

# 暗黒星雲の化学進化を追って

——鈴木博子さんの研究——

海部 宣男\*・斎藤 修二\*\*

鈴木博子さんが思いもよらぬ事故で私達の前から去ってしまわれてから、早くも二カ月近くの時がたった。いまだに信じきれないでいる私たちも、鈴木さんなしでの研究・観測所の運営を、ともかくも進めていかねばならない。それはまた私達に、鈴木さんという存在の大きかったことを一つ一つ思い知らせずにはおかないのである。

鈴木博子さんが、野辺山の星間分子探査グループの中核としてこの 1~2 年の間に新しい星間分子を次々と発見し、充実した研究の時期を迎えて張りきっていたことは、よく知られている。これらの成果は、京都時代に育んだ鈴木さんの星間分子反応の理論を支え、さらに大きな飛躍へと向わせるものだった。鈴木さんがそうした次の発展、特に暗黒星雲の進化への観測的手がかりについて鋭く迫ろうとしていたことは、残されたファイルやメモからも読みとれる。鈴木さんと共に密接な共同のもとで研究を進めてきた私達としては、力及ばずながらも鈴木さんの考えていた方向を改めてとらえなおすために、気力をふるいおこさねばならない。そうした願いをこめて、鈴木博子さんのこれまでの研究をあとづけ、また思い描いていたであろう構想を追ってみたい。

鈴木さんが京都大学理学部物理学科から大学院で林研究室へ進んだのは、1970 年である。大学院に在学された 5 年間は、星間分子発見のラッシュの時期とちょうど重なる。当時、林研究室では星の生成過程の研究から次第に太陽系の起源の研究に力を移しつつあった時期と思われる。その中であって鈴木さんは、星間物質から星への進化過程での星間分子が占める重要性にいち早く着目し、星間空間における分子の生成過程を研究テーマに選んだ。

1970 年代当初、それまでに検出された星間分子種やそれらの存在比を説明するために、多くの人々が星間空間での分子の生成機構を提案していた。その中でも代表的なのが、Watson, Herbst and Klemperer, Oppenheimer and Dalgarno などによるイオン分子反応説である。彼らのモデルは、各種の関連する原子・分子種について生成消滅反応を組立て、定常状態での解を求める方法であった。しかし、それらはいずれも分子の生成消滅を雲の進化（物理環境の変化）と独立に考えたものであった。これに対して鈴木さんは、収縮しつつある分子雲を考え、

その中で代表的な分子種の化学反応を計算機を用いて追跡したり。結果は、光学的にうすい状態、つまり星からの紫外光が自由に入り込める状態では反応の進行が速いが、光学的に濃い状態へ変ると  $C^+$  が中性化され、反応の進行が非常に遅くなる。なぜなら、この領域で反応を進めるのが、効率の悪い宇宙線によるイオン化へと変わるからである。この結果、反応時間は雲の寿命に匹敵するようになる。このような場合には定常状態の取り扱いを適用できない。しかも、光学的な深さが増してきて、 $C^+$  が中性化する領域では分子の存在比はあまり変化せず、CO の量がゆっくりと増加する一方、他の含炭素化合物の存在量が低下する傾向があることが分った。これら初期の結果の持つ意味は非常に大きく、鈴木さんのその後の星間化学への考え方に大きな影響を与えたようである。

濃い雲では定常状態の取り扱いが不適当であることに確信をもった鈴木さんは、濃い雲の化学を徹底的に調べた。すなわち、重元素を 2 種まで含む分子およびイオン 234 種について、ほぼあらゆるイオン-分子衝突の組合せを考慮し、2885 の反応を用いて反応ネットワークを作り上げ、これを時間的に追跡した<sup>2)</sup>。結果の一部を図 1 に示す。水素の密度 ( $n_H$ ) として  $10^5 \text{ cm}^{-3}$  の場合、定常状態に到達するのに必要な時間  $t$  は  $2 \times 10^{16} \text{ s}$  となり、これは雲の寿命と同程度となった。この結果は、当時知られていた星間分子の化学を徹底的に追求した点で、また、星間化学に時間進化的 (time evolutionary) な考え方を持ち込んだ点で画期的なものであった。

この大規模な星間化学反応のシミュレーションは鈴木さんに次の展開のきっかけを与えた。濃い雲の化学では飽和炭素分子も不飽和炭素分子も同等に生成される。しかるに、それまで知られている星間分子の中では、直線炭素鎖分子に代表される不飽和分子の存在が目立ち、観測的にも分子雲での両者の分布は必ずしも対応していない。炭素鎖分子の生成については Schiff and Bohme や Mitchell らが、炭素鎖が  $C_2H_2$  (アセチレン) のユニットで延びる反応機構を提案していた。これに対し鈴木さんは、初期の研究で見出した結果—— $C_2$ ,  $C_2H$ ,  $C_3$  などの含炭素分子が、 $C^+$  の領域と CO の領域の境界、すなわち中性炭素 (C) の領域 (図 2) で特に多く生成すること——にヒントを得て、炭素鎖分子の新しい生成反応機構を提案した<sup>3)</sup>。すなわち、紫外光がある程度入り込める領域で生成する  $C^+$  により炭素鎖が一つづつ延びるも

\* 東京天文台 Norio Kaifu

\*\* 名大理 Syuji Saito

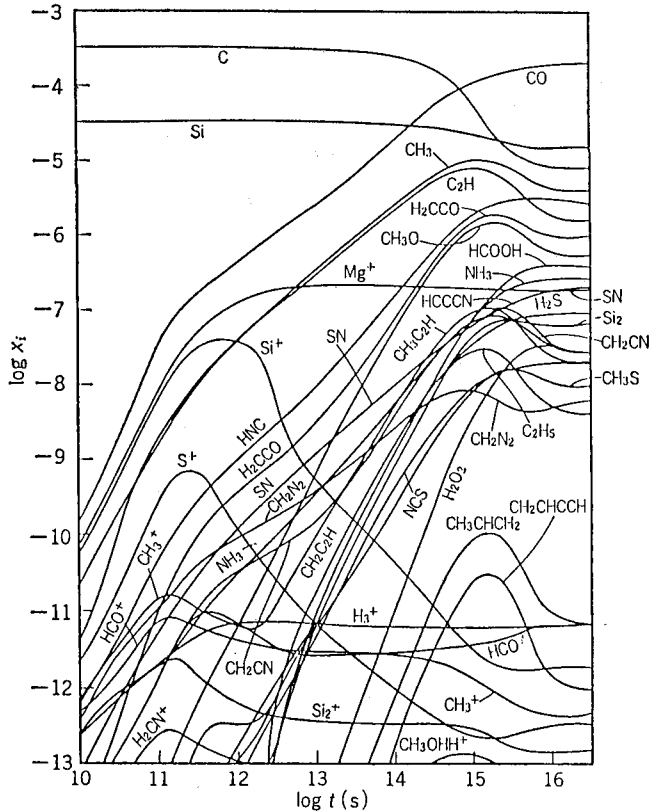


図1 濃い分子雲における各分子の相対分布 ( $x_i$ )  
 $x_i = n_i/n_H$  ( $n$ : 個数/cm<sup>3</sup>,  $n_H = 10^5$ /cm<sup>3</sup>),  $t$ : 時間.

デルである。図3に示したように、光の強い領域(A)では  $C^+$  から  $CH$ ,  $CH_2$  が生成しても、再び光解離され  $C^+$  と水素に戻ってしまう一つの反応サイクルをなしているが、雲の表面からある程度深い領域では、光の量が少なくなる一方、 $C^+$  イオンもある程度残っているので、 $CH$ ,  $CH_2$  はさらに  $C^+$ ,  $H_2$  とつづいて反応し、 $C_2H^+$  や  $C_2H_2^+$  を与え (B), 鎖を一ケ延ばす。このモデルは、化学反応の進行を雲の進化と組合せて初めて生れたものである。この考え方は、後に  $CCS$ ,  $C_3S$  の発見によって、 $C_nS$  のシリーズの直線炭素鎖分子の存在が明らかにされたことで、さらに強められることになる。

鈴木博子さんは 1983 年、研究員として野辺山宇宙電波観測所に移られた。前年の夏、45 m 鏡から続々と生まれはじめた新しい星間分子スペクトル線の同定に参加を要請されたことがきっかけとなった。自分の理論を実際の観測の場で検証したいとの思いを前からいっていた鈴木さんは、野辺山での研究に大きな展望を見出すと同時に、遅れていた 45 m 鏡のスペクトルデータ処理のソフトウェアづくりにも大いに意欲をそそられたようである。実際鈴木さんは、その後3年がかりでスペクトル解析システム“LINEPROC”を完成した。これは 32,000

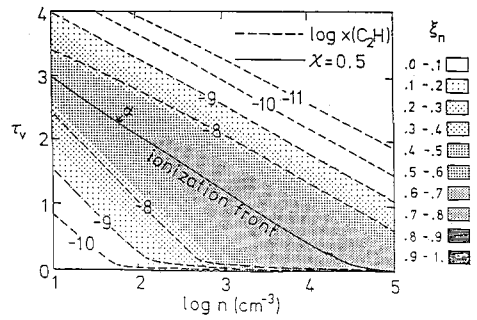


図2 星間雲の構造と炭素鎖形成領域。縦軸は光学的な深さ  $\tau_v$ 、横軸は水素密度。 $\alpha$  上では  $[C^+] = [CO]$ 。  $\alpha$  の右上の領域では  $CO$ 、左下の領域では  $C^+$  がそれぞれ炭素の主な存在形態である。鎖線は  $C_2H$  の濃度の等高線。  $\xi_n$  は炭素鎖生長の指数。

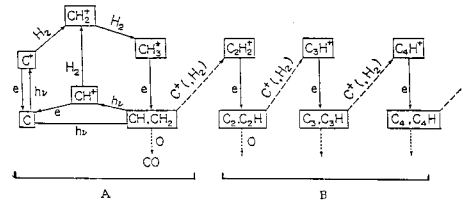


図3 炭素鎖形成反応過程。Aは光学的にうすい領域での反応。BはAのすぐ内側の領域での反応。

チャンネルの音響光学型電波分光計 (AOS) が生みだすぼう大なスペクトルデータを迅速に処理・解析し、等高線マップやカラーグラフィックなどの形でとり出すソフトウェアで、私達や毎年野辺山を訪れる観測者が便利に使っているものである。鈴木さんは、45 m 鏡のソフトウェア責任者として、いつも意欲的に観測・データ処理能力の向上を考え、実行しつつあった。

鈴木博子さんの参加で、野辺山での星間分子スペクトル探査の中心は、自然に暗黒星雲へとむけられることになった。星間物質の大部分を占め、星を生み出す素材である暗黒星雲について、分子組成を総合的に調べその中の化学反応を観測的に把握していこうという大きなプロジェクトである。鈴木さんの強い要望もあって、それまで 8,000 チャンネルであった高分散 AOS を、高帯域 AOS と同じ 16,000 チャンネルに倍増して、1984 年頃から本格的にスタートした。

鈴木さんの野辺山での最初の成果は、未同定スペクトル線 U45379 の発見である<sup>3)</sup>。1984 年に暗黒星雲 TMC-1 で発見されたこの線は、非常に強いかかわらず何の分子によるものかその後3年間にわたって謎のままであった (図4)。しかしこの発見で、暗黒星雲中にはまだまだ未知の分子がひそんでいることが、私たちに確信されたのである。



写真: 45 m 鏡で観測中の鈴木博子さん。

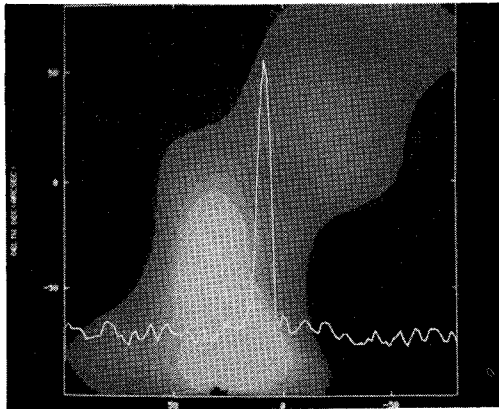


図 4 TMC-1 で発見された強い未同定線 U45379 (白い線) と、これで観測した TMC-1 のマップ (等高線)。

鈴木さんを中心とした観測の積み重ねによってデータはふえてゆき、新しい未同定線も次々見つかったが、新しい分子解明へのはっきりした手がかりはなかなかつかめなかった。私達は毎夏野辺山で「星間分子ワークショップ」を開き、関連分野の研究者の交流と議論を深めてきたが、鈴木さんはそのまとめ役として、多くの協力研究の種を作ってきた。従来から交流のあった分子分光の研究者に加え、反応論の小谷野・山崎両先生や量子化学計算の大野先生・平野先生をはじめ村上さん、高田さんなど多彩な顔ぶれがそろうようになったのは、全く鈴木さんの活躍によるものである。この中から、最近の新しい発展に結びつく密接な学際協力が育っていった。

1986 年の新直線炭素鎖分子  $C_nH$  の発見<sup>7),8)</sup>が、新たな契機となった。それまでの 36~50 GHz に加え 22~24 GHz でのサーベイを進め、新たに何本かの強い未同定線が見出された。そんな時期に、名大の実験室で、新分子 CCS, CCCS が検出され、U45379 を含めてそれまでに TMC-1 で発見していた 7 本の強い未同定線が、一挙に同定されたのである<sup>7),8),9)</sup> (図 5)。 $C_nH$  に続いて、S を含む新しい炭素鎖系列  $C_nS$  が発見されたことは、鈴木さんにとって極めて重大な意味を持っていた。鈴木さんの最後の研究会となった北京での IAU アジア太平洋

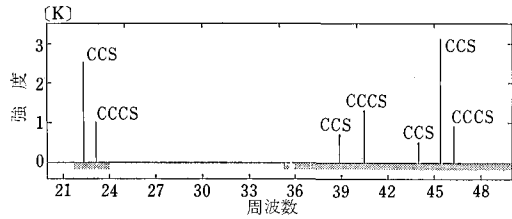


図 5 TMC-1 で発見された 7 本の強い未同定線群は、すべて新分子 CCS, CCCS に同定された。ハッチは、45 m 鏡でサーベイした周波数範囲を示す。

会議で、鈴木さんは次のような報告をした<sup>10)</sup>。

CCS, CCCS の存在比は大変大きく、CCH, CCCH とほぼ同じであることがわかった。これは宇宙での  $[H]/[S]$  が  $6 \times 10^4$  と極めて大きいことを考え合せると、 $C_nS$  が異常に多く作られるメカニズムが存在することを示している。一方 45 m 鏡の観測から、CCS は暗黒星雲の中で  $HC_3N$ ,  $HC_3N$  など直線炭素鎖分子と極めてよく似た分布を示す。ここで H, C, S の電離エネルギーが、13.6 eV, 11.3 eV, 10.4 eV と順次低くなってゆくことを考え合せると、 $C_nS$  は暗黒星雲中で先に述べた  $C^+$  領域よりもやや高密度の、 $S^+$  領域と中性 S 領域との境界近くで大量に作られるのではないか。  $C^+/C$  領域で作られた炭素鎖が、その材料となる。

この考えをまとめた反応スキームが、図 6 である。上部には図 3 に示した炭素鎖の骨格生成過程が、その下に  $C_nS$  分子形成の過程が示されている。鈴木さんの考えによれば、暗黒星雲の初期のまだ希薄な時期に、貫入してくる紫外線によって  $C^+$  が形成されており、この間に  $C^+$  が関与する速い反応によって炭素の鎖が 1 つずつのび、骨格を作る。重力によって暗黒星雲がちぢんでゆく過程で、次に  $S^+$  領域が優勢になり、大量の  $C_nS$  分子が形成される。暗黒星雲がさらに縮んで高密度になると、紫

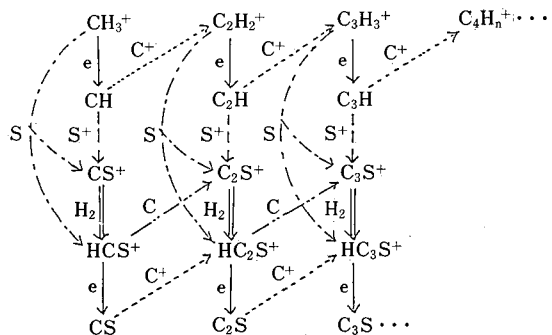


図 6 鈴木さんが考えていた  $C_nS$  分子の形成反応。  $C^+$  について、 $S^+$  が重要な働きをして、 $C_nS$  の鎖がのびてゆく。

外線は全く入射せず、宇宙線による電離で化学反応がゆっくりと進む状況となる。炭素鎖の骨格の多くは、 $\text{HC}_n\text{N}$  ( $n$  は奇数) などの安定した分子形態におちつくのである。

鈴木博子さんはこのように、暗黒星雲の進化と反応とをダイナミックに組合せ、 $\text{C}_n\text{H}$  と  $\text{C}_n\text{S}$  とを暗黒星雲の歴史を測るメジャーとしてとらえようとしていたと思われる。鈴木さんは  $\text{C}_n\text{S}$  を数多くの暗黒星雲で観測し、他の分子と比較することで、暗黒星雲の歴史を観測的に

明らかにするという野心的な提案をしていた。理論から観測へ、そしてその総合へと、鈴木さんにとって、真に心おどる高揚の時期であったにちがいない。無念極まりない、今回の事故である。

鈴木さんの描いてきた雄大な構想をうけつぎ、吟味し、現実の新たな発展を図ることは、まことに荷が重いとはいえ、残された私達の仕事として、しっかりとうけとめてゆきたいと思う。

- 1) "The Formation of Molecules in Contracting Interstellar Clouds" *Prog. Theor. Phys.* **56**, 1111 (1976), H. Suzuki, S. Miki, K. Sato, M. Kiguchi, and Y. Nakagawa.
- 2) "Molecular Evolution in Interstellar Clouds. I. Ion Chemistry in Dense Clouds" *Prog. Theor. Phys.* **62**, 936 (1979), H. Suzuki.
- 3) "Synthesis of Chain Molecules in Regions with Partially Ionized Carbon" *Astrophys. J.* **272**, 579 (1983), H. Suzuki.
- 4) "Detection of U45.379: An Intense, Peculiar Unidentified Line" *Astrophys. J.* **282**, 197 (1984), H. Suzuki, N. Kaifu, T. Miyaji, M. Morimoto, and M. Ohishi.
- 5) "Detection of Interstellar  $\text{C}_6\text{H}$  Radical" *Publ. Astron. Soc. Japan* **38**, 911 (1986), H. Suzuki, M. Ohishi, N. Kaifu, S. Ishikawa, K. Kawaguchi, and S. Saito.
- 6) "Detection of  $\text{C}_6\text{H}$  in the  $^2\Pi_{1/2}$  State toward IRC: 10216" *Publ. Astron. Soc. Japan* **39**, 193 (1987), S. Saito, K. Kawaguchi, H. Suzuki, M. Ohishi, N. Kaifu, and S. Ishikawa.
- 7) "Detection of Intense Unidentified Lines in TMC-1" *Astrophys. J. (Letters)* **317**, L111 (1987), N. Kaifu, H. Suzuki, M. Ohishi, T. Miyaji, S. Ishikawa, T. Kasuga, M. Morimoto, and S. Saito.
- 8) "Laboratory Detection and Astronomical Identification of a New Free Radical,  $\text{CCS} (^8\Sigma^-)$ " *Astrophys. J. (Letters)* **317**, L115 (1987), S. Saito, K. Kawaguchi, S. Yamamoto, M. Ohishi, H. Suzuki, and N. Kaifu.
- 9) "Laboratory Detection of a New Carbon-Chain Molecule  $\text{C}_3\text{S}$  and its Astronomical Identification" *Astrophys. J. (Letters)* **317**, L119 (1987), S. Yamamoto, S. Saito, K. Kawaguchi, N. Kaifu, H. Suzuki, and M. Ohishi.
- 10) "Sulfur-Bearing Carbon Chain Molecules in Interstellar Clouds" 4-th IAU Asian-Pacific Regional Meeting, 1987, Beijing, H. Suzuki et al.

学会だより

都立大学理学部公募

1. 公募人員: 助教授 1 名
2. 研究室: 助教授 1 名で新しく研究室を出発させる
3. 専門分野: 宇宙物理学
4. 待遇: 東京都の給与体系による (満 63 歳定年)
5. 着任時期: 決定後できる限り早い時期
6. 年齢: 35 歳から 40 歳くらいが望ましい
7. 提出書類: ○履歴書 ○業績リスト ○5 編程度の主要論文別刷と現在までの研究概要 (2,000 字以内) ○着任後の研究計画

(2,000 字以内) ○本人についての意見書 1 通と、本人について意見を述べ得る方 2 名の氏名・所属 ○健康診断書

8. 公募締切: 昭和 63 年 3 月 25 日 (金)

9. 書類の提出先・問い合わせ先:

〒158 東京都世田谷区深沢 2-1-1

東京都立大学 理学部 物理学科

教室主任 井上正晴

電話 03-717-0111 内線 3321

10. その他: 応募書類と朱書きし、書留で送付のこと  
適任者のない場合は決定を保留する