

## 超新星から来たマイクロダイヤモンド



若者

望月圭子\*

## はじめに

私は学部4年生となり、宇宙地球科学科の研究室に配置されるまで、希ガスの同位体比組成や隕石等に関する知識を、全く持ち合わせていませんでした。実際に、研究室に入るまで何をするのかさえ、具体的にわからなかったのです。ただ、漠然と宇宙に対して憧れのような興味を抱いていたので、この研究室を希望したのでした。そんな私が、配属されて初めて与えられた研究テーマは、やはり憧れの“ダイヤモンド”についてだったのです。といっても、私の指輪にできるような、大きなダイヤモンドではありません。“ウイルスの指輪”になるような、数mmサイズのダイヤモンドなのです。しかし、その辺で売っているダイヤモンドとは、決定的にちがう点があります。それは、今から数十億年もの昔、太陽系の遙かかなたの超新星の中で、できたという点です。いったい、このダイヤモンドはどのようなプロセスでつくられたのでしょうか。私達は、超新星爆発の際に、周りに存在していた炭素物質からなる星間雲に、高エネルギー粒子が衝突してできたのではないかと、推測しています。その証拠を得ようとここ2年程、いろんな方法で取り組んできました。

なぜ超新星爆発でつくられた  
ダイヤモンドなのか？

## 1. 希ガスについて

希ガスは価電子を持たないため、化学的に安



\*Keiko MOCHIZUKI  
1969年7月22日生  
現在、大阪大学大学院理学研究科  
物理学専攻前期課程、理学部、宇  
宙地球科学、小嶋研究室、学生、  
学士、宇宙地球科学、  
TEL 06-844-1151(内線4178)

定かつ揮発性です。そのため化学作用を受けにくく、物質ができたときの状態をよく保持しています。いわば、写真のようなものなのです。しかし、写真も色褪せるように希ガスも、物質形成後の周りのガスの吸収や内部ガスの放出、放射核種の壊変等により、少しずつもとの状態を変化させていきます。(その変化を利用して、年代測定等が行なわれます。)私達が取り組んでいるダイヤモンド中のXeは、これらの影響をほとんど受けていません。しかも、そのXeは通常では考えられないような、異常を示しているのです。

## 2. Xe-HLについて

始原的な隕石に含まれるダイヤモンドは、Xe-HLという、太陽系内物質を極めて異なった同位体比組成を示すXeを保持しています。Xe-HLとは、Xeの9つの同位体の内、124, 126(Xe-L; Lはlighter isotopesの略)と134, 136(Xe-H; Hはheavier isotopesの略)が、太陽系の同位体量に比べかなり濃縮している特長をいいます(図1)。このようなXeは、どうして形成されるのでしょうか。一般的にもとの組成を後に変化させるXe(excess Xe)は、次のような生成方法で作られます。

○放射核種の壊変( $^{129}\text{I} \rightarrow ^{129}\text{Xe}$ ,  $^{127}\text{I} \rightarrow ^{128}\text{I} \rightarrow ^{128}\text{Xe}$ )

○宇宙線照射によるspallation ( $^{124}\text{Xe} \sim ^{132}\text{Xe}$ )

○自発核分裂( $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{244}\text{Pu} \rightarrow ^{131}\text{Xe} \sim ^{136}\text{Xe}$ )

一つめは $^{128}\text{Xe}$ ,  $^{129}\text{Xe}$ をつくるだけなので、Xe-H, Xe-Lはつくられません。二つめは、Xe-Lをつくりませんが、非常に希にしか起こらない反応のため、図1のような大きな異常を示す原因にはなりません。三つめは、Xe-Hをつくり、パターンもよく似ています(図2)。しかし、細かく見ると131と132の量が逆であ

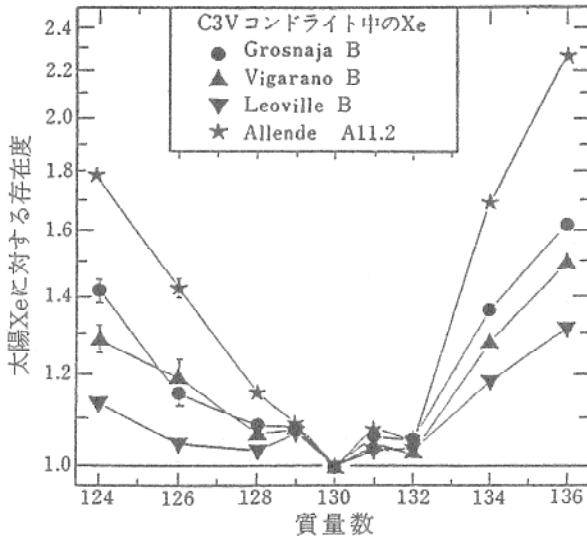


図1 始原的隕石に含まれるダイヤモンド中のXeの太陽Xeの存在度と比較したもの (Matsuda et al. 1980).  
重いXeと軽いXeと一緒に濃縮している。

ることや、量的にも図1に示すほどのXe-Hをつくらないこと、また同時にXe-Lを説明できないこと等から、やはりこれもちがいます。そこで考えられたのが、一般的でない場所、すなわち超新星でした。ここでは<sup>124</sup>Xe, <sup>126</sup>XeをつくるP-processと、<sup>131</sup>Xe~<sup>136</sup>Xeをつくるr-processが、同時に卓越して起こると考えら

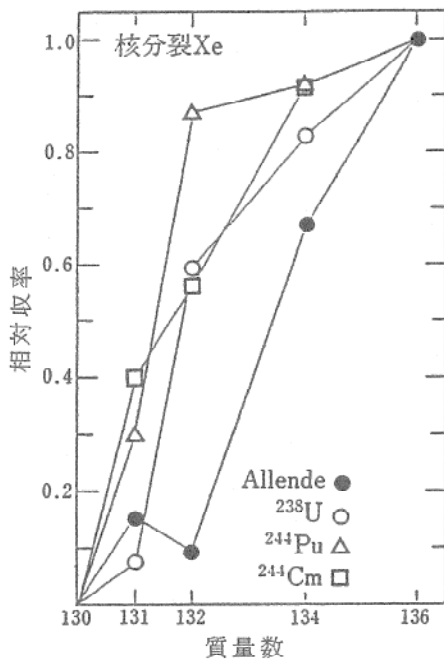


図2 始原的隕石 (Allende) 中のXeと、重元素の自発核分裂によるXeの比較 (Lewis et al. 1975).

れています。つまり、Xe-HとXe-Lと一緒に説明できるのです。しかし、それらのプロセスによりできる同位体比のパターンまではわかっていないため、疑いの余地がないわけではありません。

### 3. 超新星爆発

Xe-HLが作られる環境、つまり超新星とは、いったいどんなものなのでしょう。

超新星は、一般的に“星の死”を意味しますが、他方、生命を産み出す“母体”の役割も担っています。それは、生命に必要な様々な元素をつくりだし、宇宙空間に送り出すからです。恒星の最後は、大別して以下のように分類できます。

#### もとの星の質量

- <約1M<sub>☉</sub> 超新星爆発は起こらない
- 1~8M<sub>☉</sub> タイプI超新星
- 8~20M<sub>☉</sub> タイプII超新星
- >約20M<sub>☉</sub> ブラックホール

M<sub>☉</sub>: 太陽質量

まず、質量が1~8M<sub>☉</sub>の星は、水素とヘリウムを燃焼し尽くすと、重力を支える圧力を生み出すエネルギー源がなくなるため、収縮し始めます。この大きさの星が生み出す重力では、これ以上の核反応は起こらないので、どんどん収縮し続け、原子同士の圧縮によりその外殻電子が反発しあうようになります。すると、その反発がつくり出す圧力により、重力を支えることになります。このような星を“白色矮星”といいます。これだけでは超新星になることはできません。更に、この星が連星の一部だったときに、超新星は形成されるのです。白色矮星はもう1つの星と共通の重心をまわりながら、その重力で相手の星の外層のガスを引き寄せます。そのために、白色矮星の質量は増大していき臨界点に達すると、電子の反発がつくり出す圧力では重力を支えきれなくなり、急激な収縮が始まります。こんどは質量が大きいために、中心部ではヘリウムによりつくられた炭素が、核反応を起こすに十分な程の高温に達します。そのとき開放される絶大なエネルギーが爆発を起こし、超新星が誕生します。このような超新星がタイプIと呼ばれています。

次に、8～20 $\odot$ の星は、中心部の水素がヘリウムに転換後、重力による収縮で中心温度が上昇し、今度はヘリウムが炭素に転換します。このように、重力収縮と温度上昇を繰り返しながら、外側から内側にかけて元素合成の層を形成していきます(図3)。しかし、この“繰り返し”は永久に続くわけではありません。中心部が鉄になった時点で終了します。なぜなら鉄から更に元素合成を進めても、たいしたエネルギーを得られないばかりか、失ってしまう可能性も大きいからです(図4)。核反応が終わると、重力に対抗する圧力の供給が途絶えるため星は一気に押し潰され、そのときの衝撃で外層は吹き飛ばされます。これがタイプIIの超新星です。

1 $\odot$ 以下と20 $\odot$ 以上の星は、超新星にはなら

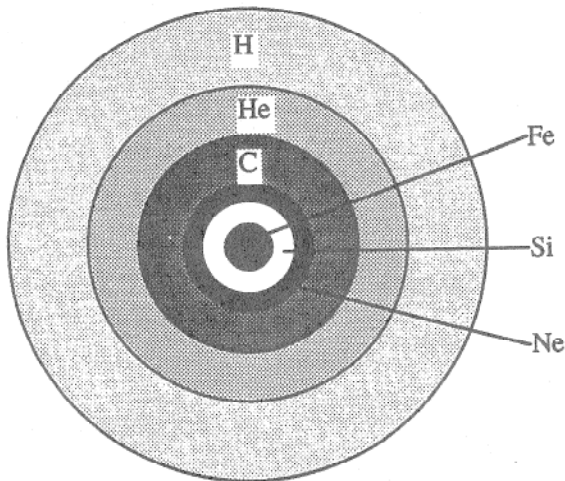


図3 SN1987A(もとの質量は20M $\odot$ )の爆発直前の内部構造(矢沢 潔, 1988).

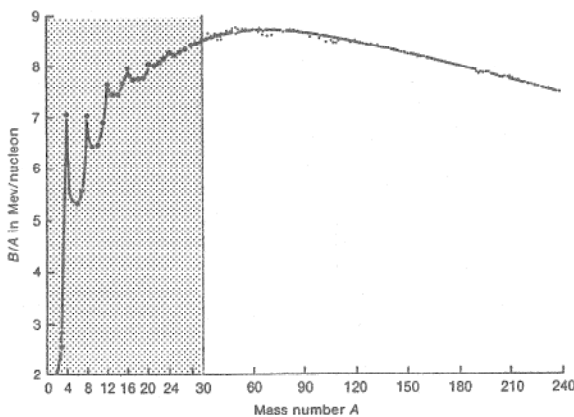


図4 質量数と1核子あたりの産出する平均エネルギー(Fred Hoyle, 1975).

ないと思われるので、ここでは説明を省きます。

#### 4. 超新星でのXe, ダイヤモンド形成

私達が取り組んでいるダイヤモンドは、タイプIIの超新星から来たと考えられています。このような星では、Xeは3つのプロセスでつくられます。ヘリウムが炭素やネオンに変化する時(図3, He-burning), 中性子を放出しますが、原子はその中性子を吸収しながら大きくなっていきます。中性子がそれほど多くない時は、原子は中性子を少し取り入れる毎に、 $\beta$ 崩壊によってより安定な原子へ変化していきます。超新星になる前は、ヘリウムの反応はそれほど急激でないため、このような遅いプロセスで重い原子がつけられていきます。つまりs(slow)-processが起こっているわけです(図5)。ところが、超新星爆発が起こるとその衝撃波の影響でヘリウムの反応が急激に進み、中性子が大量に放出されるため、原子は $\beta$ 崩壊を起こす間もなくどんどん大きくなっていきます。すると、中性子過剰の不安定原子がつけられ、それが安定になるため $\beta$ 崩壊を繰り返しながら、質量数の大きい同位体をつくります。これがr(rapid)-processです(図6)。更に内部のエネルギーの高い所では、衝撃波の影響で陽子が活発に動き原子中の中性子をはじき飛ば

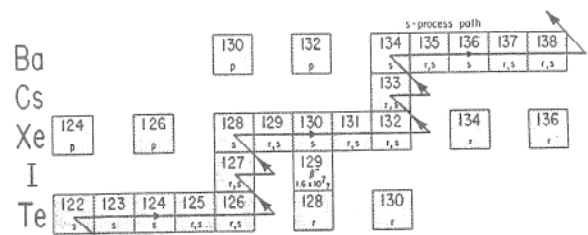


図5 Xe付近でのs-processのパス(Anders, 1981).

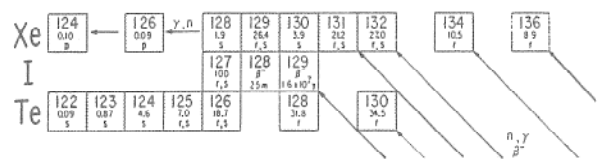


図6 Xe付近のr-process, p-processのパス(Anders, 1981).

し、軽い同位体をつくります。これをp (proton)-processといいます。始原的なダイヤモンド中に見出されるXe-HLは、まさにこのような超新星爆発のときに起こるr-processとp-processのXeによりつくられたと考えられています。そして超新星の周りに既に存在していたダイヤモンドに、このXe-HLが打ち込まれたと説明されてきました。しかし私達は以下に述べるようにダイヤモンドの形成自体も、Xeの打ち込みのショックによるものと考えています。

### ウランが濃縮した石炭に ダイヤモンドを探す

もし、Xeのような高エネルギー粒子の衝突によってダイヤモンドが形成されるなら、同じような機構で放射壊変時の高エネルギー粒子の衝突によって石炭からダイヤモンドができてもおかしくありません。また逆に、石炭からダイヤモンドができることがわかれば、Xeの衝突からダイヤモンドができる可能性を示唆することにもなります。

幸いウランは石炭に濃縮しやすいため、そのような石炭を見つけてきたダイヤモンドを探せばいいわけです。こうしたわけで、私達はまずウランを濃縮した石炭中にダイヤモンドを探すことに取り組みました。ところが超新星からきたダイヤモンドは数mm程の大きさです。石炭中のダイヤモンドもその程度の大きさでしょう。しかも量は期待できそうもありません。実際、多大な努力にもかかわらず、X線やラマン顕微鏡では検出することができませんでした。そこで、微小領域をみるのに適していると思われる透過型電子顕微鏡(TEM)で観察することにしました。TEMは薄く削った試料に電子線を透過させて、透過後の電子線の焦点距離を調節することによりイメージ像と回折像を映し出し、その情報から試料を同定することができます。ウラン濃縮の石炭をみてみると、直径が数10mm程の結晶(写真1)が500ppm程観察されました。回折像をとってみると、ダイヤモンドらしき像が写っています。但し、単結晶で取りだせていないため断定するのはまだ早計と思

われます。

更に私達は、人工的に石炭に高エネルギー粒子を照射しダイヤモンドをつくることを試みています。もしこれが実現したら、それこそダイヤモンドが超新星爆発によってできたことを示す有力な手掛かりになります。またダイヤモンドの新たな成因という観点からみても、これは非常におもしろいことと思います。現在、理化学研究所の線形加速器を借りて、石炭に重イオンを照射しそれをTEMで探査しています。まだあまり進んでいないので何とも言えませんが、結晶らしきものは観察されています。これからじっくり取り組んでいきます。

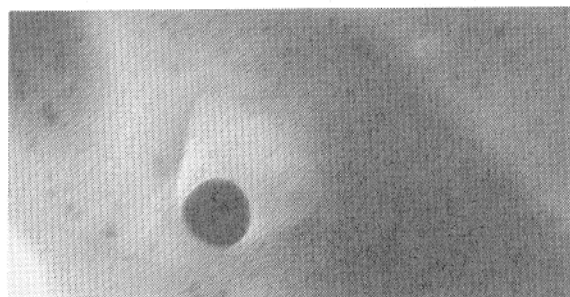


写真1 ウランを濃縮した石炭中に観察された、ダイヤモンドと思われる結晶(TEMによる、イメージ像)。

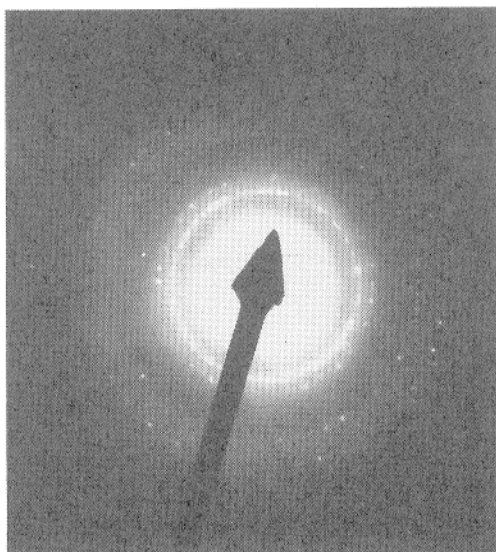


写真2 写真1のような結晶数個からなる回折像。一番内側と3番目と4番目のリングがダイヤモンドの111, 200, 311にそれぞれ対応するように思われる。

## 最後に

以上のように高々数 mm 程のダイヤモンドが、超新星からもたらす情報や夢は、はかり知れません。実際に超新星のそばまで行ってその様子を観察することは不可能ですから、ダイヤモンドの情報から最も真実らしい答えを出すまで私達はあらゆる可能性を夢見ることができます。石炭中のダイヤモンドについても、もしできていけるのなら、原子炉の周りに使っていたグラファイトからもたくさん回収できるはずですし、工業的に見ても数 10mm サイズのダイヤ

モンドが生産できるのですから、非常に期待できます。それにそのサイズの結晶が形成されるにあたり、なぜでしやすい“グラファイト”ではなく“ダイヤモンド”なのかという疑問が生じます。その本当の理由に行き着くまで、やはりいろんな可能性を思い巡らすことでしょう。こうして夢は限りなく広がっていきます。

真実を知る事は大事ですが、それに行き着く過程の楽しさはもっと素晴らしいものと、最近感じ始めています。あと半年でどれだけ進めるかわかりませんが、この楽しさを満喫したいと思います。

