを取り扱うので、少なくとも9桁の範囲を扱わねばならない。まず分子雲から中心星とディスクが形成されるまでの理論を考える。分子雲でガスとダストが混ざった流体が重力収縮していき、中心星やディスクに衝突しその時重力エネルギーを解放して放射が発生、それが外側へ伝わっていく。この流体の力学進化は重力、ガス圧、放射圧のアンバランスが熱エネルギーの再分配を通じて解消されていく、という過程を通じて決定

される。この過程でディスクの質量分布と温度構造が決まっていく。このあたりは、地球大気の運動が太陽放射で駆動され、その温度構造が決まっていくのと類似性がある。さて結果としてできていくディスクの構造は一般には3次元である(第1図参照)。これには大変な計算が要求されるので、従来は放射伝達の部分は、光学的に十分厚い領域のみで正しい近似が用いられてきた(Cameron and Pine, 1968)。しかし、実際には光学的に薄い部分と濃い部分は共存するので、こういった近似なしに放射伝達を取り扱う必要性がNakamoto (1996)により指摘されている。

ところでその放射伝達をきちんと取り扱うためには、その主な担い手であるダストの光学的特性を可視、赤外そしてミリ波までの幅広い波長域で知らねばならない。それは、ダストの鉱物組成、総量、サイズ分布、そして形状に依存した量である。この事情は、地球の気候問題で、エアロゾルによる放射強制力(放射収支においてエアロゾルが存在することにより引き起こされる放射量の変化)を調べる場合と同じである。この見積りにはエアロゾルが可視、赤外でどのような散乱、吸収特性があるのかを計算せねばならず、そのためには鉱物組成、総量、サイズ分布、そして形状を知らねばならないのである。

更に最近ではディスクの時間進化を調べるにはダストの成長、進化を同時に取り扱わねばならない、と認識されるようになってきた(Sterzik and Morfill, 1994)。ダストのような個体微粒子が附着合体を繰り返し成長していくとき、その形は、液滴の成長のように球にはならず、大変複雑な形をしていると考えられる。しかし簡単化のためこれまでの研究では、粒子の形を球形としてダストの光学的特性が見積られてきた(Pollack *et al.*, 1995)。ここでダストが実際にどういふものかを知るために第4図aを見て欲しい。これは地球大気上層で採取された宇宙起源のダストである。ダストの形は、葡萄の房のように不規則な形をしている。このダストは、もともと存在した微粒子の粒(星間ダストで約0.1ミクロン)を基本構成要素とするような凝集体で、全体のサイズは10ミクロン程度である。原始太陽系の環境を想定した計算機によるシミュレーションによると、ダストは、あるフラクタル次元で規定される形状を保ちつつ成長していくと予測されている(Meakin and Donn, 1988; Nakamura, 1996)。このようにしてできるフラクタル形状の粒子は、写真のような実際に採取されたダストの形をある程度再現す



第4図 (a)大気上層で採取された宇宙空間起源のダスト (Brownlee, 1978: Micro studies of sampling techniques, "Cosmic Dust", J. A. M. McDonell, John Wiley and Sons, 1978 より転載)と (b)原始太陽系星雲の環境を想定して計算機シミュレーションによって作られたフラクタル形状ダスト。

るのに成功している(第4図b)。こうして形が定量的に扱えるようになると、その情報を使って不規則形状の光散乱が取り扱えるようになってくる。

このような不規則形状をした散乱体に対する計算を行う方法として、1973年にパーセルとペニーパッカーによって Discrete Dipole Approximation 法 (DDA) が考案された。この方法では、任意の形状をした個体微粒子を波長よりも小さなN個の微小体積要素に分割し、その微小体積要素は、電気的雙極子で置きかえられる。そしてダストの全体としての光散乱特性は、雙極子の相互作用を考慮して、計算される。DDA は現在

様々な分野で応用されている (Draine and Flatau, 1994)。ただ問題なのは、コンピュータのメモリを大量に必要とし、かつ莫大な計算時間を必要とする点である。そのためこれまででは、波長程度の大きさのダストに対してしか適用できなかった。DDA の適用限界は Okamoto *et al.* (1995) に詳しく論じてある。

さて、フラクタル形状の粒子の光学的特性は、球形のダストに比べて本当に違う性質を持つのだろうか?。筆者は以前地球軌道付近で彗星から放出されるダストの熱放射を解析した時に、フラクタル形状粒子の赤外での熱放射特性を調べた。ちなみに彗星は、初期の原始太陽系星雲の情報と比較的よく保存していると考えられている。そのダストの熱放射の性質は、その構成要素である1つの粒の性質が全体の性質に反映されているとの結論を得た (Okamoto *et al.*, 1994)。もしそうならばフラクタル的なダストの成長によっては、ディスク全体の光学特性は変化しないということになる。その議論が原始太陽系星雲でもあてはまるのであろうか?

このような非球形粒子による光の散乱過程は、今も天文、惑星、気象、生物、工学といった幅広い分野で研究されて、計算機の進歩とも歩調をあわせ年々正確な散乱計算ができるようになってきている (最近の散乱理論の進展については、Okamoto (1995) を参照のこと)。気象において典型的な非球形散乱問題は上層の雲の氷粒子の散乱だろう。ご存じのように氷の形には様々なもの (細長い六角柱、板上のもの、それらのあわさった凝集体やもっと複雑なもの) が知られているが、そのような粒子の光散乱計算も徐々に可能になってきた。94 GHz (3.2 mm) のレーダーを使った巻雲の氷粒子のリモートセンシング等には、DDA 法は十分実用的な方法である (Okamoto *et al.*, 1995)。いずれにせよ、現段階ではディスク内でのダストの光学特性について最終的な答えは出ていないといえるが、近いうちダストの成長がどう光学特性を変えていくかについての精度の高い計算が可能となってくるだろう。

以上非常に簡単に太陽系の進化を追ってきた。気象と天文・惑星科学の分野の共通点に留意したつもりである。本記事が両分野の研究者の相互理解にいくらかでも役立てば幸いである。ところで、なんと本記事を執筆中に NASA の研究者らによって火星に生命がいた可能性が強いことが発表された (Mckay *et al.*, 1996)。惑星系というものが宇宙のあちこちに見つかり始めている事を考えると、我々地球上の生命体はそんな

なに孤独な存在ではないのかもしれないという気がしてくる。将来は他の太陽系の中の惑星における気象という分野も花開くのではなからうか。

謝 辞

筑波大学計算物理学研究センターの中本泰史さんには執筆にあたって多くの貴重な助言をいただき、また草稿の段階で読んでいただきました。本記事の執筆を勧めて下さった東京大学気候システム研究センター住明正先生には感謝します。また東京大学気候システム研究センターの河本和明さん、対島洋子さん、片桐秀一郎さん、丸山祥宏さんには、資料収集を手伝っていただきました。

参 考 文 献

- Adams, F. C., C. J. Lada and F. H. Shu, 1987 : Spectral evolution of young stellar objects, *Astrophys. J.*, **312**, 788-806.
- Battersby, S., 1996 : Silhouettes of future worlds, *Nature*, **380**, 199-199.
- Brownlee, D. E., 1978 : Micro Particle studies by sampling techniques, in *Cosmic Dust* (J. A. M. McDonell, ed.), John Wiley and Sons., 295-336.
- Beckwith, S. V. W. and A. I. Sargent, 1991 : Particle emissivities in circumstellar disks, *Astrophys. J.*, **381**, 250-258.
- Cameron, A. G. W. and M. R. Pine, 1973 : Numerical models of the primitive solar nebular, *ICARUS*, **18**, 377-406.
- Draine, B. T. and P. J. Flatau, 1994 : The discrete dipole approximation for scattering calculations, *J. Opt. Soc. Amer.*, **11**, 1491-1499.
- Hayashi, C., K. Nakazawa and Y. Nakagawa, 1985 : Protostars and Planets II, D. C. (Black & M. S. Mathews eds.), Arizona Press, 1100-1153.
- Lada, C. J. and F. H. Shu, 1990 : The formation of sunlike stars, *Science*, **248**, 564-572.
- Mckay, D. S., E. K. Jr. Gibson, K. L. Thomas-Keprta, H. Vali, C. S. Romanek, S. J. Clemett, X. D. F. Chillier, C. R. Maechling and R. N. Zare, 1996 : Search for past life on Mars : Possible relic biogenic activity in Martian meteorite ALH 84001, *Science*, **273**, 924-930.
- Meakin, P. and B. Donn, 1988 : Aerodynamic properties of fractal grains : Implications for the primordial solar nebula, *Astrophys. J.*, **329**, L39-L41.
- Miyake, K. and Y. Nakagawa, 1995 : Dust particle settling in passive disks around T Tauri stars : models and IRAS observations, *Astrophys. J.*, **441**, 361-384.
- Nakamoto, T., 1996 : Radiation hydrodynamics for star and protoplanetary disk formation, *Numerical Astrophysics using Supercomputers*, (K Tomisaka ed.), National Astr. Obs. Japan, 11-13.
- Nakamura, R., 1996 : Fractal dust growth in the protoplanetary disks, Dr. thesis, Kobe University, 115.
- Okamoto, H., T. Mukai and T. Kozasa, 1994 : The 10 μm feature of aggregates in comets, *Planet. Space Sci.*, **42**, 643-649.
- Okamoto, H., A. Macke, M. Quante and E. Raschke, 1995 : Modeling of backscattering by non-spherical ice particles for the interpretation of cloud radar signals at 94 GHz. An error analysis, *Contr. Atmos. Phys.*, **68**, 319-334.
- Okamoto, H., 1995 : Light scattering by clusters : the a1-term method, *Opt. Rev.*, **2**, 407-412.
- Peterson, J. T. and C. E. Junge, 1971 : Sources of particulate matter in the atmosphere. In "Man's Impact on Climate", (eds. W. H. Mathews, W. W. Kellogg and G. D. Robinson), MIT press, 310-320.
- Pollack, J. B., D. Hollenbach, S. Beckwith, D. P. Simonelli, T. Roush and W. Fong, 1994 : Composition and radiative properties of grains in molecular clouds and accretion disks, *Astrophys. J.*, **421**, 615-639.
- Purcell, E. M. and C. R. Pennypacker, 1973 : Scattering and absorption of light by nonspherical dielectric grains, *Astrophys. J.*, **196**, 705-714.