

サッカーボール型分子 C_{60} の天文学

相原 惇 一

〈静岡大学理学部 〒422 静岡市大谷 836〉

新聞や雑誌でしばしば、サッカーボールの形をした炭素分子 C_{60} の話が取り上げられる。ところで、この分子は誰がどのようにして見つけたのだろうか。そもそも、なぜこのような球状の炭素分子ができるのだろうか。 C_{60} のなにか世間の関心をあつめるのだろうか。 C_{60} やその仲間の球状分子が宇宙に存在するともいわれるが、それは本当だろうか。この分野で活躍している日本人はいるのだろうか。こんな疑問を抱いた人はこの記事を読んでほしい。

1. はじめに

炭素だけでできた物質には黒鉛(グラファイト)とダイヤモンドがある。ところがここ数年、新しい形態の炭素がしばしば話題になる。その中でも、60個の炭素原子からなるサッカーボール型分子 C_{60} は多くの人の関心の的となっている。この分子は数々の特異な性質をもつだけでなく、宇宙に大量に存在するともいわれている。そこで本稿では、 C_{60} のような球状炭素分子の研究の経緯とその天文学的な意義をわかりやすく解説したい。

C_{60} が最初に登場する印刷物は日本の雑誌「化学」の1970年9月号である。当時、北海道大学におられた大沢映二氏(現・豊橋技科大)はその誌上に、3次元的な広がりをもつ分子の安定性に関する解説記事を書かれた。大沢氏はその中で、サッカーボールの形をした炭素分子 C_{60} は十分安定であるはずだと予測された。当時は C_{60} は未知の分子だったが、この分子は合成されさえすれば、容易にこわれることはないだろうと予測されたのである。この日本語の記事が C_{60} の科学の発端となった。

2. C_{60} の発見

大沢氏の記事が出たとき、だれも C_{60} を合成可能な分子だとは思わなかった。ところが、この予想は正しくなかった。 C_{60} 分子は1985年に、サセックス大学(英)のクロート(H. W. Kroto)とライス大学(米)のスモーリー(R. E. Smalley)が行っていた共同研究の過程で偶然発見された。クロートは星間分子の研究者で、1970年代の後半に、当時カナダにおられた岡 武史氏(現・シカゴ大学)らと共同で、直鎖の星間分子シアノポリイン類(HC_nN , $n=5, 7, 9$)を発見したことで著名である。後に別の研究グループが $n=11$ の分子を発見した。

二人の共同研究はクロートがスモーリーに、真空中で黒鉛を蒸発させてみようと提案をしたことに始まる。スモーリーの研究室には、どんな物質でも蒸発させられる素晴らしいレーザー装置があった。クロートの当初の目論見は、何個もの炭素原子が連なったシアノポリインのような星間分子の成因を調べることにあった。黒鉛を蒸発させてばらばらの炭素原子をつくれれば、気相でこのような直線分子が生成することが予想された。スモーリーは、前年にそれに似た実験がなされていたこともあって、最初はクロートの提案に消極的だった。

たが、最終的には共同研究に応じた。

物理や化学の世界では、数個以上の原子や分子の集まりをクラスターという。真空中で黒鉛にレーザーを照射してそれを蒸発させると、さまざまな数の炭素原子が集まった炭素クラスターが生成する。クロートとスモーリーは、生成した炭素ク

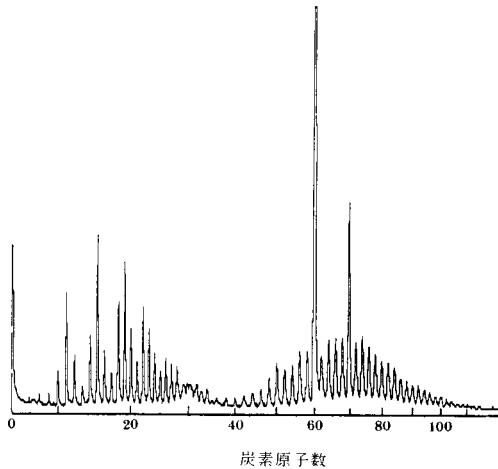


図1 黒鉛にレーザー照射したときに生成する炭素クラスターの質量スペクトル [H. W. Kroto et al., *Nature*, **318**, 162 (1985)]. 小さなクラスターのグループは主として鎖状炭素分子, 大きなクラスターのグループは主として球状炭素分子からなる。C₆₀は比較的多く生成する。

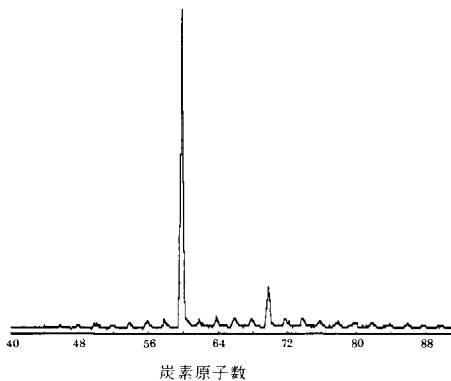


図2 黒鉛にレーザー照射したときに生成する炭素クラスターの質量スペクトル [Kroto, H. W., et al. *Nature*, **318**, 162]. C₆₀の生成量が最大になるような実験条件で測定したもの。

ラスターをヘリウムガスに乗せて質量分析計に導き、その大きさを調べた。この方法では、数個から百数十個の炭素原子からなるクラスターが生成した(図1)。あるとき、彼らは分析前の炭素クラスターを少々ながい時間ヘリウムと接触させてみた。すると驚いたことに、ほとんどの炭素クラスターは分解して、C₆₀とC₇₀だけが生き残ったのである(図2)。クロートらは、そのうちの生成量の多いC₆₀に対してサッカーボール型の分子構造を提案した(図3)。この分子は、球状ドームを設計した建築家バックミンスター・フラー (R. Buckminster Fuller) にちなんで、バックミンスターフラーレン (buckminsterfullerene) とよばれることになった。以上がC₆₀発見の経緯である。

3. C₆₀の大量合成法

クロートとスモーリーは予想外の新物質C₆₀を発見したというものの、レーザー照射の際にごく微量生成しただけなので、直接目で見て確かめたわけではなかった。それだけでは分子量の決定がやっとである。それより先に研究を進めようとするれば、どうしてもマクロな量のサンプルが必要になる。この懸案を解決したのは、マックスプランク核物理学研究所(独)のクレッチマー(W. Krätschmer)とアリゾナ大学(米)のハフマン(D. R. Huffman)のコンビである。C₆₀の発見から5年後のことだった。彼らは炭素質の星間塵を専門とする研究者である。

星間塵のモデル物質として、真空容器の中で黒鉛棒に電流を通じ、それを加熱・蒸発させてつくったススがよく用いられる。彼らもこの方法でススをつくっていたが、容器の中にヘリウムを少々満たすこともあった。ところが、そのとき得られたススの赤外スペクトルには4本のシャープな吸収線が現れた(図4)。長年ススを扱ってきた彼らはこの異状を見逃すことはなかった。C₆₀があるとすれば、赤外領域には4本の吸収線が出現するはずだからである。このことはすでに理論的に予想

Paul W. H. K. Kroto

Reprinted from Nature, Vol. 318, No. 6042, pp. 162-163, 14 November 1985
 © Macmillan Journals Ltd., 1985

C₆₀: Buckminsterfullerene

H. W. Kroto*, J. R. Heath, S. C. O'Brien, R. F. Curl & R. E. Smalley

Rice Quantum Institute and Departments of Chemistry and Electrical Engineering, Rice University, Houston, Texas 77251, USA

During experiments aimed at understanding the mechanisms by which long-chain carbon molecules are formed in interstellar space and circumstellar shells, graphite has been vaporized by laser irradiation, producing a remarkably stable cluster consisting of 60 carbon atoms. Concerning the question of what kind of 60-carbon atom structure might give rise to a superstable species, we suggest a truncated icosahedron, a polygon with 60 vertices and 32 faces, 12 of which are pentagonal and 20 hexagonal. This object is commonly encountered as the football shown in Fig. 1. The C₆₀ molecule which results when a carbon atom is placed at each vertex of this structure has all valences satisfied by two single bonds and one double bond, has many resonance structures, and appears to be aromatic.

The technique used to produce and detect this unusual molecule involves the vaporization of carbon species from the surface of a solid disk of graphite into a high-density helium flow, using a focused pulsed laser. The vaporization laser was the second harmonic of Q-switched Nd:YAG producing pulse energies of ~30 mJ. The resulting carbon clusters were expanded in a supersonic molecular beam, photoionized using an excimer laser, and detected by time-of-flight mass spectrometry. The vaporization chamber is shown in Fig. 2. In the experiment the pulsed valve was opened first and then the vaporization laser was fired after a precisely controlled delay. Carbon species were

Fig. 1 A football (in the United States, a soccerball) on Texas grass. The C₆₀ molecule featured in this letter is suggested to have the truncated icosahedral structure formed by replacing each vertex on the seams of such a ball by a carbon atom.



図3 C₆₀の発見を報じる論文 [Kroto, H. K., et al. *Nature*, 318, 162]. 右上に筆頭著者であるクロートの署名が見える。著者たちはこの論文の中で、C₆₀はひろく宇宙に存在する可能性があるとして述べている。

graphite fused six-membered ring structure. We believe that the distribution in Fig. 3c is fairly representative of the nascent distribution of larger ring fragments. When these hot ring clusters are left in contact with high-density helium, the clusters equilibrate by two- and three-body collisions towards the most stable species, which appears to be a unique cluster containing 60 atoms.

When one thinks in terms of the many fused-ring isomers with unsatisfied valences at the edges that would naturally arise from a graphite fragmentation, this result seems impossible: there is not much to choose between such isomers in terms of stability. If one tries to shift to a tetrahedral diamond structure, the entire surface of the cluster will be covered with unsatisfied valences. Thus a search was made for some other plausible structure which would satisfy all sp² valences. Only a spheroidal structure appears likely to satisfy this criterion, and thus Buckminster Fuller's studies were consulted (see, for example, ref. 7). An unusually beautiful (and probably unique) choice is the truncated icosahedron depicted in Fig. 1. As mentioned above, all valences are satisfied with this structure, and the molecule

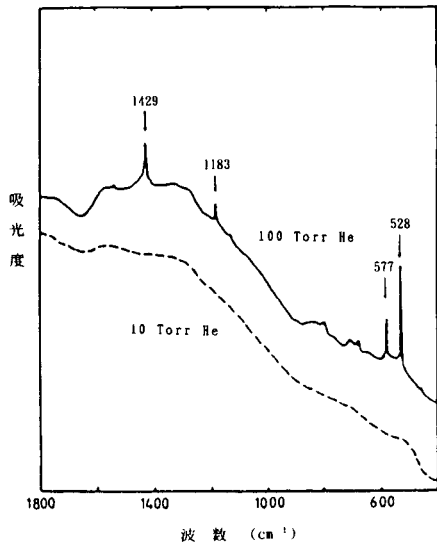


図4 黒鉛を蒸発させてつくったススの赤外スペクトル [Krätschmer, W., et al. *Chem. Phys. Letters*, 170, 167]. 100Torrのヘリウム中でつくったススには、C₆₀による4本の吸収線が認められる。

されていた。紫外スペクトルにも異常な吸収ピークが見られた。

このススにベンゼンを滴下すると、ベンゼンは真っ赤になった。ふつうのススでは有機溶媒が赤くなることはない。そこで、クレッチマーらは、ベンゼンに溶け出したススの成分をカラムクロマトグラフィーという分析方法で分け、難なくグラム単位のC₆₀を得たというわけである。赤色の物体はC₆₀であった。彼らがつくったススの中には、数%以上の割合でC₆₀が含まれており、C₇₀も少量含まれていた。C₆₀があまりにも簡単につくられたので、多くの人が驚嘆した。この発見は1990年9月に公表され、研究者の間で歓呼をもって迎えられた。実はそれより1年前に、イタリアで開かれた星間塵の研究集会で最初の発表を行っているが、そのときはなんの反響もなかったらしい。

その後、炭素電極を用いたアーク放電で、C₆₀やC₇₀を含むススが効率よく生成することがわかった。この場合でも、放電容器の中は100 Torr程度のヘリウムを満たしておく必要がある。ススには

C₆₀やC₇₀だけでなく、それより大きな炭素クラスターもごく微量ながら含まれていた。C₆₀などの炭素分子は黒鉛、ダイヤモンドに次ぐ第三の形態の炭素である。C₆₀もC₇₀も可視部全域に吸収があるので、固体は黒っぽい色をしているが、ベンゼンなどに溶かすと、それぞれ深紅色、橙赤色を呈する。無色のダイヤモンドと黒色の黒鉛に加えて、C₆₀のような安定な炭素クラスターの登場は、炭素の科学に文字どおり鮮やかな彩りを添えるものとなった。

4. C₆₀の分子構造

大量合成法が確立すると、C₆₀の研究は爆発的な進展を始めた。まず、C₆₀の分子構造が決められた。この分子は予想通り、サッカーボールの形をした非常に安定な分子だった(図5)。この形は正式には切頭二十面体といい、その表面は12個の五角形と20個の六角形で被われている。C₆₀は球形に近いので、極低温にしないかぎり結晶中でも高速回転している。C₇₀分子はラグビーボールの形をしていた。C₆₀やC₇₀に限らず、大きな炭素クラスターはすべて、五角形と六角形の面からなる多面体で、五角形はかならず12個あった。現在、このような球殻構造をもつ炭素クラスターを総称してフラーレン (fullerene) とよんでいる。炭素には結合の手が4本あるので、フラーレン分子の各炭素原子

は、となり合う3個の炭素原子のうち2個とは1重結合、残りの1個とは2重結合を形成していることになる。

フラーレン分子の生成過程について少し考えてみよう。炭素は常温・常圧では、黒鉛がいちばん安定な状態である。そこで今、有限個(たとえば60個)の炭素原子だけで、六角形を敷き詰めた黒鉛の断片をつくったとする。ところが、この断片は分子としては完全ではなく、へりの部分の炭素原子は結合の手が余っている。分子内に結合の手余った原子があると、分子全体が極度に不安定になるのが普通である。このような状況を避けるには、六角形の一部を五角形に組替えて、分子全体を湾曲させ、すべての炭素原子のすべての結合の手を満足させるしかない。こうしてできたのが、C₆₀などのフラーレン分子である。すなわち、大きな炭素クラスターが12個の五角形を導入して球殻をつくろうとするのは、すべての炭素原子が分子内で4本の結合の手を満足するように結合しようと努めた結果である。

フラーレン分子は内側に大きな空洞があり、原理的には、原子や簡単な分子を收容することができる。金属原子の入ったフラーレン分子をつくるには、ふつう、黒鉛と適当な金属酸化物の混合物を蒸発させる方法がとられる。金属原子が入ったC₆₀を取り出した例はまだないが、スカンジウム

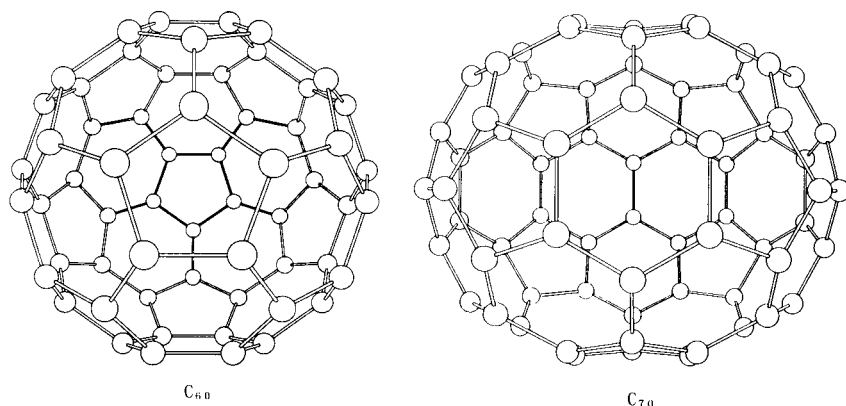


図5 C₆₀とC₇₀の分子構造。

(Sc), イットリウム (Y), ランタン (La) などの原子 1 個を取り込んだ C_{82} は比較的容易に生成する。これらの金属入りフラーレンでは、金属原子は 3 価の陽イオンに、フラーレン分子は 3 価の陰イオン (C_{60}^{3-}) になっている。2-3 個の金属原子を取り込んだフラーレン分子も知られている。また、 C_{60} や C_{70} の陽イオンを加速して、希ガス原子と衝突させると、ヘリウム (He) やネオン (Ne) の原子を 1 個を取り込んだ分子が生成する。

5. C_{60} 系超伝導体

C_{60} の人気を一段と高める契機となったのは、この物質が超伝導体の材料となるという発見だろう。純粋な C_{60} は分子性固体で絶縁体である。ところが、この固体にアルカリ金属を添加すると電気をよく導くようになる。1991 年の春、AT & T ベル研究所の研究者が、 C_{60} 分子 1 個に 3 個の割合でカリウム原子 (K) を添加してつくった物質 (K_3C_{60}) が 18 K で超伝導を示すことを発見した (図 6)。その直後に NEC の研究者が、ルビジウム (Rb) とセシウム (Cs) を添加して $Rb_1Cs_2C_{60}$ をつくったところ、この物質は 33 K で超伝導体になった。この超伝導転移温度 (T_c) は、セラミックス超伝導体のそれには及ばないが、分子でできた

固体としては最高である。

黒鉛にアルカリ金属を添加しても超伝導体になる。けれども、その T_c は数 K 以上にはならない。炭素原子が黒鉛から C_{60} に組み替わることによって、 T_c は一気に 30 K も上昇するのである。 C_{60} 系超伝導体では、カリウムなどのアルカリ金属原子は 1 価の陽イオンに、 C_{60} は 3 価の陰イオン (C_{60}^{3-}) になっている。アルカリ金属イオンは C_{60}^{3-} の球の中にはなく、 C_{60}^{3-} イオンが並んでできた結晶格子の隙間に位置している。また、黒鉛に添加したアルカリ金属原子は、黒鉛のシートとシートの間に入っている。 C_{60} や黒鉛もアルカリ金属も、単独では超伝導体になることはない。

6. カーボン・ナノチューブ

C_{60} が発見される前から未知の炭素の形態を追っていた日本人は、大沢氏ではなかった。NEC 基礎研の飯島澄男氏はアメリカ滞在中の 1980 年に、炭素電極間の真空アーク放電で得られたススの薄膜の電子顕微鏡写真を公表している (図 7)。その写真には、タマネギのような炭素の多重球殻構造がいくつか写っていた。 C_{60} が発見されてから飯島氏がその写真を再度調べたところ、いちばん内側の球殻の大きさは C_{60} とほぼ同じであった。この写真からわかるように、気化した炭素は C_{60} のようなフラーレンを核にして、多重球殻構造をつくることもあるようである。有機物が不完全燃焼してできる普通のススも球状の微粒子が集合したものであり、放電で得られたススと同じように、フラーレン分子が核になって生成することが考えられる。実際、ベンゼン (C_6H_6) やアセチレン (C_2H_2) を適当な条件下で燃やしても、フラーレン分子ができる。ススの多重球殻構造を発見した飯島氏は、 C_{60} の発見にもっとも近づいていた日本人だといえよう。

炭素電極間でアーク放電を行う際に、ヘリウムを 500 Torr 程度詰めておくと、陰極の先端に炭素の堆積物が蓄積する。1991 年に飯島氏は、この堆

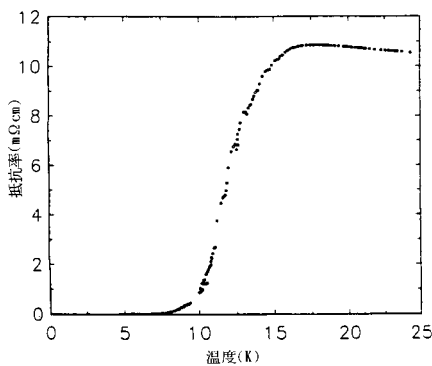


図 6 K_3C_{60} の抵抗率 [A. F. Hebard et al., Nature, 350, 600 (1991)]. 最初に発見された C_{60} 系超伝導体で、18 K 以下に冷却すると電気抵抗が急激に 0 に近づき、超伝導状態になる。

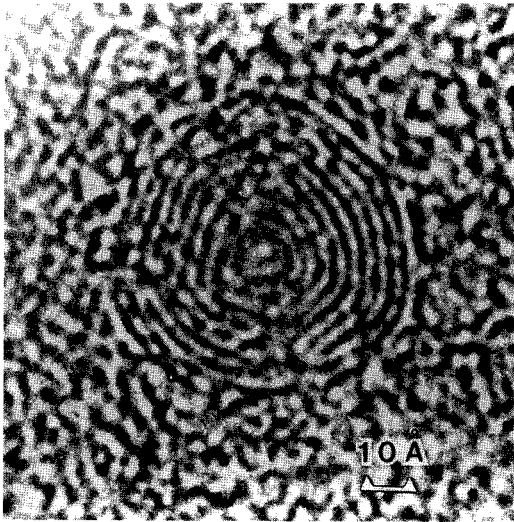


図7 真空アーク放電でつくったススの透過型電子顕微鏡写真 [Iijima, S. 1987, *J. Phys. Chem.*, **91**, 3466]. 多重球殻構造をもつ炭素の微粒子が写っている。

積物の中に、黒鉛のシートを丸めて管にした形の物体が存在することを発見した。現在、この管状炭素はカーボン・ナノチューブ (carbon nanotube) とよばれている。ナノチューブはふつう、2-50 個の管を入れ子にした構造になっている (図8 = 表紙)。その直径は数~十数 nm、長さは数 μm である。管の両端は閉じているので、ナノチュ

ーブ全体を多重フラレンと見なすこともできよう。飯島氏によるカーボン・ナノチューブの発見は、フラレンの科学に対して日本人がなした最大の貢献である。陰極上の堆積物には、タマネギ状の多重球殻構造も認められる。

7. C_{60} の天文学

クロートの偉大な点は、研究の過程で C_{60} を発見しただけでなく、その後、当初めざしたシアノポリインの研究においても大きな成果をあげたことである。シアノポリインは、おうし座にある TMC-1 のような暗黒星雲や、IRC+10216 のような低温の炭素星の周囲に大量に存在する。クロートらが真空中で黒鉛を蒸発させたとき、大きなフラレン分子とともに、炭素数 30 以下の小さなクラスターが生成した (図1)。小さな炭素クラスターの多くは反応性に富んだ直線分子であった。そこで、彼らはアンモニア (NH_3) のような、窒素を含む簡単な分子を小さな炭素クラスターと反応させてみた。すると、期待どおりシアノポリインが効率よく生成したのである (図9)。この種の直線分子は、暗黒星雲ではイオン分子反応によって生成すると思われるが、質量放出している炭素星の周囲では、小さな炭素クラスターを経て生成す

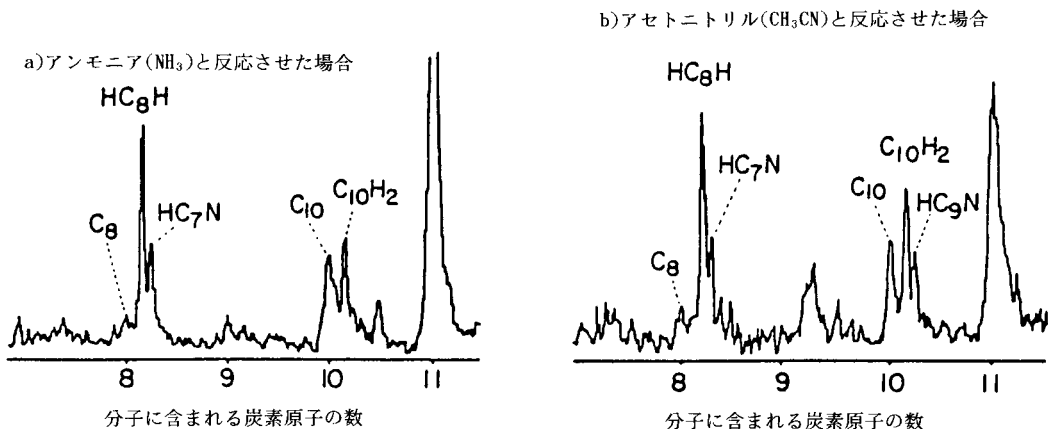


図9 小さな炭素クラスターと窒素化合物を反応させて得られる直線分子の質量スペクトル [Kroto, H. W., et al. 1987, *Astrophys. J.*, **314**, 352]. 生成物のいくつかは星間分子として観測されている。

ることが十分考えられる。

これまで見てきたように、黒鉛を蒸発させると、スス、鎖状の炭素分子、球状炭素分子が同時に生成する。宇宙では炭素が豊富にあり、炭素でできた塵や直鎖の炭素分子が観測されるので、実験室でそれらと同時にできる C_{60} などが存在しても不思議ではない。実験室でも宇宙でも、有限個の炭素原子の集合体としては、 C_{60} 分子がもっとも安定な形態であるはずである。この論理にしたがうと、星間塵の発生源である赤色巨星、新星、超新星、惑星状星雲などの周辺で、フラレン分子が観測される可能性は大きい。 C_{60} のイオン化エネルギーは 7.61 eV だから、 C_{60} 分子が宇宙にあるとすれば、その大部分は C_{60}^+ イオンとして存在すると考えられる。また、直鎖炭素分子と共存する炭素質の塵には、多重球殻構造の中心核が存在する可能性がある。

C_{60} やそのイオンは双極子モーメントをもたないので、電波天文学の対象にはならないが、赤外部や紫外部のスペクトル線が観測に利用できる。クロートらは、炭素星 IRC+10216 の周辺で球状炭素分子の探索を行った。原始惑星状星雲 CRL 2688 (通称 Egg Nebula, 図 10) も、観測の対象となっている天体である。この星雲にも、質量放出している晩期型星があり、その周辺には大量のシアノポリイン分子が存在する。この星雲にあるシアノポリイン類は、微小な炭素粒子が互いに衝突し破碎することによって生成したと考えられ、同時に球状炭素分子も生成している可能性が大きい。 C_{60} 分子やそのイオンは、宇宙の厳しい環境にあっても十分長い寿命をもつはずである。また、CRL 2688 の外縁部は強く偏光しているので、カーボン・ナノチューブのような細長い塵の存在も予想される。しかしながら、実験室での分光学的な研究が不十分だったこともあって、今のところ、宇宙にフラレン分子が存在する確かな証拠は得られていない。

新しい形態の炭素との関わりが取り沙汰される

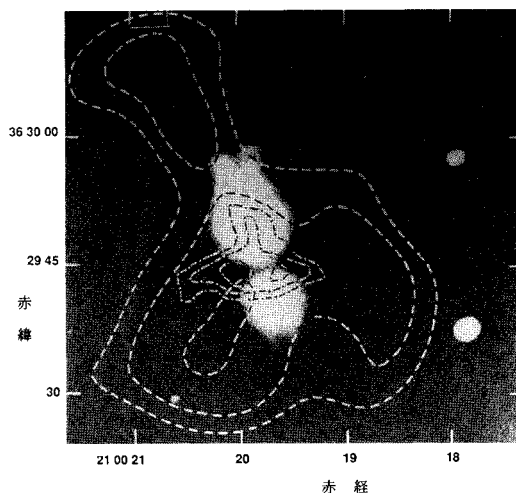


図10 原始惑星状星雲 CRL 2688 (Egg Nebula) [Kroto, H. W. 1988, *Science*, **242**, 1139]. 炭素質の塵に富む星雲で、 C_{60} の観測の対象となっている天体の1つである。HC₇N(---)とNH₃(-·-·-)の分布を示してある。

天文学上の問題は、まだいくつかある。その中には単なる憶測に過ぎないものもあるが、いずれも研究者のイマジネーションの産物として興味深い。その内のいくつかを紹介しよう。

これまでに、可視部を中心に幅のひろい星間吸収バンド (DIB: diffuse interstellar band) が 100 本以上見つかった。その起源はまだ明らかでないが、バンド幅がひろいことから、吸収体は数個以上の原子でできた分子またはイオンだと考えられる。その候補として、星の光によってイオン化したフラレン分子や芳香族炭化水素 (いわゆる PAH) 分子が挙げられている。DIB の中には、炭素に富む双円錐形星雲 Red Rectangle の発光バンドと一致するものもあり、安定な炭素分子や炭素化合物がその担い手である可能性は高い。フラレン分子に閉じ込められた金属原子も幅広い吸収線を示すであろうから、DIB の担い手の候補となりうる。最近クロートらは、金属イオンなどが外側から結合した C_{60}^+ イオンも有力な候補であると主張している。

遠くの星の光は、星間空間の吸収によって、短い波長ほど大きく減光して地球に達することが知られている。紫外部の減光の割合は217 nm付近で極大になる。通説では、この現象は銀河系内にあまねく分布する黒鉛の微粒子によるとされている。けれども、イオン化したり陽子を付加したりしたフラレンが星間空間を漂っていて、紫外部の減光を大きくしていることも考えられる。また、赤外部に見られる未同定赤外線は、芳香族炭化水素あるいは水素が付加した無定形炭素によるとする説が有力であるが、水素原子が付加して途中で成長がとまった不完全なフラレン分子がその担い手である可能性もある。

1992年に、ロシア産のシュンガイト(shungite)という岩石からC₆₀を検出したとの報告があった。シュンガイトは先カンブリア期の堆積物に変成してできた石炭もどきの岩石で、その質量の99%は炭素である。炭素質隕石からはまだC₆₀は見つかっていないが、黒鉛やダイヤモンドの微結晶が含まれることはある。先に触れたRed Rectangleでは、ダイヤモンドに似た発光スペクトルが観測されており、この星雲にはダイヤモンド様の炭素もあるらしい。これらの宇宙産ダイヤモンドは、多重フラレンが衝撃波を受けて生成したのかもしれない。実験室でも、C₆₀に20 GPaの圧力を加えるとダイヤモンドができる。

8. おわりに

炭素は宇宙に大量にあり、宇宙の炭素物質を扱っている研究者は多いので、天文学者がC₆₀の研究に大きな貢献をしたのはけっして偶然ではない。彼らが生み出した新しい形態の炭素からは、従来の常識をくつがえす発見が相次いでいる。C₆₀の天文学は始まったばかりで、まだ見るべき成果はないが、数多くの仮説や憶測が行き交っており、非常に楽しい研究分野になりつつある。この記事では省略したが、C₆₀の化学反応性もさまざまな角度から調べられ、C₆₀が関与するイオン分子反応

や、C₆₀に原子や原子団が付加する反応が多数見つかっている。部分的に水素が付加したC₆₀H₃₆のような分子もつくられた。NASAのジェット推進研究所では、質量が大きく安定なイオンをつくるC₆₀をイオンロケットの推進剤として利用することを検討しているらしい。読者とともに、フラレンの科学の今後の進展を見守りたい。

この記事を書くに当たって、三重大学工学部の斉藤弥八氏、および名古屋大学理学部の篠原久典氏、佐藤修二氏より有益な助言を賜った。三氏に厚く御礼申し上げる。

追記

最近、Allende隕石中に炭素の多重球殻構造が存在する形跡があるとの指摘があった [Becker, L., et al. 1993, *Nature*, **361**, 595].

参 考 文 献

C₆₀に関心をもった読者のために、入手が比較的容易な参考文献を上げる。1)と2)はC₆₀の発見者によるC₆₀発見談、3)と4)はC₆₀の一般的な性質を叙述した記事である。また、5)はフラレンの科学全般を扱った解説書、6)と7)はC₆₀の天文学的意義を検討した論文である。

- 1) Curl, R. F., and Smalley, R. E. 1991, *Scientific American* **265** (4), 32 [邦訳: 日経サイエンス, **21** (12), 36].
- 2) Kroto, H. W. 1992 *Angewandte Chemie, International Edition in English* **31**, 111.
- 3) Kroto, H. W., Allaf, A. W., and Balm, S. P. 1991, *Chemical Rev.*, **91**, 1213.
- 4) 相原惇一 1991, 化学, **46**, 825.
- 5) 谷垣勝巳, 菊地耕一, 阿知波洋次, 入山啓治 1992, 「フラレン」産業図書.
- 6) Kroto, H. W. 1988, *Science*, **242**, 1139.
- 7) Hare, J. P., and Kroto, H. W. 1992, *Accounts of Chemical Research*, **25**, 106.