

特集「比較惑星系形成論」

隕石に記録された惑星形成過程の情報

永原裕子¹

1. 物質科学からの寄与

探査機による若い惑星系の観測が長足の進歩を遂げ、従来多くの研究者が思い描いていたより、短時間で動的な初期惑星系形成の描像が明らかになりつつある。それによって惑星形成理論の見直しが検討されるようになってきている。このような現在、物質科学のサイドから、惑星形成過程に関してどのような制約を与えることができるかについて、最近の研究の進歩を3つの問題に絞ってレビューする。

ここで取り上げるのは、年代情報、プレソーラーグレイン、粒子の履歴をモデル化する試み、の3点で、物質科学一般の進歩を論じようとするものではない。この2年くらいの間に著しい進展を遂げつつあるが、その全体像が未だ明らかでなく結果の解釈も渾然としている酸素同位体に関する話題、宇宙塵に関する話題などは割愛した。

2. 隕石の年代情報

隕石から得られる年代情報は大きく分けて2通りのものがある。1つは半減期の長い核種の崩壊に基づくもので、絶対年代を得ることができる。他は半減期の短い核種の崩壊の結果に基づくもので、相対年代を得ることができる。前者は、閉鎖系における放射壊変を利用したもので、親核種の存在量の異なる鉱物や岩石の中の親核種と娘核種の存

在比の作るアイソクロンからそれらが閉鎖系となった時間を求めるものである。その代表的な例は、Rb-Sr, U-Pb, Sm-Nd系など半減期が 10^9 - 10^{10} 年のもので、地球の岩石においてよく利用され、隕石においても平衡コンドライトやエコンドライトに適用されている。コンドライトのなかでもっとも古い年代は、Pb-Pb法により求められたアエンデ隕石のCAI (Ca-Al-rich inclusion) の $4.566 (+0.002/-0.001) \times 10^9$ 年である[1]。この年代が太陽系における最初の固体物質形成時間であるとされている。これらは半減期の長い時計の本質的な限界として、100万年という単位の分解能はもたない。一方半減期の短い核種は、太陽系形成以前に他の星で元素合成され、放射壊変の時間内で太陽系にとりこまれ、太陽系の固体物質中に固定されたものである。 ^{26}Al - ^{26}Mg , ^{53}Mn - ^{53}Cr , ^{60}Fe - ^{60}Ni , ^{107}Pd - ^{107}Ag , ^{129}I - ^{129}Xe などが2000万年以下の半減期をもち、100万年という単位の時間分解能をもつ。

短寿命核種の中でも、 ^{26}Al - ^{26}Mg 系は半減期が74万年で、始原的な隕石中にかなり普遍的に存在することから、初期太陽系の年代情報源としてきわめて有効なものである。太陽系の最初の固体物質(CAI)に固定された時に ^{26}Al が存在していたことは1973年にすでに見いだされ[2]、その後も多くのCAIおよびその関連物質からその存在が確認されてきた。しかし少ない存在量、娘核種の存在量の狭い幅、Al/Mg比が大きい必要性、その条件を満たす鉱物種が限られること、などの理由からAlを多

¹ 東京大学大学院理学系研究科

量に含みMgを含まないあるいは少量しか含まない物質のみからみいだされてきた。具体的な対象としてはanorthite ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$), hibonite (CaAl_2O_6), grossite (CaAl_2O_7), corundum (Al_2O_3), gehlenitic melilite ($\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$) などの鉱物で、それらはほとんど選択的にCAIに含まれ、コンドライトの大部分をなしているコンドリュールやマトリックスには含まれていない。ごく希に存在するAlに富むコンドリュールがCAI以外でこの方法によって年代データの得られた唯一の例外であった。MacPhersonらによりまとめられた61個の隕石からの1500以上の分析値は図1に集約されている[3]。その特徴は、(a) $\delta^{26}\text{Mg}$ (地球の標準試料の $^{26}\text{Mg}/^{24}\text{Mg}$ と比較して過剰な ^{26}Mg の量を1000分率で表した値) は $^{27}\text{Al}/^{24}\text{Mg}$ と正の相関にあり、アイソクロンを形成している (Alの多い物質ほど ^{26}Al の壊変により形成された ^{26}Mg の量が多い) (図1a), (b) $t=0$ の $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$ の値に戻すと、0と 5×10^{-5} の2つにピークがあり、その中間の値を示すものははるかに少ない (図1b), (c) $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al} = 5 \times 10^{-5}$ という値はほとんどすべてのCAIが示し、特殊なコンドリュール (化学的にはAlに富み、Mgに富む多くのコンドリュールと異なる組成のもので、産出頻度も全体の1%以下) は初期の $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$ が 1×10^{-6} 以下と低い値を示し、CAI形成からそれらの特殊なコンドリュールの形成まで数100万年の時間が経過したらしいということがわかる。

[3]のレビュー以降、SIMS (2次イオン質量分析装置) の進歩の結果、分析のための空間分解能および分析精度が向上し、より少ない量の ^{26}Al またより微少な空間の情報が得られるようになった。その結果、コンドリュールの形成年代に関してより詳細な年代情報が明らかとなってきた。岩石学タイプ3.4より高いコンドライトに含まれるコンドリュールは $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$ 比が 3×10^{-6} より低く、それを太陽系初期の均質な ^{26}Al 分布を仮定して年代に換算すると

CAIより300万年程度以上若いことになる[4,5]。岩石学タイプ3.0の変成のほとんどおこっていないコンドライト中のコンドリュールはアイソクロンをなすものがあり、その年代はCAIより200万年後の値に収れんする[6]。すなわち、太陽系の初期に固体物質が形成されてから、ちょうど200万年後の短かい間にコンドリュール形成年代がしばられていることになる。この意味することが、コンドリュールがその時にだけ形成されたのか、くり返し起こった形成の最後の年代であって、それ以前の年代情報はかき消されてしまったのかは不明である。いずれにせよ、コンドリュールが太陽系星雲の中

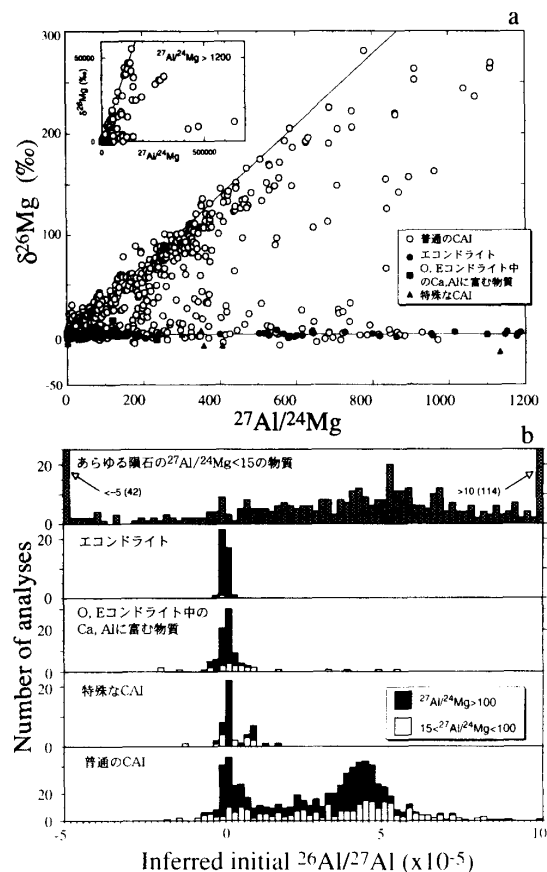


図1 (a) これまでに得られた隕石の $^{27}\text{Al}/^{24}\text{Mg}$ - $\delta^{26}\text{Mg}$ 図 (アイソクロン)。斜めの直線は初期の $^{26}\text{Al}/^{24}\text{Mg}$ 比が 5×10^{-5} を示す線で、初期太陽系の上限值と考えられる。CAIには2つのピークがあり、そのほかの隕石物質は0の値に収れんする。(b) 物質の種類による初期の $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$ 比の頻度分布。初期値が0と 5×10^{-5} にピークがあり、その中間の値のものは乏しい (文献[3]より)。

で形成されたのなら、この200万年という年代は星雲の継続時間ということになる。その後、母天体における変成作用は少なくともさらに200年以上継続した。

ほかの年代測定系でコンドリュール形成時間を求めることは必ずしも成功していない[7]。Al-Mg系の次に有効なのは ^{53}Mn - ^{53}Cr 系であるが、唯一アイソクロンの決定されたコンドリュールはAllendeのCAIより600万年若い年代を与える[8]。この年代法は半減期が370万年とやや長い上、MnとCrが多くの鉱物においてまた宇宙化学的にも挙動するため、その方法の適用に大きな制約がある。さらに ^{129}I - ^{129}Xe 法は半減期が長い上(1570万年)ガス成分であるため、金属元素よりはるかに移動しやすく、数100万年以内の正確な年代決定には適さない[9]。しかし一方、コンドライト母天体における変成作用や変質作用のタイムスケールに関しては有用な情報を提供し、ガスとの反応によって形成された変質鉱物がOrgueil (CI) コンドライト中の磁鉄鉱より500-1500万年若いということが明らかとなっている[10]。ただし、この年代と上記のAl-Mg系の基点となったCAIの年代との相対的な関係は明らかでない。

母天体におけるマグマ活動の結果形成されたエコンドライトには ^{26}Al の過剰は存在せず、一方 ^{53}Cr の過剰がかなり広範に見いだされている。 ^{53}Mn - ^{53}Cr 系に関する年代情報は研究グループ間の不一致があり、コンドリュール形成からHED天体の形成まで600万年程度、火成活動まで1000万年という結果[8]と、CAI形成からわずか300万年後には火成活動がおこったという結果[11]が出されている。

これらの年代情報を総合すると、CAIの形成からコンドリュール形成まで200万年が経過し、連続的に変成作用が進行した。300-1000万年後にはエコンドライト母天体表層において玄武岩質マグマを噴出させる火成活動がおこったことが確実であ

る。エコンドライト母天体表層の火成活動の熱源は明らかでないが、ショックによる加熱が主要なものであるなら、それは星雲ガス散逸の後の出来事と考えられ、星雲のライフタイムは200万年程度ということになり、上記の ^{26}Al - ^{26}Mg 系より推定されるシナリオと調和的である。

3. Interstellar dust

コンドライトマトリックスに含まれる微量なダイヤモンド、グラファイト、SiC、 Al_2O_3 などが太陽系起源ではなく、太陽系形成以前のさまざまな星で形成されたものが太陽系の高温度過程を生きたものであることが、多くの元素の同位体異常から明らかとなった。物質科学と天文学の元素合成理論の接点としてこの10年間の最大のトピックとなったそれらの成果は[12]にまとめられている。これまでに発見されたinterstellar dustの特徴は図2のようにまとめられる(Zinner[12]より)。量的にはダイヤモンドが最も多く、以下SiC、グラファイト、 Al_2O_3 、 Si_3N_4 の順に指数的に乏しくなる。

ダイヤモンドは量は多いが、サイズがナノメートルの単位で、個々の粒子の特性は不明である。ダイヤモンドの主要成分であるC同位体組成は太

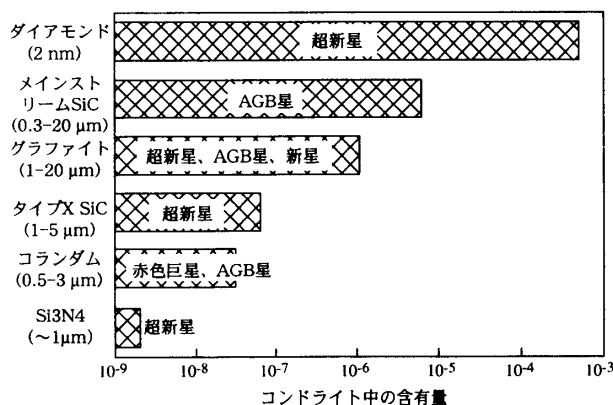


図2 コンドライトマトリックスに含まれるinterstellar dustの種類、サイズの特徴、量、考えられている起源。(文献[12]より)。

陽系の値と等しく、それらを太陽系外起源であるとする根拠は、Xeのほか希ガスおよび窒素同位体組成が太陽系の値と異なるためである[12,13]. Xe同位体組成の特徴からそれらは超新星起源であると考えられているが、通常の超新星における元素合成過程では細かい特徴は説明されず、超新星エンベロップにおける異なる層での混合があったとされている。

SiCは大きいものは20 μm に達し、炭素と窒素の同位体の特徴から6つのタイプに分類される。そのうちメインストリームと名付けられた一群のものが90%程度を占めている。それらは主要成分であるSiとC、微量成分であるN, Mg, Ca, Ti, Sr, Zr, Mo, Ba, Nd, Sm, Dy, 希ガス同位体組成が太陽系で形成された物質とは異なる値を持ち、その特徴から低質量(1-3太陽質量) AGB星のアウトフロー中で形成されたと考えられている。SiCのそのほかのタイプのもは超新星, J型炭素星(炭素星のなかでも表面温度が低く, ^{13}C に富むグループ), N型炭素星(表面温度が低く, s-プロセス元素に富む炭素星), 新星, 大型の晩期型星(Wolf-Rayet星), などに由来すると考えられている。

グラファイトは数 μm と大きく、密度の低い球状で産する。主要元素であるCが同位体異常を示すほか、O, Si, N, Alなどが同位体異常を示し、C-J星, C-N星, 超新星, 大型晩期型星などに由来すると考えられている。グラファイトは観測的には炭素星に由来すると考えられているが、同位体の情報はコンドライトマトリックスに含まれるinterstellar dustとしてのグラファイトの半数以上はAGB星などそれ以外に起源をもつことを示している。なおグラファイトにはより不規則な形状のものが多くあり、それらは同位体異常を示さないことから太陽系起源であると考えられている。

このほか Al_2O_3 など酸化物は同位体の特徴からAGB星由来と考えられている。

Interstellar dustの重要性は主として元素合成理論との関連にあるが、それらの存在は太陽系形成過程に関しても重要な情報を提供する。1つは太陽系の起源物質の多様性に関してである。これまでに見いだされているinterstellar dustの様々な同位体組成異常の起源として超新星, AGB星, 新星, 赤色巨星などの多様な星が推定されている。さらにダイヤモンドを供給した超新星とある種のグラファイトを供給した超新星は異なるかもしれない。したがって、太陽系の原物質を供給した星の数は相当数にのぼると考えられ、Alexander[14]は35-40という星の数を推定している。

もう1つの重要な情報はダイヤモンド, SiC, グラファイトはコンドライトのマトリックスに含まれるが、その含有量はコンドライトの化学グループ, 岩石学タイプときわめてよい相関を示すことである。変成・変質の進んでいないコンドライトでは、炭素質コンドライトには普通コンドライトより2-3倍多く含まれ、エンスタタイトコンドライトにも比較的多量含まれる。変成の進行とともに、それらの量は急激に減少する。従来の岩石学的な考察からは、普通コンドライトの岩石学タイプ3.0のコンドライトは集積後260°C程度まで加熱、岩石学タイプ3.4は400°C程度まで加熱されていると推定されている。この間にダイヤモンドの量はあまり変化しないが、グラファイトの量は急速に減少し、岩石学タイプ3.4のコンドライトからは検出することはできない。これは、コンドライトのマトリックスの酸化還元条件がかなり酸化的であって、グラファイトが本質的に不安定な物質であることによる。ダイヤモンドやSiCも不安定であるが、分解速度のちがいにより、グラファイトよりはやや高温まで加熱されたコンドライト中に残存していると考えられる。より還元的な鉱物からなるエンスタタイトコンドライトではそれらinterstellar dustは変成作用に対してより残りやすく、岩石学タイプ4というコンドライト中から

もSiCが見いだされる。岩石学タイプ3.0のコンドライトのマトリックスにはそのほか、有機物や炭酸塩鉱物が含まれており、マトリックスとなった物質は集積して天体をつくる以前には、基本的には高温過程をこうむっていない。

これらの観察事実から、interstellar dustは太陽系の初期にはかなり一様に（数倍以内の不均質さで）星雲内に分布し、それらはすべてのコンドライトのマトリックスにとりこまれたと考えられる。コンドリュールが1500°C以上の高温過程を経験していることを考え合わせると、マトリックス物質とコンドリュールは空間的・時間的には共存できず、マトリックス物質の一部はinterstellar dustが太陽系の加熱をいっさい被らない状態のままのものであることになる。コンドリュールとマトリックス物質がコンドライトとして集積するためには、星雲の激しい乱流が衰え天体集積がおこる段階での動径方向へのダストの移動が不可欠である[15]。星雲内の垂直方向への移動では、定常状態では物質分化をおこすことは可能であるが、ダストを集積させる非定常状態ではカラム内の動径方向成分がほとんどなければ、最終的にはすべての物質が集積してしまうため、分化をひきおこせない。コンドライト化学グループ間にみられる元素の分別（難揮発性元素とその他の元素、Mg/Si、揮発性元素、金属元素/親石元素）をふくめ、ダストの動径方向への移動にともなう分別はガスドラッグによるソーティングが有効であり、そのためには星雲ガスの存在が重要で、コンドライト母天体集積時には星雲ガスがまだ存在していたという状況が望ましい。コンドリュール形成が星雲の最後の時を刻んでいることを考えると、コンドライト母天体の形成はその直後ということになる。また、コンドライト母天体が集積した段階でのその場の星雲ガスは最高でも200°C以上の温度ではなかった。

4. 凝縮・蒸発実験

従来のコンドライトに関する岩石学、鉱物学的研究は主に地球の岩石に関してつちかわれてきた知識をもとにしているため、固相-固相の関係あるいは固相-液相の関係が主であった。しかし、星や星雲ガス内部の環境はおもに気相と固相との関係であり、物質科学の新しい分野の開拓が必要である。コンドライトからそれが経過してきた星雲の温度や圧力などの履歴を求めるために、あるいはまったくフォワードなアプローチとして、太陽系の原物質が星雲の進化にともないどのように化学的に進化し、現在観察される隕石や惑星の化学組成にいたるかを検討するには、鉱物や珪酸塩メルトが条件の変化にともないどのようなタイムスケールでどのような相変化をおこすかという情報がなくてはならない。化学平衡にもとづく相の安定関係と異なり、時間発展としての相変化は実験的に決定するしかなく、その立場から鉱物やメルトの蒸発・凝縮実験がこの10年間に精力的におこなわれてきた。蒸発速度や凝縮速度は、物質の平衡蒸気圧と固体表面での反応にともなう原子レベルの素過程のカイネティクスにより決定される。さらに、固体内の元素の移動がその速度を決めている場合もある。

実験的に蒸発あるいは凝縮の律速過程を理解し反応速度を決定する試みは、フォルステライト (Mg_2SiO_4)、かんらん石 ($(\text{Mg}, \text{Fe})_2\text{SiO}_4$)、金属鉄、トロイライト (FeS)、エンスタタイト (MgSiO_3)、珪酸塩あるいは酸化物メルトに関してなされてきた。特にフォルステライトに関しては、真空中の蒸発速度、水素ガス中の蒸発速度、それらの過程にともなう同位体の分別などについて詳細な検討がおこなわれてきた。これらの結果は現時点ではまだ限られた条件の下でのみ適用可能で、条件を限定したフォワードな検討がなされているにすぎ

ない。しかし、ある種のコンドリュールに関して、実験により決定されるメルトからのアルカリ元素特にKの同位体分別と天然のコンドリュールのそれら元素の特徴とを比較することで、星雲のガス組成、加熱冷却条件、星雲における過程と母天体における過程に関しての区別などが可能になりつつある。さらに、従来存在しないと考えられてきた主要成分 (Mg, Si, Oなど) の凝縮、蒸発過程における同位体質量分別が、アエンデ隕石のCAIの酸素同位体や[16], もっとも始原的な普通コンドリュート中のコンドリュールの酸素同位体[17]に見いだされ (図3), 高温時における開放系の元素移動を実験とをリンクさせて取り扱うことの重要性が高まっている。後者についてはコンドリュール内の元素と同位体組成の累帯構造の解析から、凝縮温度、凝縮速度が具体的に推定された。その結果は、従来組織の再現などから推定されたコンドリュールの冷却条件と調和的である。今後、凝縮にともなう元素分別係数や同位体分別係数が実験的に決定されると、凝縮時のガスの化学組成、温度、圧力などを推定することが可能となる。

5. 今後なにをすべきか

従来の惑星物質科学には、調べればなにかおもしろいことがわかるだろう、という立場でなされてきた部分が多分にある。しかしそのような方法で推定できる形成条件などはすでにほぼつくされており、断片的な条件以上の形成過程や星雲の物理化学条件を推定することは困難である。ここで紹介したことは、いずれもきわめて高い目的意識によりもたらされた結果である。従来はありえないと思われていた同位体の分別や異常を意図的に探し出したり、新しい実験装置や実験方法の開発をおこない、その結果を用いて、星雲内における化学的分別過程を時間発展とともに予測すること

を目的としたものである。惑星科学には常に未知の部分への期待が重要であるが、それをさらに押し進めるためには、いかに定量的なデータを天然の事象からどのように引き出し、それが得られればどのような予測性をわれわれがもちうるか、という戦略が必要と思われる。

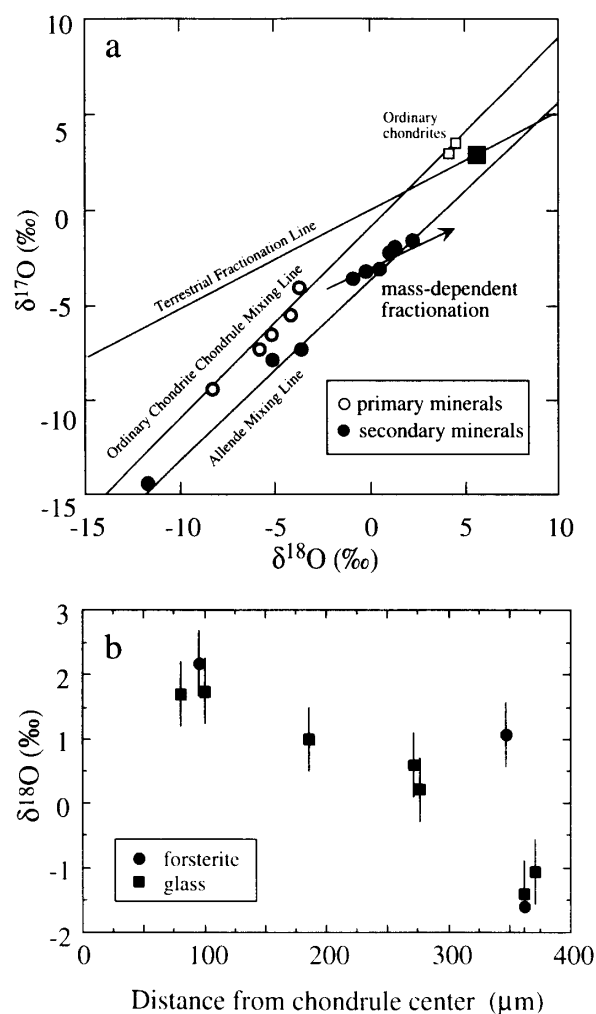


図3 コンドリュートから見出された高温時における酸素同位体質量分別の証拠。(a) アエンデ隕石のCAI, 初生的な鉱物はいわゆる“混合”線上の同位体組成を示すが、変質により生じた鉱物は質量分別線をなし (矢印), 高温過程におけるガスと固体の反応の証拠である (文献[16]より), (b) Semarkona隕石のコンドリュール。中心部から縁に向かうにつれ、結晶もガラスも酸素同位体組成が軽くなる。凝縮にともなう質量分別の証拠である (Nagahara et al., 未公表データ)。

謝辞

渡邊誠一郎氏には1999年地球惑星科学関連学会合同大会における“比較惑星系形成論”セッションにおいて講演の機会をあたえていただきました。また、原稿を査読いただき誤りを指摘していただきました。記して感謝いたします。

参考文献

- [1] Manhes, G. et al. (1998) C.R.ATP Planetol., 323.
- [2] Lee, T. and Papanastassiou, D. (1974) Geophys. Res. Lett. 1, 225.
- [3] Mac Pherson, G. J. et al. (1995) Meteoritics 30, 365.
- [4] Russell, S. S. et al. (1996) Science 273, 757.
- [5] Russell, S. S. et al. (1997) LPSC XXVIII, 1209.
- [6] Kita, N. et al. (submitted) .
- [7] Podoseck, F. A. and Nichols, R. H., Jr. (1997) in [12], 617.
- [8] Nyquist, L. E., et al. (1999) LPSC XXX.
- [9] Swindle, T. D. et al. (1996) in Chondrules and Protoplanetary Disk (Hewins, R. H. et al. eds.) , 77.
- [10] Swindle, T. D. (1998) Meteoritics Planet. Sci. 33, 1147.
- [11] Lugmair, G. W. and Shukolyukov, A. (1998) GCA 62, 2863.
- [12] “Astrophysical Implications of the Laboratory Study of Presolar Materials” (Bernatowicz, T. J. and Zinner, E. K., eds.) , IAU.
- [13] Anders, E. and Zinner, E. (1993) Meteoritics 28, 490.
- [14] Alexander, C. M. O. D. (1997) in [12] 567.
- [15] Cassen, P. and Chick, K. M. (1997) in [12] 697.
- [16] Young, E. D. and Russell, S. S. (1998) Meteoritics Planet. Sci. 33, A169
- [17] Nagahara, H. et al. (1998) LPSC XXX.