

2006年度日本地球化学会奨励賞受賞記念論文

消滅核種存在度から考える太陽系誕生環境

橘 省 吾*

(2009年8月19日受付, 2009年10月22日受理)

The forming environment of the solar system
constrained by short-lived radionuclides

Shogo TACHIBANA*

* Department of Earth and Planetary Science, University of Tokyo

The presence of several short-lived, now extinct, radionuclides in the early solar system has been confirmed through measurements of excesses of daughter isotopes that correlate with the abundances of their parent elements in cogenetic minerals in meteorites. Some of such short-lived radionuclides should have formed just prior to or soon after the solar system formation either by stellar nucleosynthesis or by energetic-particle irradiation. A short-lived radionuclide ^{60}Fe is produced only in stars and thus provides a constraint on the stellar contribution to solar system radionuclides. Clear evidence of the presence of ^{60}Fe in the early solar system has been found in various components in meteorites. The estimated initial abundance of ^{60}Fe in the solar system cannot be explained by heritage from the interstellar medium, but requires the injection of ^{60}Fe into the proto solar materials from a nearby star. Although no previous model succeeded to explain the abundances of the short-lived radionuclides (^{26}Al , ^{41}Ca , ^{53}Mn , and ^{60}Fe) by injection from a single stellar source, I propose here that a faint super nova with mixing and fallback can match the solar-system abundances of ^{26}Al , ^{41}Ca , ^{53}Mn , and ^{60}Fe suggesting that the solar system formed nearby a massive star.

Key words: Solar System, meteorite, short-lived radionuclide, supernova, stellar nucleosynthesis

1. 消滅核種

太陽系はどのように誕生, 進化し, 地球や他の惑星が生まれ, 私たち生命が誕生したのだろうか? この問いは, 太陽系に暮らす人類の根源的疑問とも言えるが, 筆者はこの問いの冒頭部分「太陽系がどのように誕生したのか」に対して, 太陽系初期に存在した消滅核種(短寿命放射性核種)から答えを得られないだろうかと考えており, 本稿では消滅核種を用いた太陽系誕生環境に関する一考察を紹介させていただく。

誕生直後の太陽系に存在したことが確認されている消滅核種(短寿命放射性核種)を Table 1にまとめ

Table 1 Short-lived radionuclides in the early solar system. Data for the estimated initial abundances are from Huss *et al.* (2009).

Parent	Half-life (Myr)	Daughter	Estimated initial abundance
^{41}Ca	0.1	^{41}K	$(1.5 \times 10^{-8}) \times ^{40}\text{Ca}$
^{36}Cl	0.3	^{36}Ar , ^{36}S	$(5 \times 10^{-6}) \times ^{35}\text{Cl}$
^{26}Al	0.73	^{26}Mg	$(5 \times 10^{-5}) \times ^{27}\text{Al}$
^{60}Fe	1.49	^{60}Ni	$((5-10) \times 10^{-7}) \times ^{56}\text{Fe}$
^{10}Be	1.5	^{10}B	$(1 \times 10^{-3}) \times ^9\text{Be}$
^{53}Mn	3.7	^{53}Cr	$(9.1 \times 10^{-6}) \times ^{55}\text{Mn}$
^{107}Pd	6.5	^{107}Ag	$(5.9 \times 10^{-5}) \times ^{108}\text{Pd}$
^{182}Hf	9	^{182}W	$(1 \times 10^{-4}) \times ^{180}\text{Hf}$
^{129}I	15.7	^{129}Xe	$(1 \times 10^{-4}) \times ^{127}\text{I}$
^{244}Pu	82	Fission Xe	$(3 \times 10^{-3}) \times ^{232}\text{Th}$
^{146}Sm	103	^{142}Nd	$(3 \times 10^{-3}) \times ^{144}\text{Sm}$

* 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻
〒113-0033 東京都文京区本郷7-3-1

る。これらの核種は、半減期が太陽系の年齢（約46億年）に比べて短く、初期太陽系には存在したが、現在はすべて娘核種に壊変してしまっている。これらの核種がかつて太陽系に存在という証拠は、親元素の量に相関した娘核種の過剰から得ることができ、その存在量の推定も可能である（例えば Kita *et al.*, 2005; Wadha *et al.*, 2007; 木多, 2008）。

消滅核種は半減期が短いため、初期太陽系で起きたさまざまなイベント間の相対年代を精度良く決定するために用いられ、惑星の材料となる微惑星の内部を加熱する熱源の候補として考えられたり、初期太陽系での物質進化の理解に大きな貢献をしてきた。本稿では、消滅核種の時計や熱源としての役割をみるのではなく、初期太陽系における消滅核種の存在度を利用して、太陽系が誕生した当時の環境を再現することを試みる。

太陽系に存在した消滅核種の起源として、(1)太陽系材料物質にもともと含まれていた、(2)太陽系形成直前に恒星でつくられ、すでに存在していた太陽系材料物質にもたらされた、(3)太陽系内で高エネルギー粒子線による核破砕反応でつくられた、などが考えられる。消滅核種の中でも半減期が数百万年を越えるものは、太陽系材料物質にもともと含まれていたと考えることが可能である（e.g., Jacobsen, 2005; 海老原, 2006; Huss *et al.*, 2009）。核種の放射壊変と宇宙で数百万年に一度程度の頻度で起こる超新星爆発による供給とが釣り合い、星間空間の物質には定常的にある割合の消滅核種が含まれるからである。比較的寿命の長い消滅核種は最後の核合成の後、分子雲の形成などを経て、数千万年から数億年後に太陽系が誕生したとすれば、その存在量を説明できる。しかし、半減期が数百万年程度のものは、その短い半減期のため、分子雲形成から初期太陽系円盤形成の間に壊変し、太陽系材料物質における存在度は極端に小さくなってしまい、初期太陽系での推定存在度を説明するには足りない。そのような核種に関しては、太陽系誕生直前または直後に、原始太陽からの高エネルギー粒子線による核破砕反応もしくは太陽系近傍星での元素合成によってつくられる必要がある。すなわち、消滅核種の存在度から、原始太陽の状態、原始太陽系円盤内での物質の分布や形成過程など原始太陽系円盤環境に関する情報や、太陽系近傍に存在した恒星のサイズや太陽系からの距離など太陽系が誕生した場に関する情報を引き出すことが期待される。このような期待のもと、太陽系に

存在した ^{26}Al , ^{41}Ca , ^{53}Mn などの存在度などを用いて、太陽系誕生環境にどのような恒星が存在したかという議論がおこなわれ、太陽程度の小質量星の進化末期の段階である漸近巨星分岐（AGB）星、太陽の10倍以上の質量を持つ大質量星の最期である超新星爆発など様々な供給源が提案されてきた（e.g., Cameron *et al.*, 1995; Wasserburg *et al.*, 1994; Sahijpal and Soni, 2006; Huss *et al.*, 2009）。しかし、消滅核種の多くは、高エネルギー粒子線による核破砕反応、恒星内元素合成の両者のプロセスで形成することが可能で、単純にそれらの存在度から原始太陽系円盤環境、太陽系誕生環境の情報を分離して得ることは難しく、これまで推定されてきた太陽系誕生環境も確定的な議論とはなっていなかった。この問題を解決するためには、どちらかの過程でのみ効率的に合成される核種を利用する必要がある。 ^{10}Be は恒星内元素合成でつくることが難しく、高エネルギー粒子線による核破砕反応でつくられるものがほとんどと考えられるため（e.g., McKeegan *et al.*, 2000）、 ^{10}Be の存在度や太陽系物質における分布は、原始太陽の活動度や原始惑星系円盤環境を反映しているだろう。太陽系誕生環境を推定するためには、寿命が短く恒星内元素合成でのみ効率的に合成される核種に着目する必要がある。太陽系に存在したと確認されている消滅核種の中で、この条件を満たす核種は唯一 ^{60}Fe である。 ^{60}Fe は核破砕反応でつくられるには適当なターゲット核種が十分に存在せず、高エネルギー粒子線照射では大量にはつくられない（e.g., Lee *et al.*, 1998）。したがって、太陽系に消滅核種をもたらした恒星を明らかにし、太陽系誕生環境を推定するためには、太陽系における ^{60}Fe 量を見積もることが鍵になると考えられる。太陽系物質中に ^{60}Fe 存在の証拠を求めて、これまでおこなわれてきた研究を次節で紹介する。

2. ^{60}Fe をめぐる研究

^{60}Fe は半減期150万年で、 ^{60}Co を経て ^{60}Ni に β^- 壊変する。（Rugel *et al.* (2009) によって、半減期262万年という報告が最近なされたが、以降の議論には大きな影響を与えない。）現在の太陽系には存在しない ^{60}Fe が過去にあったことを示すために、通常は対象物質中のFe/Ni比と ^{60}Ni 同位体存在度の相関を見る。対象物質（または物質群）が形成された時点で、 ^{60}Fe が存在していたとすると、Fe/Ni比が高い部分（または物質）ほど ^{60}Fe を多く含み、結果として ^{60}Ni がより多く

過剰として検出されることになる。例えば、 ^{60}Fe 存在の証拠の検出のためには、試料の $^{56}\text{Fe}/\text{Ni}$ 比、 $^{60}\text{Ni}/\text{Ni}$ 比 ($^{\text{Ni}}$ は ^{60}Ni 以外のNiの安定同位体)を測定し、両者に正相関がある場合には、 $^{56}\text{Fe}/\text{Ni}$ - $^{60}\text{Ni}/\text{Ni}$ プロット(アイソクロン図)上でのデータ点がつくる直線の傾きが安定同位体 ^{56}Fe に対する ^{60}Fe の相対存在度ということになる(e.g., 木多, 2008)。

太陽系に ^{60}Fe が存在した可能性は、太陽系最古の年代を示す難揮発性包有物(CAI: Ca-, Al-rich Inclusions)中に ^{60}Ni の過剰が見つかったことで初めて指摘された(Birck and Lugmair, 1988)。推定されたCAI形成時の ^{60}Fe の存在度は、安定同位体 ^{56}Fe に対する相対存在度として $^{60}\text{Fe}/^{56}\text{Fe} = (1.6 \pm 0.5) \times 10^{-6}$ と報告された。しかし、この ^{60}Ni の過剰はFe/Ni比との相関が確かめられたわけではなく、また、 ^{62}Ni 、 ^{64}Ni といった他の安定同位体存在度の異常を伴っており、 ^{60}Fe の壊変によって生じた ^{60}Ni の過剰ではなく、太陽系材料物質の同位体の不十分な均質化によって残った太陽系形成以前の核合成の名残を見ている可能性がある(Shukolyukov and Lugmair, 1993 a)。

^{60}Fe の存在が初めて明らかになった太陽系物質は、分化した玄武岩質隕石ユークライトであった(Shukolyukov and Lugmair, 1993 a, 1993 b, 1996)。Chervony Kut隕石とJuvinas隕石で見積もられた ^{60}Fe の存在度はそれぞれ $^{60}\text{Fe}/^{56}\text{Fe} = (3.9 \pm 0.6) \times 10^{-9}$ 、 $(4.3 \pm 1.5) \times 10^{-10}$ でCAIに見積もられた値よりかなり低く、また、両隕石間で存在度が一桁異なっていた。Chervony Kut隕石とJuvinas隕石は ^{53}Mn の存在度が誤差の範囲で一致し(Lugmair and Shukolyukov, 1998)、同時期に分化したと考えられることから、 ^{60}Fe の存在度の相違はおそらく ^{60}Fe - ^{60}Ni 同位体系がユークライト分化後に変成などで乱されたことを示唆する。この二次的な変成作用(衝撃変成と言われている)がいつ起きたか不明であるため、太陽系に ^{60}Fe が存在したことは確認されたものの、太陽系誕生時の ^{60}Fe 存在度についてははっきりとした結論が得られなかった。

その後、より始源的な隕石であるコンドライト中に含まれる硫化鉄のバルク分析やコンドリユール(ケイ酸塩からなる<1 mmサイズの球粒物質で初期太陽系円盤において溶融ケイ酸塩の冷却によってつくられたと考えられる)中のオリビンの二次イオン質量分析計による局所分析によって、 ^{60}Fe 存在の証拠の探索がおこなわれたが(Kita *et al.*, 1998, 2000; Choi *et al.*,

1999)、いずれも ^{60}Fe 存在に関する明瞭な証拠(Fe/Ni比と正相関した ^{60}Ni の過剰)は発見されず、 ^{60}Fe 存在度の上限值が得られるだけであった($^{60}\text{Fe}/^{56}\text{Fe} < 2.4 \times 10^{-8} \sim 1.7 \times 10^{-6}$)。

このような状況の中、Tachibana and Huss (2003)は、隕石中の硫化鉄が多くの場合、共存する鉄ニッケル合金にNiが分配されるためNi含有量が低くなり、硫化鉄の局所同位体分析によって ^{60}Fe の壊変でつくられる ^{60}Ni を大きな過剰として検出できる可能性があることに着目し、最も熱変成の程度が低く、極めて始源的と考えられる普通コンドライトであるBishunpur隕石、Krymka隕石中の硫化鉄に ^{60}Fe 存在の痕跡を求めた。Ni同位体分析は、アリゾナ州立大学の二次イオン質量分析計Cameca ims-6fを用いておこなった。彼らが分析をおこなった硫化鉄は、先行研究(Kita *et al.*, 1998, 2000; Choi *et al.*, 1999)で測定されたオリビンに比べて、Fe/Ni比が数10倍大きく、Fe/Ni比と正の相関を持った ^{60}Ni の過剰を検出することに成功した(Fig. 1)。同時期に、Mostefaoui *et al.* (2003)も二次イオン質量分析計を用いて、極めて始源的な普通コンドライトであるSemarkona隕石中の硫化鉄、磁鉄鉱に ^{60}Ni の過剰を検出した。これらは始源隕石コンドライトにおける ^{60}Fe 存在の証拠の初めての発見である。しかし、硫化鉄から推定された ^{60}Fe 存在量は、 $^{60}\text{Fe}/^{56}\text{Fe} = 1.1 \times 10^{-7} \sim 1.7 \times 10^{-7}$ (Tachibana and Huss, 2003)、 $^{60}\text{Fe}/^{56}\text{Fe} = (0.92 \pm 0.24) \times 10^{-6}$ (Mostefaoui *et al.*, 2003, 2005)で一桁程度の相違がある。Tachibana and Huss (2003)が測定した硫化鉄は隕石母天体でかなり穏やかではあるが熱変成を受けており、硫化鉄中のFe、Ni拡散が速いことを考えると(Condit *et al.*, 1974; Lauretta, 2005)、 ^{60}Fe - ^{60}Ni 同位体系は母天体形成以降の熱変成のタイミングを記憶している可能性がある(Guan *et al.*, 2004; Mostefaoui *et al.*, 2005)。一方、Mostefaoui *et al.* (2003, 2005)が測定した硫化鉄は隕石母天体で水質変成を受けており、Feが硫化鉄から失われ、磁鉄鉱を新たに形成するのに使われた可能性があり、結果として、アイソクロンの傾きが急になり、 ^{60}Fe の存在度が見た目に高くなっていることも考えられる。Mostefaoui *et al.* (2003, 2005)は磁鉄鉱に関して、 $^{60}\text{Fe}/^{56}\text{Fe} = 1.4 \times 10^{-7}$ という存在度を報告しており、これが母天体での水質変成時の ^{60}Fe 存在度を示していると考えられる。

このように硫化鉄から太陽系誕生時の ^{60}Fe 存在度を

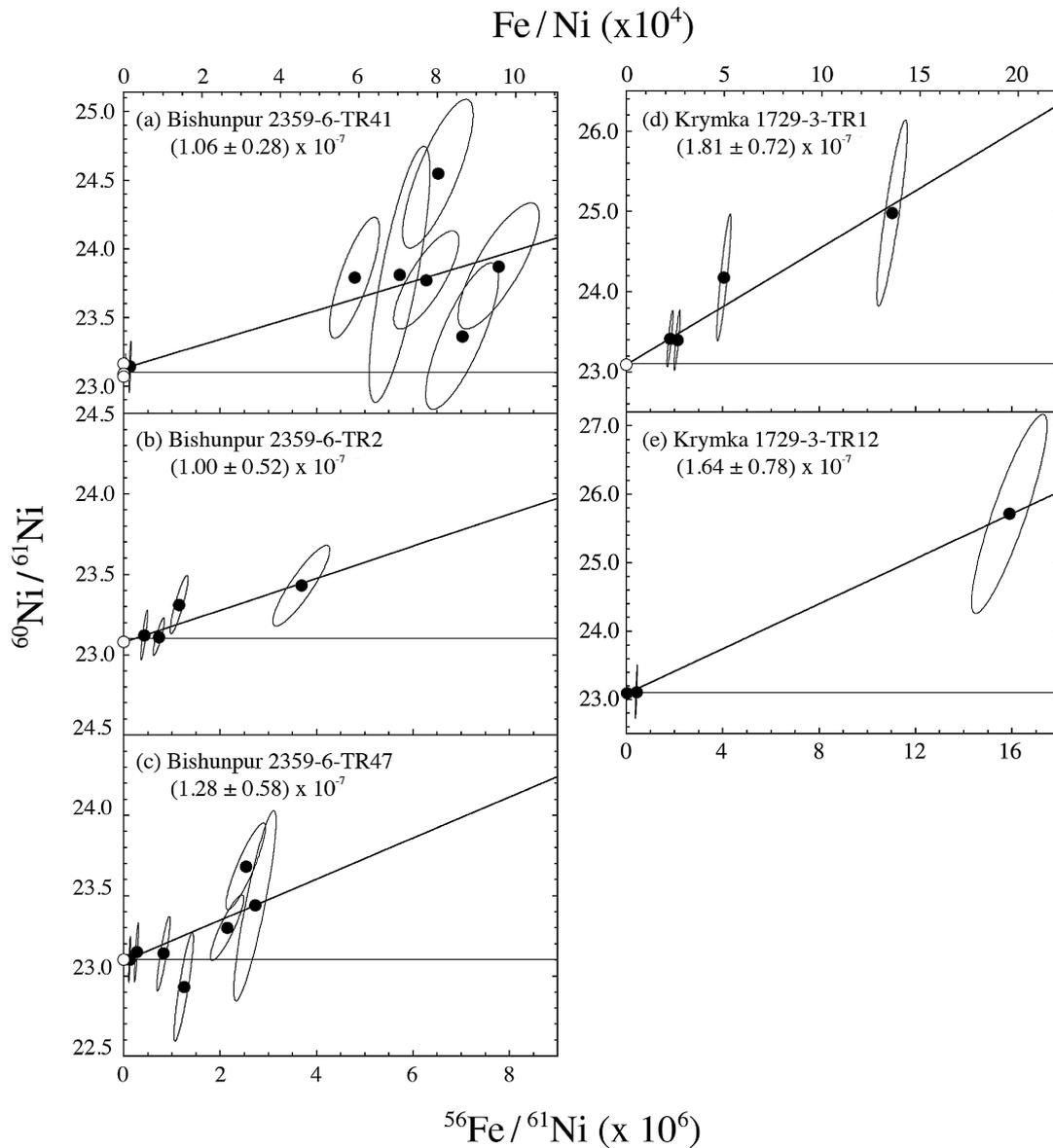


Fig. 1 ^{60}Fe - ^{60}Ni isotopic systematics for five troilite grains (filled circles) and associated metal (open circles) from least equilibrated ordinary chondrites (Bishunpur and Krymka) (Tachibana and Huss, 2003). The 2σ uncertainty for each data point is shown as an error ellipse. The solid lines are error-weighted least-squares fits through the data, and the slopes that are the $^{60}Fe/^{56}Fe$ ratios at the time were closed are also shown.

推定することには問題点があるが、これらの研究で示された ^{60}Fe 存在度はユークライトから報告されたものより二桁から三桁高いことは明らかで、 ^{60}Fe が太陽系近傍の恒星から太陽系誕生直前または直後にもたらされたことを明瞭に示す重要な証拠となった。

太陽系誕生時の ^{60}Fe 存在度を求めるために、Tachibana *et al.* (2006) は硫化鉄より熱変成に強いケイ酸塩鉱物に注目し、コンドリュールのNi同位体

分析をおこなった。過去の研究ではコンドリュール中のオリビンを分析対象としていたが、ここではオリビンより Fe/Ni 比が一般に高いlow-Caパイロキシンを分析対象とした。二次イオン質量分析計Cameca ims-1270を用いた分析によって、low-Caパイロキシンの富むコンドリュールにも ^{60}Fe 壊変による ^{60}Ni の過剰を検出することに成功した (Fig. 2)。推定された ^{60}Fe 存在度は4つのコンドリュールに関して、 $^{60}Fe/^{56}Fe =$

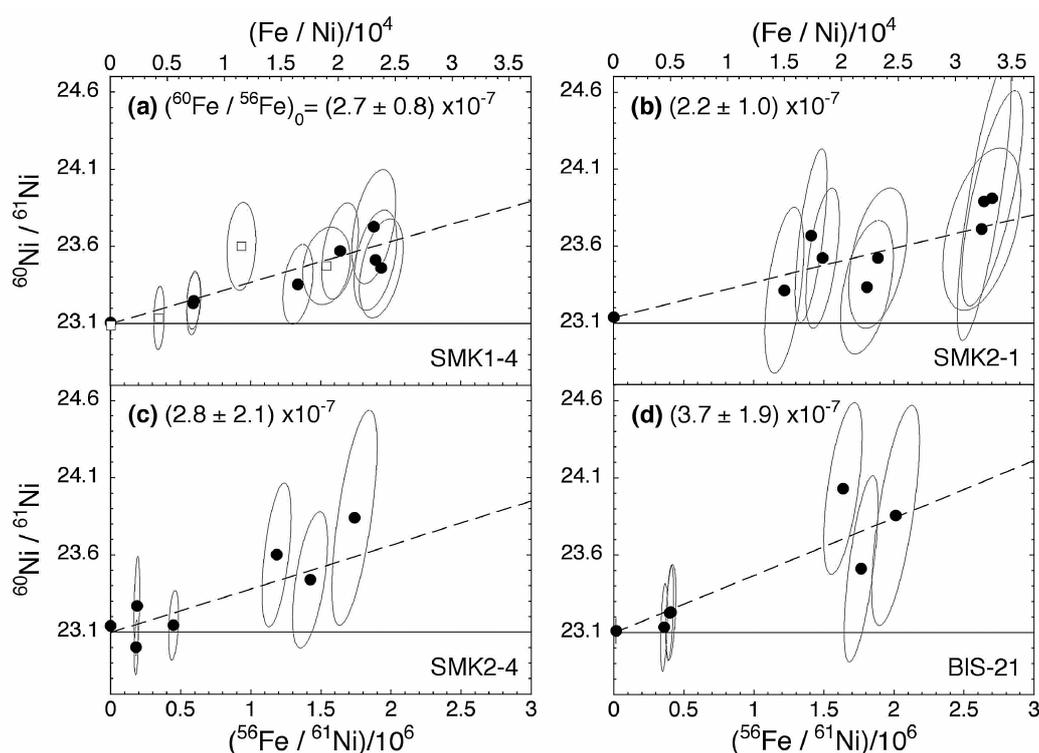


Fig. 2 Isochron diagrams of ^{60}Fe - ^{60}Ni system in FeO-rich pyroxene chondrules in Semarkona (SMK 1-4, 2-1, and 2-4) and Bishunpur (BIS-21) (Tachibana *et al.*, 2006). Error ellipses represent 2σ uncertainties. The dashed lines are error-weighted least-squares fits through the data, and the slopes that are the $^{60}\text{Fe}/^{66}\text{Fe}$ ratios at the time were closed are also shown.

$(2.2\text{-}3.7) \times 10^{-7}$ であった。この推定値は、Tachibana and Huss (2003) が報告した硫化鉄中の存在度よりは大きく、Mostefaoui *et al.* (2003, 2005) による硫化鉄の推定値よりは小さい。硫化鉄中の ^{60}Fe - ^{60}Ni 同位体系の熱変成、水質変成への脆弱性を考えると、コンドリュールに求められた推定存在度が現時点で最も信頼できる ^{60}Fe 存在度であると言える。コンドリュールは太陽系最古の物質 CAI から100~200万年後まで形成が続いたと考えられるため (e.g., Kita *et al.*, 2000), CAI 形成時に遡った太陽系での ^{60}Fe 存在度は $^{60}\text{Fe}/^{66}\text{Fe} = (5\text{-}10) \times 10^{-7}$ と推定される (Tachibana *et al.*, 2006)。その後、Tachibana *et al.* (2007, 2009) はオリビンを含んだコンドリュールに関して、ハワイ大学ケック宇宙化学研究施設の二次イオン質量分析計 Cameca ims-1280を用いて分析を進め、オリビンを含むコンドリュールにも ^{60}Ni の過剰があり、Tachibana *et al.* (2006) がパイロキシンに富んだコンドリュールから推定した ^{60}Fe 存在度と整合的な量の ^{60}Fe が存在したことを示した。しかし、オリビンは

一般に Fe/Ni 比がパイロキシンに比べて低いため、分析精度を越えて、過剰を検出できなかったコンドリュールもあり、今後、分析手法の改良を含め、検討が必要である。

3. ^{60}Fe の起源

前節までに述べたように、近年推定されている ^{60}Fe の初期太陽系存在度は、星間空間に定常的に存在している ^{60}Fe を太陽系が取り込んだ程度では説明できず、また高エネルギー粒子による核破碎反応でも説明は難しいことから、太陽系形成直前または直後の恒星内元素合成による ^{60}Fe の供給を必要とする。本節では、太陽系に存在した ^{60}Fe をはじめとする消滅核種の供給源となった恒星の候補を紹介する。

太陽程度の質量を持った恒星は進化末期に赤色巨星段階を経て、外層からの質量放出を伴う漸近巨星分岐 (AGB) 星段階に到達する。太陽系の消滅核種の供給源として提案されてきたが (e.g., Wasserburg *et al.*, 1994), 近年の ^{60}Fe の推定存在度の更新によっ

て、 ^{60}Fe を多く供給できない太陽質量程度のAGB星は太陽系消滅核種の供給源としてはふさわしくない。中程度質量(太陽質量の3~5倍)のAGB星であれば、 ^{60}Fe 量も説明可能であることが示唆されている(Wasserburg *et al.*, 2006)。しかし、低中質量星の寿命は長く、その進化末期段階であるAGB星が恒星誕生の場に存在する確率は極めて低く($<3 \times 10^{-6}$; Kastner and Meyers, 1994)、太陽系がよほど特殊な環境で誕生しない限り、AGB星は消滅核種の供給源としては考えにくい。また、AGB星の場合、太陽系の ^{53}Mn 存在度も説明できないという問題もある。

太陽質量の10倍を越える恒星の場合、恒星は中心核で最も安定な質量数56の原子核まで合成した段階でそれ以上の中心核での核合成が進まず(核子間の平均結合エネルギーが質量数56の核種で最大で、すな

わち質量数56の核種が最も安定)、外層の中心核への落下および中心核による反跳によって、星のほとんどを吹き飛ばす大爆発が起こり、恒星は死を迎える(II型超新星爆発)。II型超新星爆発は重元素の合成もおこなわれるため、太陽系消滅核種の供給源として有望視されてきた。実際、II型超新星爆発での元素合成モデルを用いると、爆発後約100万年経過後、1太陽質量の太陽系物質に対して超新星物質が 10^{-4} 程度混入されれば、太陽系の ^{60}Fe 推定存在度を説明可能であることが示される(Fig. 3 a~d) (e.g., Takigawa *et al.*, 2008)。太陽系に存在した半減期の短い他の消滅核種 ^{26}Al や ^{41}Ca の量もおおよそ説明することもできるが、推定存在度をはるかに越える量の ^{53}Mn が太陽系に持ち込まれることになってしまい、消滅核種供給源としてのII型超新星爆発の欠点となっている。ま

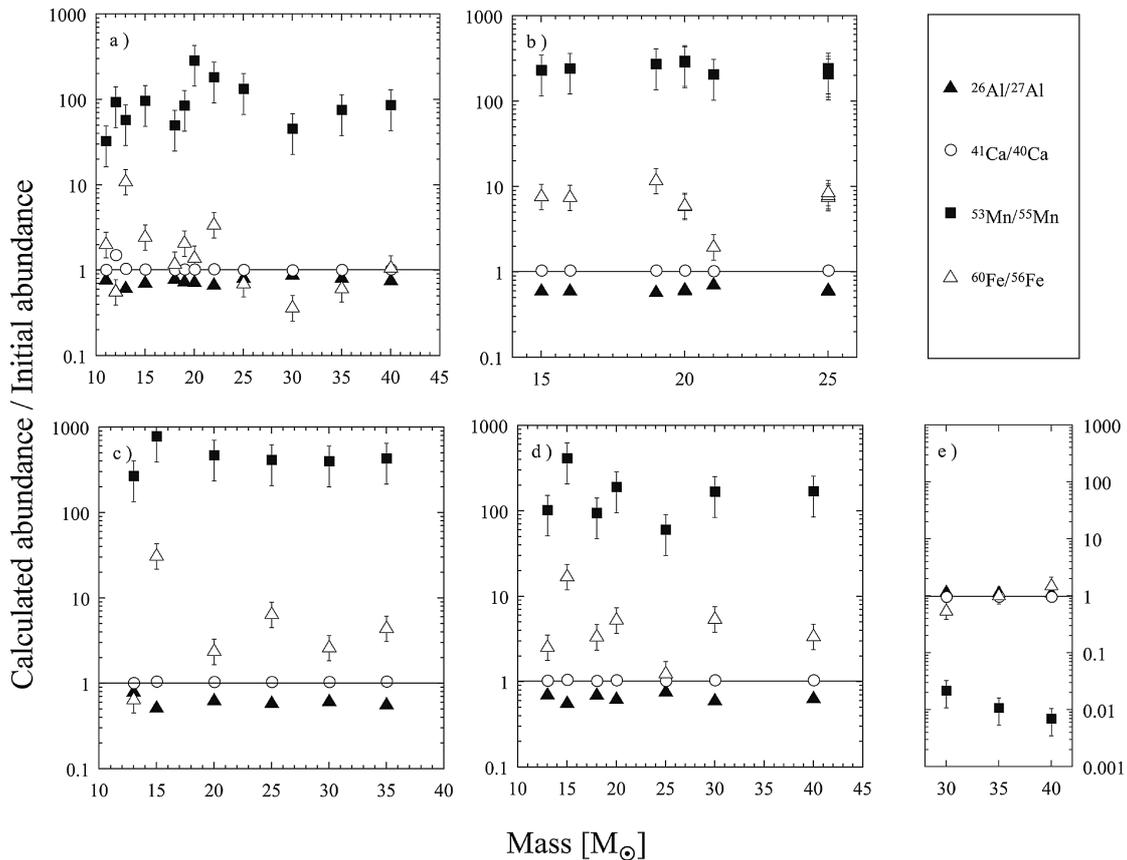


Fig. 3 Calculated initial abundances of ^{26}Al , ^{41}Ca , ^{53}Mn , and ^{60}Fe for normal-type supernovae (a-d) and fallback supernovae (e) as a function of the stellar mass (Takigawa *et al.*, 2008). The initial abundances are normalized to those estimated for the initial solar system. Nucleosynthesis models for normal-type (non-fallback) supernovae are (a) Wosley and Weaver (1995), (b) Rauscher *et al.* (2002), (c) Chieffi and Limongi (2004), and (d) Nomoto *et al.* (2006). Nucleosynthesis models for fallback supernovae are from Wosley & Weaver (1995).

た、 ^{60}Fe 供給量が ^{26}Al に比べて相対的に多くなるという問題も生じてしまう (Fig. 3 a~d)。

^{53}Mn の過剰供給に対して、Meyer and Clayton (2000) や Meyer (2005) は Fallback 型超新星爆発モデルを提唱した。特に質量の大きな星で、超新星爆発による放出物が持つ運動エネルギーが小さい場合 (10^{44}J)、放出物が中心核の重力で引き戻され (fallback)、外に放出されないことになる。超新星爆発は ^{56}Ni が ^{56}Co を経て ^{56}Fe に壊変する際に発生する γ 線によって放出物質が加熱されて輝くが、このような放出物の運動エネルギーの小さな超新星は中心核でつくられる ^{56}Ni の放出が少ないため、放出物の加熱効果も弱く、暗い超新星 (faint supernova) として観測される。暗い超新星爆発では、中心核の境界付近で Si の不完全燃焼によってつくられる ^{53}Mn は、他の核種よりも形成領域が内側のため、fallback の影響を受けやすく、外への放出が抑えられる。ただし、 ^{53}Mn の主形成領域は狭いため、fallback モデルの場合、 ^{53}Mn はほとんど放出されないことになり (Fig. 3 e)、太陽系への ^{53}Mn の供給源を他に求める必要がある。また、 ^{60}Fe 供給量が ^{26}Al に比べて相対的に多くなるという問題はこの場合も解決しない。

I a 型超新星 (連星系で白色矮星に伴星から質量が流入することで、白色矮星中心での元素合成が進み、超新星爆発を起こす) で、消滅核種存在度を説明しようとする試みもなされている (e.g., Sahijpal and Soni, 2006)。しかし、I a 型超新星爆発は白色矮星まで進化した低質量星を含む連星系で起こるため、AGB 星と同様、星形成領域に存在する確率は極めて低く、太陽系への消滅核種の供給源であった可能性は極めて低いと思われる。

4. Mixing-Fallback 型超新星による消滅核種供給の可能性

Takigawa *et al.* (2008) は、従来の恒星モデルの問題点を解決しうる新たな超新星元素合成モデルとして、Mixing-Fallback 型の暗い超新星爆発を提案した。Mixing-Fallback 型暗い超新星爆発モデルは、宇宙に存在する超金属欠乏星の中でも特に金属量の少ない星 (Fe/H 比が太陽系の10万分の1程度で宇宙初期に形成されたと考えられる) の元素存在度をよく説明するモデルとして注目されている (e.g., Umeda and Nomoto, 2003; Nomoto *et al.*, 2006)。

Mixing-Fallback 型の暗い超新星爆発の場合も中心

核近傍からの放出物の多くが中心核へと引き戻され、Fallback 型超新星爆発と同様の暗い超新星爆発となるが、放出物が fallback する前に放出物の層構造が混合 (mixing) によって壊れることを考慮に入れる点で Fallback 型超新星爆発と異なる (Fig. 4)。すなわち、Mixing-Fallback 型超新星爆発では、(1) 中心核近傍の放出物が Rayleigh-Taylor 不安定によって、外層からの放出物と混合する。混合領域の外側境界は、超金属欠乏星の元素存在度を説明するためには、炭素—酸素燃焼領域内もしくはヘリウム燃焼層の底部にあると考えられる (Iwamoto *et al.*, 2005; Nomoto *et al.*, 2006)。(2) 混合領域内に存在する物質のほとんどは中心核に引き戻され落下するが、ごく一部は外へと放出される。観測される暗い超新星が放出する ^{56}Ni 量の見積もりから、放出率は0.01~0.001程度が妥当と考えられる。

Mixing-Fallback 型超新星爆発モデルで新たにパラメータとして導入されるのは、混合領域境界および混合領域からの放出率である。それら2つのパラメータおよび恒星の質量を変化させ、消滅核種 ^{26}Al 、 ^{41}Ca 、 ^{53}Mn 、 ^{60}Fe の存在度を推定した結果を Fig. 5に示す。推定の際には、太陽系におけるこれらの核種存在度とモデル推定値との差が最も小さくなるように、太陽系物質への混合比および爆発から CAI 形成までの時間差が決定される (推定法の詳細は Takigawa *et al.* (2008) を参照)。恒星質量、混合領域境界、放出率の3つを変化させても、混合領域が炭素—酸素燃焼層内に存在する限り、Mixing-Fallback の物理パラメータに大きく依存せず、初期太陽系に存在した ^{26}Al 、 ^{41}Ca

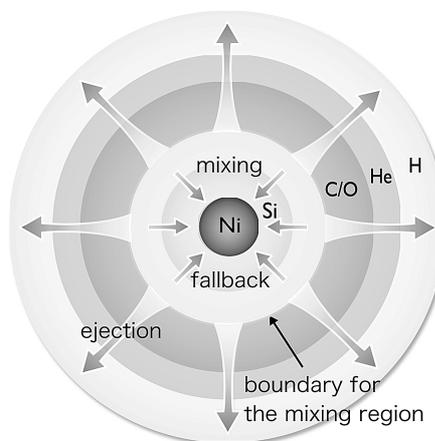


Fig. 4 Schematic illustration of a faint supernova with mixing-fallback.

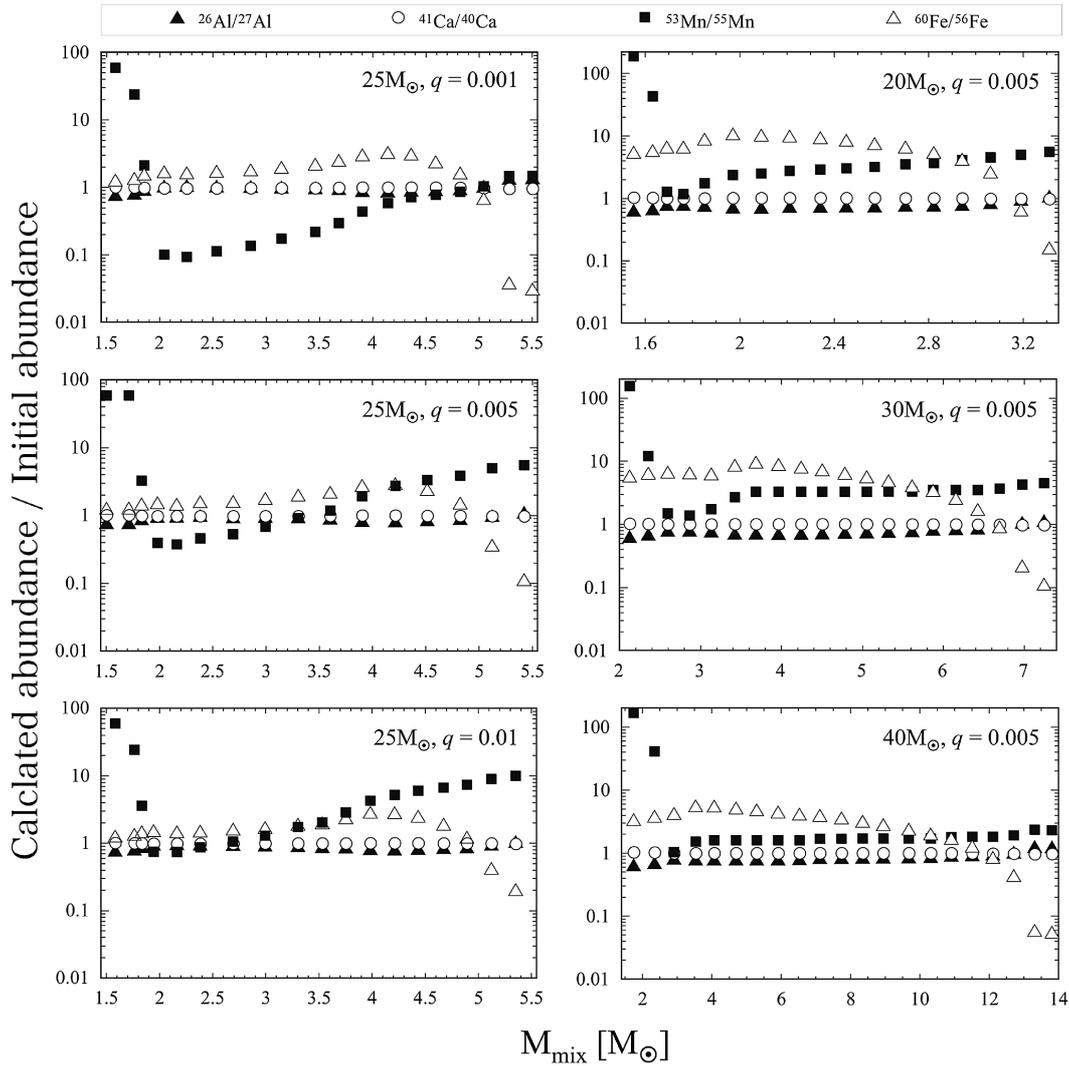


Fig. 5 Calculated initial abundances of ^{26}Al , ^{41}Ca , ^{53}Mn , and ^{60}Fe for supernovae with mixing fallback with different mixing-fallback conditions (Takigawa *et al.*, 2008). M_{mix} and q represent the outer boundary for the mixing-fallback region and the ejection efficiency from the mixing-fallback region. The dilution factor ranges from 7×10^{-5} to 2×10^{-3} , and the time interval ranges from 0.8 to 1.1 Myr. Dotted and dashed lines show the boundaries between the Si-burning and C/O-burning layers and between the C/O-burning and the He-burning layers, respectively.

Ca, ^{53}Mn , ^{60}Fe の存在度をうまく説明できることがわかった (Fig. 5, 6)。これまでの超新星爆発モデル (Fig. 3) に見られた (1) ^{53}Mn の過剰もしくは欠乏, (2) ^{26}Al に比べて高い ^{60}Fe 存在度, という問題点が解消されていることがわかるだろう。 ^{53}Mn 量が過不足なく説明可能となったのは, 混合の結果, Fallback 領域の一部が放出されるためである。また, ^{26}Al と ^{60}Fe の相対存在度の問題が解消されたのは, ^{26}Al と ^{60}Fe の主たる形成領域の違いに起因する。炭素—酸素燃焼

層で主に合成される ^{60}Fe に対し, ^{26}Al は水素またはヘリウム燃焼層で合成されるため, ^{26}Al は Mixing-Fallback の影響を受けず, ^{60}Fe に比べて存在度が増加し, $^{60}\text{Fe}/^{26}\text{Al}$ 比が従来のモデルに比べて小さくなり, 太陽系の推定値に近くなるからである。また, Mixing-Fallback 型超新星爆発モデルで予測される超新星放出物の太陽系物質 (1太陽質量) への混合比は $(1-4) \times 10^{-4}$ 程度, 爆発から CAI 形成までの時間差が約 0.8~1 Myr で, これまでの超新星爆発モデルと大

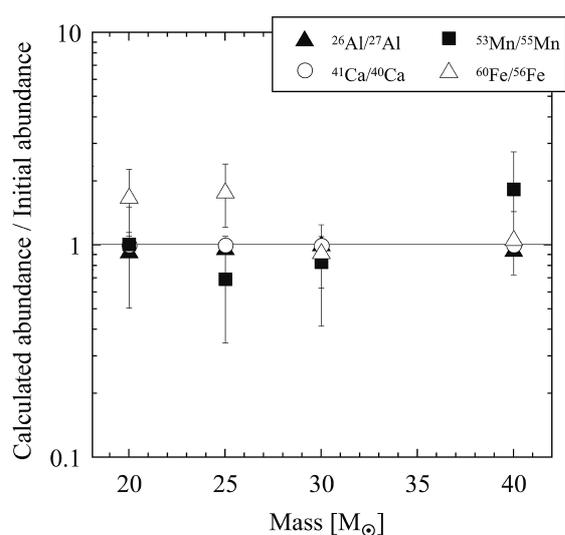


Fig. 6 Best estimates for the abundances of ^{26}Al , ^{41}Ca , ^{53}Mn , and ^{60}Fe in models for faint supernovae with mixing fallback (Takigawa *et al.*, 2008).

大きく変わらない。

5. 太陽系誕生環境

前節で紹介した Mixing-Fallback 型超新星爆発モデルで予測される超新星物質の混合比、爆発から CAI 形成までの時間差をもとに、太陽系が誕生し進化した環境について本節で考えてみたい。

超新星からの放出物質は、太陽系誕生以前の分子雲コア (~ 1 太陽質量, 半径 ~ 0.1 パーセク [1 パーセク = 3.26 光年]), もしくは誕生直後の原始惑星系円盤 (~ 0.01 太陽質量, 半径 100 天文単位) に混入する可能性がある。前者は、古くから提案されている超新星爆発が分子雲コアの収縮に始まる太陽系誕生の引き金となったとする説 (e.g., Cameron and Truran, 1977; Vanhala and Cameron, 1998) に対応する。後者は、多くの低質量星が大質量星の周囲で強い紫外線照射で分子雲コアが収縮し、原始星および原始惑星系円盤が形成 (誘発的星形成) される様子が観測されてきたことや (e.g., Hester and Desch, 2005), 太陽系物質に ^{60}Fe が混入した時にはすでに原始太陽系円盤が存在した可能性 (Bizzarro *et al.*, 2007) に対応するものである。

超新星爆発の放出物が球対称に広がるとする。放出物の太陽系物質への混合比は、超新星と太陽系物質との距離 (R) を半径とする球面に占める分子雲コアもしくは原始太陽系円盤の捕獲断面積の割合、すなわち

立体角に比例することになる。また、分子雲コアもしくは原始太陽系円盤に到達した物質が実際取り込まれる割合 (f) にも比例し、 f は分子雲コア、原始太陽系円盤に対してそれぞれ ~ 0.1 (Vanhala and Boss, 2002), ~ 1 (Ouellette *et al.*, 2005, 2009) と見積もられている。前節で見積もられた太陽系物質への混合比を用い (1 太陽質量に対しての見積もりのため、原始惑星系円盤への混入の場合には質量の補正をおこなう), 超新星と太陽系物質との距離 (R) を求めると、分子雲コアへの混入の場合、 $R \sim 2\text{--}5$ パーセク、原始太陽系円盤の場合には $R \sim 0.3\text{--}0.8$ パーセクとなる (Takigawa *et al.*, 2008)。

大質量星の周囲に低質量星が形成されている誘発的星形成領域の観測によると (e.g., Niwa *et al.*, 2009), 大質量星から 1 パーセク以内に多数の原始惑星系円盤の存在が、また数パーセク程度離れた領域に複数の分子雲コアの存在が確認されており、本節で見積もられた R の値は誘発的星形成領域の観測と矛盾しない。

以下、超新星放出物が原始太陽系円盤に取り込まれる場合、分子雲コアに取り込まれる場合それぞれについて、超新星爆発からの経過時間を踏まえて、太陽系の誕生と進化について考えてみる。

誘発的星形成領域では大質量星からの放射が周囲の分子雲ガスを外へ押しだし、電離水素からなる希薄な HII 領域を形成する。HII 領域の周縁部では分子雲ガスが圧縮され、星形成が引き起こされる。このようにして、大質量星から $0.3\text{--}0.8$ パーセクの位置で、大質量星からの放射で分子雲コアが収縮し、原始太陽とそれを取り巻く原始太陽系円盤が誕生したと考えても観測とは矛盾しない。 $0.3\text{--}0.8$ パーセクの近距離であっても、原始惑星系円盤はその後の超新星爆発の衝撃波によって破壊されることはないと考えられている (Ouellette *et al.*, 2005, 2009)。太陽程度の質量の恒星の 70% 以上がこのような誘発的星形成領域で誕生するとも言われており (Lada and Lada, 2003), 太陽系も一般的な星形成過程を経て、誕生した可能性が高いことになる。この場合、 ^{60}Fe をはじめとする消滅核種が太陽系にもたらされる頃には円盤は誕生からおそらく 100 万年程度 (\sim 大質量星の寿命) 経過していただろう。超新星からの放出物は爆発直後に円盤にもたらされるため、爆発から CAI 形成までに約 $0.8\text{--}1$ Myr という経過時間が必要であるとすると、CAI 形成は原始惑星系円盤の活動後期 (受動的円盤) とな

り、CAI 形成に十分な熱源が何であったかという問題が残る。もしくは、CAI が200万年間つくられ続け、年代情報が凍結された最後の CAI 形成イベントが円盤形成から~200万年後であったという可能性も考えられる。

一方、大質量星周囲で分子雲コアが崩壊し、それと同時に消滅核種がもたらされる場合を考える。大質量星は輻射によって100~200万年で HII 領域を数パーセクまで広げる (e.g., Stahler and Polla, 2004)。大質量星から1~2パーセクの距離にある分子雲コアの場合、輻射による分子雲コアの崩壊とほぼ同時期に超新星爆発が起こり、放出物が収縮中の分子雲コアにもたらされたと考えることも可能である。この場合、CAI 形成は分子雲コア崩壊から1 Myr 以内となり、CAI 形成時期は原始太陽系円盤の活動期に対応し、十分な熱源もあったのではないかと考えられる。超新星からの衝撃波が分子雲の中を通過しながら減速し、数パーセク離れた分子雲コアの崩壊を引き起こしたというケースも考えられるが (Vanhala and Cameron, 1998)、大質量星の周囲に希薄な HII 領域が広がっている誘発的星形成領域の観測例には合わない。

誘発的星形成領域では、恒星集団の重力的束縛が弱く、3000万年程度もしくはそれより短い時間で散逸してしまうと推定される (e.g., Preibisch and Zinnecker, 2007)。太陽質量の30~40倍程度の大質量星は寿命が数百万年から1000万年程度であり、恒星の集団が散逸する以前に太陽系物質に超新星放出物を混入させることは可能であったろう。

本稿の議論だけでは、超新星からの消滅核種が太陽系のもととなった分子雲コアに消滅核種が混入したのか、原始太陽系円盤に混入したのか、はっきりとしない。その原因は、我々が太陽系最古の物質である CAI 形成の年代 (4567.11 ± 0.16 Ma; Amelin *et al.*, 2009) を知っているにもかかわらず、それが原始太陽系進化のいずれのステージであったかを明確に位置づけられないことにある。高温イベントが起こった可能性の高い円盤進化の初期に CAI が形成されたと考えられる場合が多いが、今後の宇宙化学分野の進展により、それが明らかにされることを期待したい。ただし、消滅核種の混入が分子雲コア・原始太陽系円盤のどちらであったにしろ、誘発的星形成領域での太陽系誕生の可能性を示し、太陽系は宇宙における一般的星形成環境である誘発的星形成領域で誕生した可能性が高いと考えられる。

このように大質量星が近傍に存在するような環境で産まれる惑星系の場合、その進化にも外的環境の影響は無視できないであろう。これまで惑星形成論は太陽系が孤独に誕生したかのように考え、外的環境の影響をほとんど考慮せずに構築されてきた。原始太陽とその周囲の初期太陽系円盤をひとつのシステムとして捉えてきたと言える。しかし、外部からの紫外線や宇宙線によって起こる分子雲や円盤表層での化学反応が水素、酸素などの元素の同位体分別を引き起こしたり (e.g., Yurimoto and Kuramoto, 2004; Lyons and Young, 2005)、近傍星からの強力な輻射が光蒸発による円盤ガスの散逸を促したりといったことが起こり、その後の惑星物質の進化や惑星の多様性を変化させるだろう。すなわち、太陽系の初期進化、惑星の誕生に関して、我々が考えるべきシステムは外部の恒星も含めた誘発的星形成領域なのである。孤独ではなかった太陽系の進化に対して外部環境が果たした役割について今後の研究の進展が待たれる。

6. 終わりに

本稿では、太陽系初期に存在した消滅核種の種類や存在度から太陽系誕生環境を推定する試みを紹介した。特に初期太陽系における ^{60}Fe の存在は、太陽系誕生直前もしくは直後に超新星爆発による元素合成および超新星放出物の太陽系物質への混入を示すものである。太陽系への消滅核種の供給源として、Mixing-Fallback 型超新星元素合成モデルを用いると、大質量星の超新星爆発によって ^{60}Fe のほか ^{26}Al , ^{41}Ca , ^{53}Mn の存在度も説明できることがわかってきた。また、消滅核種の供給源となった大質量星と太陽系(分子雲コアまたは原始太陽系円盤)との距離は数パーセク程度で、太陽系が大質量星の存在する誘発的星形成領域で誕生したことが示唆される。

かつて、地球は宇宙の中心であると位置づけられていた。その後、地球は太陽を中心とした太陽系のひとつの惑星であることがわかり、太陽も銀河系の端に位置する普通の恒星であり、銀河系自体もとくに珍しい銀河というわけでもないことがわかってきた。近年、系外惑星系も続々と発見され、惑星系を持つ恒星も特別ではなさそうである。さらに、本稿で紹介したような宇宙化学の進展により、太陽系が産まれた環境もまたこの宇宙においては一般的な星形成環境であった可能性が示唆されるようになった。太陽系はどうもありふれた存在らしい。では、生命を育む地球が産まれた

ことや太陽系に色とりどりの多彩な惑星が存在することもありふれた話なのだろうか。興味は尽きない。本稿で紹介した太陽系誕生環境だけでなく、初期太陽系円盤での惑星材料の進化、惑星の化学的個性の形成と言った問題まで広い視野を持って、研究を続けていきたいと考えている。

謝 辞

本稿は日本地球化学会2006年度奨励賞受賞記念講演に基づき、その後の進展も含めながら、まとめさせていただきました。もっと早く執筆すべきところを時間がかかってしまったこと、お詫び致します。

奨励賞をいただくことをできたのも、これまで筆者を指導し、激励いただいた多くの皆さまのおかげと感謝しております。筆者を奨励賞に推薦して下さった小嶋稔博士、木多紀子博士には様々な場で議論いただき、また励ましを何度となくいただいております。小嶋博士は、筆者が大阪大学で専門課程に進み、最初に聞いた惑星科学の講義で「“Origin of . . .” というタイトルで論文を書くのが一流の研究者である」というようなことを話されていたことが強く印象に残っています。まだまだ“Origin of . . .” の論文を書くに至りませんが、いつの日かそうなるべく努力を続けたいと思います。大阪大学時代には、指導教官の土山明博士から物質科学や宇宙化学、真空実験など現在、筆者が研究を進めるにあたっての基礎になる部分をたたき込まれました。学位取得後、日本学術振興会の特別研究員として研究グループに受け入れてくださった東京大学の永原裕子博士、小澤一仁博士には、研究をなんとか発展させたいと思いながら、もがいていた時期に様々な助言をいただきました。現在も同僚として共同研究者として、研究に関する議論を日々おこなっているだけでなく、地球惑星科学の発展や次世代の育成のために何をなすべきかと考えるときの良きお手本となっただいただいております。本稿で紹介した研究は、筆者がアリゾナ州立大学留学中にお世話になった Gary Huss 博士（現ハワイ大学マノア校）なしでは成立しませんでした。隕石を扱った経験も少なく、同位体分析もしたことがなかった筆者でも、なぜやりたいか、なぜ重要だと思うかを説明しさえすれば、好きなテーマをやらせてくれる環境をつくってくれました。東京大学赴任後は地球惑星システム科学講座の皆さんと、地球や惑星をひとつのシステムとしていかに捉えて、その振る舞いを記述するかという議論を通じて、地球

惑星システムの誕生や進化の普遍性や特殊性を常に考えるようになり、本稿後半に紹介したような太陽系誕生環境の普遍性をさぐる研究を進めるきっかけとなりました。本稿後半部については、東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻の瀧川晶さん、三木順哉さんとの共同研究です。聡明な学生と一緒に研究できることの喜びを感じつつ、研究を進めることができました。

ここでは書き切れないほど、本当に多くの方にお世話になりました。この場を借りて、御礼申し上げます。今後も精進して、地球惑星科学分野の発展に少しでも貢献していければと思っております。今後ともよろしくお願い致します。

引用文献

- Amelin, Y., Connelly, J., Zartman, R. E., Chen, J. H., Gopel, C. and Neymark, L. A. (2009) Modern U-Pb chronometry of meteorites: Advancing to higher time resolution reveals new problems. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **73**, 5212–5223.
- Birck, J. L. and Lugmair, G. W. (1988) Nickel and chromium isotopes in Allende inclusions. *Earth and Planetary Science Letters* **90**, 131–143.
- Bizzarro, M., Ulfbeck, D., Trinquier, A., Thrane, K., Connelly, J. N. and Meyer, B. S. (2007) Evidence for a late supernova injection of ^{60}Fe into the protoplanetary disk. *Science* **316**, 1178–1181.
- Cameron, A. G. W. and Truran, J. W. (1977) The supernova trigger for formation of the solar system. *Icarus* **30**, 447–461.
- Cameron, A. G. W., Höflich, P., Myers, P. C. and Clayton, D. D. (1995) Massive supernovae, Orion gamma rays, and the formation of the solar system. *Astrophysical Journal Letters* **447**, L 53–L 57.
- Chieffi, A. and Limongi, M. (2004) Explosive yields of massive stars from $Z=0$ to $Z=Z_{\text{solar}}$. *Astrophysical Journal* **608**, 405–410.
- Choi, B. -G., Huss, G. R. and Wasserburg, G. J. (1999) Search for a correlation Between ^{60}Fe and ^{26}Al in chondrites. *Lunar and Planetary Science Conference XXX*, abstract, #1862.

- Condit, R. H., Hobbins, R. R. and Birchenall, C. E. (1974) Self-diffusion of iron and sulfur in ferrous sulfide. *Oxidation of Metals* **8**, 409–455.
- 海老原充 (2006) 太陽系の化学—地球の成り立ちを理解するために. 裳華房, pp. 230.
- Guan, Y., Huss, G. R. and Leshin, L. A. (2007) ^{60}Fe - ^{60}Ni and ^{53}Mn - ^{53}Cr isotopic systems in sulfides from unequilibrated enstatite chondrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **71**, 4082–4091.
- Hester, J. J. and Desch, S. J. (2005) Understanding our origins: Star formation in HII region environments. In: *Chondrites and the Protoplanetary Disk* (eds. A. N. Krot, E. R. D. Scott and B. Reipurth), Astronomical Society of the Pacific, 107–130.
- Huss, G. R., Meyer, B. S., Srinivasan, G., Goswami, J. N. and Sahijpal, S. (2009) Stellar sources of the short-lived radionuclides in the early solar system. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **73**, 4922–4945.
- Iwamoto, N., Umeda, H., Tominaga, N., Nomoto, K. and Maeda, K. (2005) The first chemical enrichment in the universe and the formation of hyper metal-poor stars. *Science* **309**, 451–453.
- Jacobsen, S. B. (2005) The birth of the solar system in a molecular cloud: evidence from the isotopic pattern of short-lived nuclides in the early solar system. In: *Chondrites and the Protoplanetary Disk* (eds. A. N. Krot, E. R. D. Scott and B. Reipurth), Astronomical Society of the Pacific, 548–557.
- Kastner, J. H. and Myers, P. C. (1994) An observational estimate of the probability of encounters between mass-losing evolved stars and molecular clouds. *Astrophysical Journal* **421**, 605–615.
- Kita, N. T., Togashi, S., Morishita, Y., Terashima, S. and Yurimoto, H. (1998) Search for ^{60}Ni excesses in MET-78008 ureilite: An ion microprobe study. *Antarctic Meteorite Research* **11**, 103–121.
- Kita, N. T., Nagahara, H., Togashi, S. and Morishita, Y. (2000) A short duration of chondrule formation in the solar nebula: evidence from ^{26}Al in Semarkona ferromagnesian chondrules. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **64**, 3913–3922.
- Kita, N. T., Huss, G. R., Tachibana, S., Amelin, Y., Nyquist, L. E. and Hutcheon, I. D. (2005) Constraints on the origin of chondrules and CAIs from short-lived and long-lived radionuclides. In: *Chondrites and the Protoplanetary Disk* (eds. A. N. Krot, E. R. D. Scott and B. Reipurth), Astronomical Society of the Pacific, 558–587.
- 木多紀子 (2008) 隕石. 松田准一, 坂本尚義編, 地球化学講座2 宇宙・惑星化学. 培風館, 1–44.
- Lada, C. J. and Lada, E. A. (2003) Embedded clusters in molecular clouds. *Annual Review of Astronomy & Astrophysics* **41**, 57–115.
- Lauretta, D. S. (2005) Sulfidation of an iron-nickel-chromium-cobalt-phosphorus alloy in 1% H_2S - H_2 gas mixtures at 400–1000°C. *Oxidation of Metals* **64**, 1–22.
- Lee, T., Shu, F. H., Shang, H., Glassgold, A. E. and Rehm, K. E. (1998) Protostellar cosmic rays and extinct radioactivities in meteorites. *Astrophysical Journal* **506**, 898–912.
- Lugmair, G. W. and Shukolyukov, A. (1998) Early solar system timescales according to ^{53}Mn - ^{53}Cr systematics. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **62**, 2863–2886.
- Lyons, J. R. and Young, E. D. (2005) CO self-shielding as the origin of oxygen isotope anomalies in the early solar nebula. *Nature* **435**, 317–320.
- McKeegan, K. D., Chaussidon, M. and Robert, F. (2000) Incorporation of short-lived Be-10 in a calcium-aluminum-rich inclusion from the Alende meteorite. *Science* **289**, 1334–1337.
- Meyer, B. S. (2005) Synthesis of short-lived radioactivities in a massive star. In: *Chondrites and the Protoplanetary Disk* (eds. A. N. Krot, E. R. D. Scott and B. Reipurth), Astronomical Society of the Pacific, 515–526.
- Meyer, B. S. and Clayton, D. D. (2000) Short-lived radioactivities and the birth of the Sun. *Space Science Reviews* **92**, 133–152.
- Mostefaoui, S., Lugmair, G. W., Hoppe, P. and El Goresy, A. (2003) Evidence for live iron-60 in Se-

- markona and Chervony Kut: A nanoSIMS study. *Lunar and Planetary Science Conference XXXIV*, abstract, #1585.
- Mostefaoui, S., Lugmair, G. W. and Hoppe, P. (2005) ^{60}Fe : A heat source for planetary differentiation from a nearby supernova explosion. *Astrophysical Journal* **625**, 271–277.
- Niwa, T., Tachihara, K., Itoh, Y., Oasa, Y., Sunada, K., Sugitani, K. and Mukai, T. (2009) Millimeter-wave survey of molecular clouds around the W 5-East triggered star-forming region. *Astronomy & Astrophysics* **500**, 1119–1129.
- Nomoto, K., Tominaga, N., Umeda, H., Kobayashi, C. and Maeda, K. (2006) Nucleosynthesis yields of core-collapse supernovae and hypernovae, and galactic chemical evolution. *Nuclear Physics A* **777**, 424–458.
- Ouellette, N., Desch, S. J., Hester, J. J. and Leshin, L. A. (2005) A nearby supernova injected short-lived radionuclides into our protoplanetary disk. In: *Chondrites and the Protoplanetary Disk* (eds. A. N. Krot, E. R. D. Scott and B. Reipurth), Astronomical Society of the Pacific, 527–538.
- Ouellette, N., Desch, S. J., Bizzarro, M., Boss, A. P., Ciesla, F. and Meyer, B. (2009) Injection mechanisms of short-lived radionuclides and their homogenization. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **73**, 4946–4962.
- Preibisch, T. and Zinnecker, H. (2007) Sequentially triggered star formation in OB associations. In: *Triggered Star Formation in a Turbulent ISM* (eds. B. G. Elmegreen and J. Palous), Cambridge University Press, 270–277.
- Rauscher, T., Heger, A., Hoffman, R. D. and Woosley, S. E. (2002) Nucleosynthesis in massive stars with improved nuclear and stellar physics. *Astrophysical Journal* **576**, 323–348.
- Rugel, G., Faestermann, T., Knie, K., Korschinek, G., Poutivtsev, M., Schumann, D., Kivel, N., Günther-Leopold, I., Weinreich, R. and Wohlmuther, M. (2009) New measurement of the ^{60}Fe half-life. *Physical Review Letters* **103**, 072502.
- Sahijpal, S. and Soni, P. (2006) Stellar nucleosynthetic contribution of extinct short-lived nuclei in the early solar system and the associated isotopic effects. *Meteoritics & Planetary Science* **41**, 953–976.
- Shukolyukov, A. and Lugmair, G. W. (1993 a) Live iron-60 in the early solar system. *Science* **259**, 1138–1142.
- Shukolyukov, A. and Lugmair, G. W. (1993 b) Fe-60 in eucrites. *Earth and Planetary Science Letters* **119**, 159–166.
- Shukolyukov, A. and Lugmair, G. W. (1996) ^{60}Fe - ^{60}Ni isotope system in the eucrite Caldera. *Meteoritics & Planetary Science* **31**, A 129.
- Stahler, S. W. and Palla, F. (2004) *The Formation of Stars*. Wiley-VCH, pp. 852.
- Tachibana, S. and Huss, G. R. (2003) The initial abundance of ^{60}Fe in the solar system. *Astrophysical Journal Letters* **588**, L41–L44.
- Tachibana, S., Huss, G. R., Kita, N. T., Shimoda, G. and Morishita, Y. (2006) ^{60}Fe in chondrites: Debris from a nearby supernova in the early solar system?
- Tachibana, S., Huss, G. R. and Nagashima, K. (2007) ^{60}Fe - ^{60}Ni systems in ferromagnesian chondrules in least equilibrated ordinary chondrites. *Lunar and Planetary Science Conference XXXVIII*, abstract, #1709.
- Tachibana, S., Huss, G. R. and Nagashima, K. (2009) Ion microprobe study of ^{60}Fe - ^{60}Ni system in ferromagnesian pyroxene chondrules in Krymka (LL 3.1) by multicollection. *Lunar and Planetary Science Conference XXXX*, abstract, #1808.
- Takigawa, A., Miki, J., Tachibana, S., Huss, G. R., Tominaga, N., Umeda, H. and Nomoto, K. (2008) Injection of short-lived radionuclides into the early solar system from a faint supernova with mixing fallback. *Astrophysical Journal* **688**, 1382–1387.
- Umeda, H. and Nomoto, K. (2003) First-generation black-hole-forming supernovae and the metal abundance pattern of a very iron-poor star. *Na-*

- ture **422**, 871–873.
- Vanhala, H. A. T. and Cameron, A. G. W. (1998) Numerical simulations of triggered star formation. I. Collapse of dense molecular cloud cores. *Astrophysical Journal* **508**, 291–307.
- Vanhala, H. A. T. and Boss, A. P. (2002) Injection of radioactivities into the forming solar system. *Astrophysical Journal* **575**, 1144–1150.
- Wadhwa, M., Amelin, Y., Davis, A. M., Lugmair, G. W., Meyer, B., Gounelle, M. and Desch, S. J. (2007) From Dust to Planetesimals: Implications for the Solar Protoplanetary Disk from Short-lived Radionuclides. In: *Protostars and Planets V* (eds B. Reipurth, D. Jewitt, and K. Keil), University of Arizona Press, 835–848.
- Wasserburg, G. J., Busso, M., Gallino, R. and Raiteri, C. M. (1994) Asymptotic Giant Branch stars as a source of short-lived radioactive nuclei in the solar nebula. *Astrophysical Journal* **424**, 412–428.
- Wasserburg, G. J., Busso, M., Gallino, R. and Nollett, K. M. (2006) Short-lived nuclei in the early Solar System: Possible AGB sources. *Nuclear Physics A* **777**, 5–69.
- Woosley, S. E. and Weaver, T. A. (1995) The evolution and explosion of massive stars. II. explosive hydrodynamics and nucleosynthesis. *Astrophysical Journal Supplement* **101**, 181–235.
- Yurimoto, H. and Kuramoto, K. (2004) Molecular cloud origin for the oxygen isotope heterogeneity in the solar system. *Science* **305**, 1763–1766.