

宇宙化学

—元素合成から生命まで

出口修至

総合研究大学院大学助教授天文科学専攻／国立天文台助教授

生命の起原を「宇宙化学」で考える

巨大な宇宙の片隅にある地球という惑星に、私たち人間をはじめとするさまざまな生物が存在するのは、とても不思議なことだ。

「宇宙になぜ生命が誕生したのか?」、「人類は宇宙で唯一の知的生命なのか?」といった問題について、人間は太古から考え続けてきた。多くの民族は、神話という形でそれに答えを与えている。たいがいは神による天地創造の物語で、神のあり方や万物のつくり方に、それぞれの民族の歴史や生活が反映されているようだ。

さて、科学において、「宇宙における生命の起原」を考える場合、宇宙生命そのものを論ずる、あるいは研究するより、生命の生まれる環境を分析する、論ずるほうが科学らしいと感じられるだろう。

一方、天文学の中でも、元素の起源、星間分子および星間塵、隕石、惑星の起源など、生命誕生に関する宇宙環境を探る上で欠かすことのできない領域の研究は、しばしばAstrochemistryとか、Cosmochemistryとよばれる。元素や分子の化学記号が頻繁に出てくるゆえんで、日本語では「宇宙化学」という言葉で表されることも多い。そして、ここ数十年、電波からX線にいたるさまざまな望遠鏡の発展や、惑星探査機の進展などにより、宇宙化学の研究は大きく進歩している。

同時に、地球上の生命についても、DNA分析などの化学的手法によって進化の大筋が明らかになってきた。宇宙における生命の誕生と進化を考える上で、「化学」は最も重要なキーワードである。

そこで、2002年度の総研大レクチャーでは、「宇宙における生命の起源を考えるための基礎を学ぶ」という視点から、「宇

宙化学」という学問を新たに構成してみようと考えた。これは十分に刺激的かつ分野横断的なテーマであり、さまざまな分野の研究所からなる総研大の特長を生かしたレクチャーとなる。この趣旨の下、宇宙化学の専門家のみならず宇宙に興味をもつ化学者も招き、学生が多角的に宇宙と生命の問題を学ぶと同時に、研究者間のダイナミックな情報交流の実現をはからんとした。

初日は夜まで真剣勝負

レクチャーは、7月29日午後から31日午後まで、国立天文台野辺山本館2階講義室で、講師6名と学生17名とによって行われた。そのプログラムを左の表に示す。講義の順番は、単に各講師の都合によって決まったのだが、あたかも意図したかのように、宇宙の始まりから惑星系の形成へとうまく並んだ。

初日は、宇宙の始まりと生命の起源とを考えることで、問題意識を高めることとなった。2日目は、星の死から新たな誕生へといたる過程が、電波、赤外線、X線による最新の観測によってどこまで明らかになったのかを、熱く議論することができた。最後の日は、隕石を調べることが星の誕生だけでなく、その死の研究にも繋がるという最新の知見が示され、また惑星の生成理論とハッブル宇宙望遠鏡の観測結果との関係を議論することもできた。

星の誕生は必然的にその死へと繋がるが、総研大レクチャーでは、「星の死から次なる星の誕生への過程」という新たな問題意識で生命の起源を見直すことができ、

「宇宙化学—元素合成から生命まで」のプログラム

7月29日	
13:00-15:00	宇宙における元素の起源 (梶野敏貴／総研大数物科学研究科・国立天文台理論天文学研究系)
15:30-17:30	宇宙生命と左右非対称性の起源 (黒田玲子／東京大学大学院総合文化研究科生命環境科学系)
20:00-21:00	生命の起源の解明は可能か (横尾広光／杏林大学保健学部)
7月30日	
9:30-12:00	銀河構造と星間分子の化学 (出口修至／総研大数物科学研究科・国立天文台電波天文学研究系)
13:00-15:00	星周／星間ダストの赤外線観測 (尾中敬／東京大学大学院理学系研究科)
15:30-17:30	星形成領域からのX線 (坪井陽子／中央大学理工学部)
7月31日	
9:30-12:00	隕石の起源 (甘利幸子／ワシントン大学宇宙科学研究所)
13:00-15:00	惑星の起源 (中川義次／神戸大学理学部地球惑星科学科)

これは非常に大きな収穫であったと自負している。さて、以下に講義の概要をまとめていこう。

初日冒頭の梶野さんの講義では、「宇宙では、どのようにして元素が作られたか」が、最新の宇宙論である「ビッグバン・インフレーション宇宙論」をもとに展開された。

点のような宇宙が真空のエネルギーによって急激な膨張「インフレーション」を起こして一挙に広がり、真空のエネルギーが物質と熱エネルギーに転化して、クォークやレプトン、光子などの素粒子による高温高密度の火の玉宇宙ができた。その後のより穏やかな膨張に伴う冷却の過程で、陽子や中性子が、次いでヘリウムなどの原子核が、さらに電子と結びついて水素原子やヘリウム原子がつけられていったという元素の起源論が、物質と宇宙進化の結びつきを強調しつつ展開された。

その後起こった星の内部での水素の核融合反応によるヘリウムの蓄積、ヘリウムの核融合反応による炭素、窒素、酸素の生成、それらの元素の核融合反応によるさまざまな元素の生成も、惑星の形成、さらには惑星上での生命の誕生という点で、重要な役割を果たしていることが指摘された。

また、鉄より重い重元素の起源は超新星爆発によることが、「すばる」望遠鏡の高分解能スペクトル観測、あるいは神岡のニュートリノ検出器による観測などを例に説明された。銀河の誕生とほぼ同時にできた第一世代の星に、これらの重元素を見つけ出すことができれば、宇宙初期の超新星爆発による元素合成の過程を

明らかにできるといふ。

梶野さんによれば、20世紀は「物質科学の時代」だったが、「21世紀は生命科学と宇宙科学の時代」だそうだ。その意気込みが伝わるような講義だった。

つづいて、「宇宙生命と左右非対称性の起源」というテーマで、黒田さんが講義を行った。「宇宙では、今のところ地球生命しか見つかっていないので、あくまで宇宙の物質が地球生命の左右非対称性にどう関わっているかについての話ですわよ」と断りながら、左右非対称性をあらゆるキラリティについて、「靴下は左右交換できるが、靴は交換できない」という原理と、その例を挙げながらの説明がまずあった。

ついで、物質世界のキラリティと生物世界のキラリティの違いに言及。物質世界では、キラリティのある分子なら右の靴型も左の靴型も存在する。一方、動物の外観は、巻貝などを例外にすれば、ほぼ左右対称にも関わらず、DNAを構成する核酸も、DNAの遺伝情報でつくられるタンパク質も、靴の一方の形の分子だけからできている（ホモキラリティ）。

話はさらに、野依良治博士がノーベル化学賞を受けたキラリティのある金属触媒、黒田さんたちの開発した世界初の固体のキラリティを測定できる装置などへと続いた。また、隕石中のアミノ酸のキラリティについての話もあった。そして、「地球生命のホモキラリティは、生命研究の大きな課題である」という言葉で締めくくられたが、まさにこれは生命の起源を解く一つの鍵であると思われる。

3日間のレクチャーシリーズでは、夜の講義を設定しないと学生に単位を出すこ

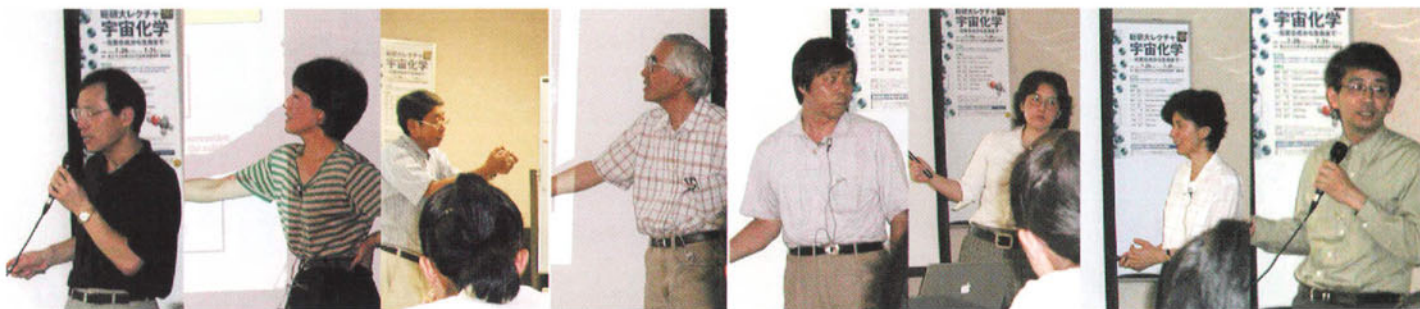
とが難しい。そこで、横尾さんには無理をいって夜の講義にしてもらった。そのテーマは、「生命の起源は解明可能か」という根源的な問題で、さまざまな生命起源説についての解説と、横尾パンスペルミア説の紹介、知的生命体捜索についての話があった。

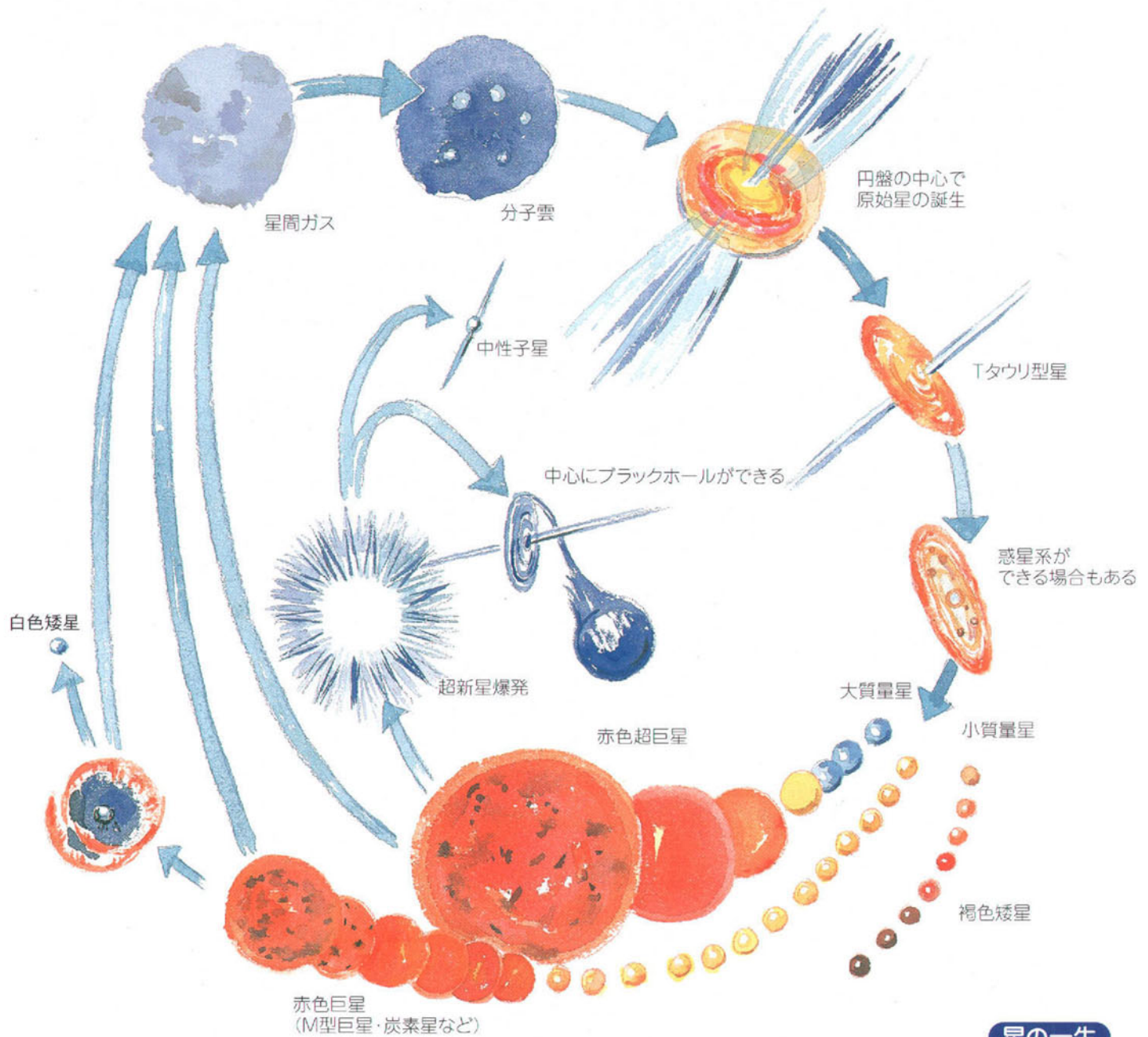
私たちは、地球生命以外の生命を知らない。したがって、地球外生命が存在したとしても、それがどんな分子からできており、どのように進化してきたかは見当もつかない。その在り方は多様だと考える人もいれば、地球生命とほぼ同様の分子、つまり20種のアミノ酸とDNA/RNAを使ってできているはずだと考える人もいる。いずれにしろ、生命がいったんできてしまえば、その進化がさまざまな偶発的要因に左右されるにしろ、ある時点で知性をもつ生物が現れ、それが支配的な生物となる、という考えが現状では大勢を占めている。

一方、宇宙の中で最初に現れた生命が全ての元で、地球生命はその子孫であるという考え方がパンスペルミア説である。そして、「地球生命体の遺伝情報には、最初に現れた知的生命からのメッセージが暗号化されている」というのが、横尾パンスペルミア説だ。

電波、赤外、X線で探る宇宙環境

2日目の午前中は、私（出口）が「星間および星周分子と銀河構造について」の話をした。宇宙には数多くの分子が発見されており、それが星に取り込まれたり、星の周りから放出されたりしているが、これらの分子が生命の元にまでつながる可能性があるのか、ないのかについての





星の一生

解説を行った。

星間および星周分子が生命の元になるためには、「分子は紫外線により分解されてしまう」あるいは「原始惑星大気ができて母星の活動により吹き飛ばされる」といった理論からくる問題をクリアせねばならず、これがはたして可能かどうかについて考察した。

野辺山に電波望遠鏡をつくった主な目的は、当初は星間および星周分子と生命

誕生の可能性を探る研究を行うためだったが、現在ではそこから派生した銀河系内外のさまざまな天体の研究に発展しているという話となった。また、私の指導した学生がIRAS19312+1950 という不思議な天体（通称クラゲ星雲）の発見によって2001年度の総研大長倉研究奨励賞を受賞したが、これがJ型炭素星といわれる赤色巨星の起源を知るための鍵となるかもしれない、という話もした。赤色巨

星は星の老齢期の姿で、中でも炭素を多く含むものを炭素星、とくに炭素13の多い星をJ型炭素星とよんでいる。

午後の前半は、尾中さんが、「星間および星周塵（ダスト）の赤外線観測」の話をした。星間塵は、炭素星やM型巨星で作られて放出されるのに加え、超新星爆発によっても生成される。ダストは、進化の進んだ星にも若い星にも見つかっており、その成分は、X線や赤外線の観測に

よって徐々に明らかにされつつあり、その形成過程も、次第に分かりつつある。また、数年後に打ち上げ予定の日本の赤外線観測衛星Astro-Fや、米国の打ち上げたSIRTIFによって、今後さらに多くのことが明らかにされるだろうという話だった。

午後の後半は、ペンシルバニア州立大学から帰られたばかりの坪井さんが、「星形成領域から放出されるX線観測」についての話をした。X線天文学は、ここ10年ほどの間に急速に大きくなった分野であり、優秀な若い研究者が大勢集まっている。なかでも、坪井さんは、検出できるはずがないと思われた褐色矮星という非常に質量の小さな星からのX線を、アメリカのX線観測衛星「チャンドラ」のデータから検出し、新しい分野を切り開いている。

X線で見た星生成とはどういうものかについて、主系列星（大人の星）に進化する前の星、Tタウリ型星とよばれる質量の小さい星のX線観測をはじめとして、多くの星の例をもとに、話が展開された。星の周辺に広がるガスをとらえる電波観測とは異なり、個々の星を特定できるX線観測の視点からの星形成の話に、個人的には大きな感銘を受けた。

隕石に記録された宇宙史

最終日の午前中、「隕石の起源」について、ワシントン大学（セントルイス）で活躍中の甘利さんの話を聞いた。南極での大量の隕石の発見により、今や日本は隕石大国となっている。隕石は、元々超新星や赤色巨星の内部で作られたダストが、爆発後の新たな星生成の時代に固まり大きくなったものだ。地球に落ちてくるまでにさまざまな変成を受けているが、近年、同位体定量分析によってその過去を推定することができるようになった。

甘利さんのグループは、変成の少ない炭素質隕石中から前太陽系粒子とよばれるダスト粒子を取り出して調べている。粒子中の炭素、ケイ素、マグネシウムなどの同位体の定量分析を行えば、それらの粒子が太陽系にくる前の状態を知るこ

とができ、それらが、炭素星で作られたものなのか、M型星で作られたものなのか、超新星起源なのかを明らかにできる。つまり、太陽ができる一世代前の星の情報を隕石は保持しているのである。

この話は、これまで隕石など考えたこともなかった私には大きな驚きだった。私たちのグループが、電波望遠鏡を使って研究してきたJ型炭素星の起源と大いに関連するからである。

最終日午後には、中川さんが、「理論的観点から見た惑星系の形成」についての話をした。私たちの太陽系は、9個の惑星および小惑星、彗星などから成り立っている。これらがどのように形成されたかについては、京都学派と呼ばれる京都大学林忠四郎博士門下の研究者たちが1980年代から理論的研究を重ねてきている。地球がどのように生まれ、どのような変遷を遂げてきたかをとすることは、地球生命の起源を考える上で、最も重要な要素である。

理論的には微惑星が約1000万年の時間をかけて衝突合体し地球ができたと言われる。木星の核も同程度の時間で、土星の核は1億年程度で生成される。しかし、現在の理論では、天王星や海王星の核は、外側過ぎて生じないという。また、原始太陽系星雲の散逸がどのように起こるのかについても、理論的には分かっていない。したがって、ハッブル宇宙望遠鏡などによる太陽系外の原始惑星系円盤の観測が重要であるし、また、太陽系以外の

惑星系もいろいろと観測されており、今後その検出が進むだろうという話であった。

総研大レクチャーを終えて

参加学生17名の内、総研大生は5名、東京大学の天文専攻の学生が4名、南は山口大学、北は筑波大からも参加があった。その他、寿岳潤、広田襄のOB教授、総研大から湯川哲之教授が参加され、議論を大いに盛り上げてくれた。

単位の必要な学生には「今回のレクチャーのトピックの一部について、自分の研究から見て興味のある事柄を論ぜよ」という題で、レポートを提出させた。総研大生3名（天文科学専攻および生命体科学専攻）、および東大生2名（天文専攻）からの提出があり、単位を認定した。「太陽コロナ加熱と生物の非対称性との関連」など、ユニークな観点から生命現象を考察したものや、「生命現象に関する情報取得には、多くのアプローチが存在するのだということ」を再認識でき、長期的な研究目標を考える上で非常に有益なものだった」といった感想をもらった。

総じて、普段自分の行っている研究と異なった観点から物事を見直してみることの重要性を、学生諸君が十分認識してくれたという手応えを感じた。

また、講義の様子はビデオに収録し、Quicktime ビデオファイルに落とし、<http://www.nro.nao.ac.jp/~deguchi/GUAS/> からダウンロードができる。



出口修至（でぐち・しゅうじ）
星間分子の研究からスタートし、星間レーザー、重力レンズ、進化の進んだ星、という一見バラバラに見える天体を研究する中、これらを統合した新たな学問領域を開拓しつつある。天体レーザーをキーワードに、生命の起源、ブラックホール、ダークマターなどとの関連を追求している。