

# 炭素質の塵を追いかけてみると

坂田 朗

〈電気通信大学 電子物性工学 〒182 東京都調布市調布ヶ丘1-5-1〉

和田 節子

〈電気通信大学 化学教室 〒182 東京都調布市調布ヶ丘1-5-1〉

私たちは実験室で、天文学を研究している。観測された炭素質の塵のスペクトルとよく似た物質をつくらうというわけである。実験は、悪戦苦闘の連続である。これを要約し、現在の到達点を伝える。

炭素質の塵の兆候と考えられる観測スペクトルは、紫外部に“220 ナノメートルのこぶ”，赤外部にいわゆる赤外未同定バンド，およびごく最近散光星雲で見つかった赤い色の塵の輻射である。私たちのつくった炭素質の固体と銀河の塵とを，全スペクトル領域で比べてみる。

## 1. 水素原子ビームの夢

炭素質の塵を作ってみようと思ったのは，装置を組み上げてから5年も経ってからである。大体，私たちの実験はもくろみどおり行かない。これには，以下に述べるおもしろくほろ苦い先行実験がある。

最初に考えたのは，水素原子ビームをつくって，グラフィットなどに当てたら，どんな分子ができるかを調べる装置である。水素プラズマガスをつくり，細孔より吹き出す。これをグラフィットにぶつけ，できた分子を質量分析計で測定する。だれでも考えるアイデアである。

お金はない。まずは，水素原子ビームができるか。小さな発振機を組立て，パイレックス管にコイルを巻き，真空装置に接続し，水素ガスを流す。H $\alpha$ のピンク色は未だに目に焼き付いている。本当に，水素原子ができているのか。誰に見せても納得しない。本人も，である。

その後，パイレックスを石英ガラスに変え，放

電部を小さくし，そこにとりつけた細孔からガスを取り出した。さらに，プラズマ電源をマイクロ波を用いるなど，変更し，作動排気式の真空装置をつくり，発売されたばかりの四重極質量分析計で測定してみたら，どんなに条件を変えても，検出されるのは水素原子ではなく水素分子ばかりであった。この2年に及ぶ，“大浪費時代”に真空技術と発振技術と，溶接・金属加工技術を学んだのである。

捨てるに惜しい。装置を苦勞してつくった人間の普通の感情である。何か，役にたつに違いない。その頃，星間分子として炭素質の分子が30こほど見つかった。これをつくってみるか。そこで，水素ガスの代わりに，炭化水素ガスを入れればよい，ということになった。検出器の要求する高真空に合わせて，タングステン（最高の耐熱材）に0.1φの孔を開け，やっと頼んで，電子ビーム溶接でモリブデンに溶接し，それをステンレス，コバルト金属，ガラスと接続し，立派な，ガスビーム噴出部をつくった。実験は，成功裡に終わるかに思えた。放電開始後，見事なピークが描き出された。持続数分。ピークはびたりと消えた。おかし

Akira Sakata & Setsuko Wada: Experiments for Carbonaceous Dust

い。調べてみると、タングステンに孔がない。プラズマの熱でつぶれた。と思ってよくみると、黒い点が真ん中にある。炭素のすすで詰まったのである。これで、半年の努力がついえた。

この後、放電管を石英ガラスにし、吹き出し口のオリフィスを $1\phi \times 7\text{mm}$ にするのに、1年以上の歳月を要した。

## 2. 直線分子ができた

ガスをいろいろ変えて、炭化水素プラズマをつくってみる。アセチレンを用いた場合にのみ、他のメタンなどのガスを用いた時に比べ、異常な生成物の多さに気がついた。生成物にアセチレンが多いのである。当然ではないかと思うかも知れないが、小さな放電管( $\phi 30 \times 50\text{mm}$ )に300Wのマイクロ波を浴びせれば、どんな有機ガスでもいったん分解してしまう。生成物のアセチレンは再度つくられたものである。そういえば、アセチレンを使ったときだけ、プラズマの色が青白かった。 $\text{C}_2$ の存在を示すスワンバンドの色だ。

ここで、重要な実験の“鍵”をつかんだ。プラズマガス中では、 $\text{C}_2$ は強い。この $\text{C}_2$ の濃度を濃くして、そのガスを真空中へ吹き出して、……( $\text{C}_2$ )<sub>n</sub>の骨格を持つ分子が得られるはずである。

実際に、メタンを原料とし、プラズマ中にスワンバンドの最も強い条件(ガス圧4 torr, マイクロ波電源出力300W)で、放出ガスの質量分析ピークを調べると、M/e, 26, 50, 74, 98のピークが高い。直線分子が検出されたのである。これを、国際学会 (IAU #87 “Interstellar molecules”) で報告した。

直線分子の製造実験はこれまでである。“実験的には”、濃い高温のガス中に、 $\text{C}_2$ ラジカルをたくさんつくと、それからは、他の形の分子に優先して、いとも簡単に直線分子群ができる。

## 3. “220 ナノメートルのこぶ”物質

分子をプラズマからつくと、その放電管は黒

く汚れる。吹き出されたプラズマガスビームが拡散していく真空槽の壁は茶色くなる。これらの“炭素質の塵”の分類から、炭素質の塵の製造は始まった。

その当時、1980年代初頭には、私たちの頭には、炭素質の星間塵の特徴といえば、いわゆる星間減光曲線に示される“220 ナノメートルのこぶ”のみであった。後から思い起こせば、不勉強の極みでもある。炭素質の塵の赤外スペクトルにおける特徴は、1973年の11.3ミクロンピークの観測に始まり、1977年には、ラッセルらによって、現在赤外未同定バンドと呼ばれる塵のピークがNGC 7027において、3.3, 3.4, 6.2, 7.7, 8.6, 11.3ミクロンに見つかったいたのである。

最初に分析した真空槽の壁の付着物や、プラズマ放電管内の“よごれ物質”の紫外・可視スペクトルからは、星間塵の観測データとの対応はほとんどなかった。しかし、いくつかのタイプに分類できた。つまり、高温になる放電管内では、当たり前のことだが炭素に富む黒色物質ができ、プラズマ放電管の外側では、もう少し水素を含んだ有機質の析出物が得られる。

ひょんなことから騒ぎは持ち上がった。プラズマビームから得られる、真空槽の壁上の褐色物質を採取しようと、ビーム吹き出し口から5cmほど離れた位置の壁上に石英板を置いた。その石英板に一面に広がっている褐色の物質と重なって、黒色の物質が彗星の尻尾の形で付着していたのである。この黒色物質は妙な物質である。原因を探ってみると、放電管のプラズマガスの吹き出し口がやや下方に傾いてできていたので、吹き出された濃いビームが直接石英板を照射したことがわかった。それまで、濃いビームの中でつくられる物質があるとは考えたこともなかった。私たちの頭には、これはもしかすると、と好運の予感が頭をよぎった。

測定の結果、“220 ナノメートルのこぶ”を持った、夢にまで見た”星間減光曲線”が得られた<sup>1)</sup>。

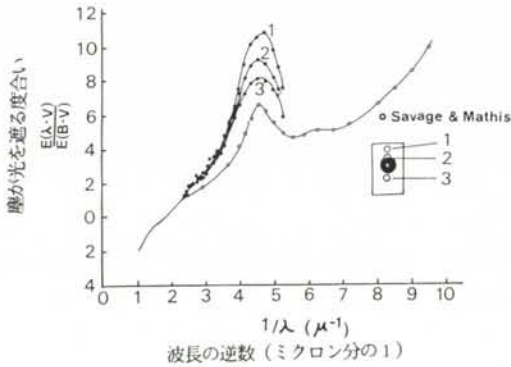


図1 星の間に散らばっている塵と、私たちがつくった炭素質の塵の紫外線に対する性質の比較。図中、白丸を実線でつなげたものは、観測データである。黒丸を実線でつなげたものは、つくった塵のデータである。1, 2, 3 はつくった塵をくっつけた基板上的場所を示す。どの場所でも、濃さは違うが“220ナノメートルのこぶ”が見られる。

#### 4. 赤外未同定バンドとの出会い

1983年にハワイのヒロで、グリーンバーグたちが、久しぶりに塵関係の小さなミーティングを実験屋、観測屋を集めて行おうとしていた。この会に、坂田がグループの代表として行こうとした矢先、たいへんなことに気がついた。最初は、単に塵の合成実験の結果を報告すれば良いと思っていたのである。会のお知らせの英語の紙をよくみて、表題は、“星間塵の赤外観測と実験”であった。赤外スペクトルという文字に気がついた。あと10日である。発表の準備は、“220ナノメートルのこぶ”を示す物質（このときには、急冷炭素質物質と命名してあった）の紫外から遠赤外領域へかけての減光スペクトルであった。議論がまったくかみあわないのでは、と心配した。

急ぎよ、赤外領域のスペクトルを再度精密に測定してみることにした。手持ちの赤外スペクトロメータは、2.5ミクロンから15ミクロンまでの測定範囲であり、遠赤外部まで測るには、われわれの大学の物性関係の研究室までいく必要があった。そこで、測定した50ミクロンまでのスペクト

ルには、3.3, 3.4, 6.2, 11.3ミクロンなどの赤外未同定バンドに特徴的なピークがはっきりと識別できた。

それまで、紫外・可視減光の測定には、試料は少なくてもよかったが、遠赤外部までの測定には、多量の試料が必要であった。そのため、何回も放電を繰り返し、プラズマからの放出物をたくさん積み重ねた。その中に、この赤外未同定バンドの原因をなす物質が、“220ナノメートルのこぶ”物質とともに含まれていたのである。

#### 5. 赤外天文学に入門

ヒロのミーティングには、25人ほどの関係者が集まった。議論は、さっぱりわからなかった。なにやら3ミクロン吸収のピークが水の氷だとか、銀河中心方向の3ミクロンスペクトルは形が違ふとか、にぎやかであった。拍子抜けしたことに、赤外未同定バンド関係の議論が私たちの話を除いては、ほとんどなかった。あとで、立派な報告書を見て、整理してみると、……グリーンバーグを中心に実験、ベックリンを中心に観測と、2日にわたってに華々しく（騒がしく）行われたことがわかった。

ここで多くの赤外線天文研究者と知り合えた。特に、ミーティングの後、ハワイ大の赤外線天文学研究所を訪れた際、トクナガと知り合えたことは後の研究の発展に大いに役だった。

翌年、赤外未同定バンドを示した物質の詳しい測定をして、天文雑誌に報告した。この未同定バンドを示す物質は、真空槽の壁上で得られる褐色の有機質の物質であった<sup>2)</sup>

私たちの話(QCC, 急冷炭素質物質説)が1984年3月に、続いてライバルのPAH説(多環芳香族分子説)が4月に発表された。以来、長い間決着がついていない。こちらは向こう気の強さとフィロソフィーで、敵はNASA(アラマンドーラ他)とESA関係(レジェ他)の連合軍の総合力で、……両方とも一歩も引こうとしないのである。

## 6. 新たなる戦線は、塵の赤色輻射

これまで、炭素質の塵の候補をめぐって、戦線は2つあった。戦況報告を自分ですると信用度がいまいちだが、紫外部の“220 ナノメートルのこぶ”では、QCC 説は圧倒的に有利である。PAH 説では塵研究の権威であるドンがまとめたように、全く兆候を示すものすら示せない。もう1つは、前述の赤外戦線である。

第3の戦線が展開されつつある。火をつけたのは、ウィットである。彼は、塵の散乱観測の名手

である。微弱なシグナルから情報を読みとる才能には、観測屋の真髄に触れた思いがする。彼はひとつひとつでは、到底シグナルと判別できないようなノイズっぽい24個のデータから、きちんと有意な結果を引きだした<sup>3)</sup>。

反射星雲の塵が、赤い色の輻射をしているのを見つけたのである。彼はこれが炭素質の塵によると推定した。こうした塵の輻射は、銀河の反射星雲ではどこでも見つかりそうである。

塵が出す赤外線強さ vs つくった塵が吸う赤外線強さ

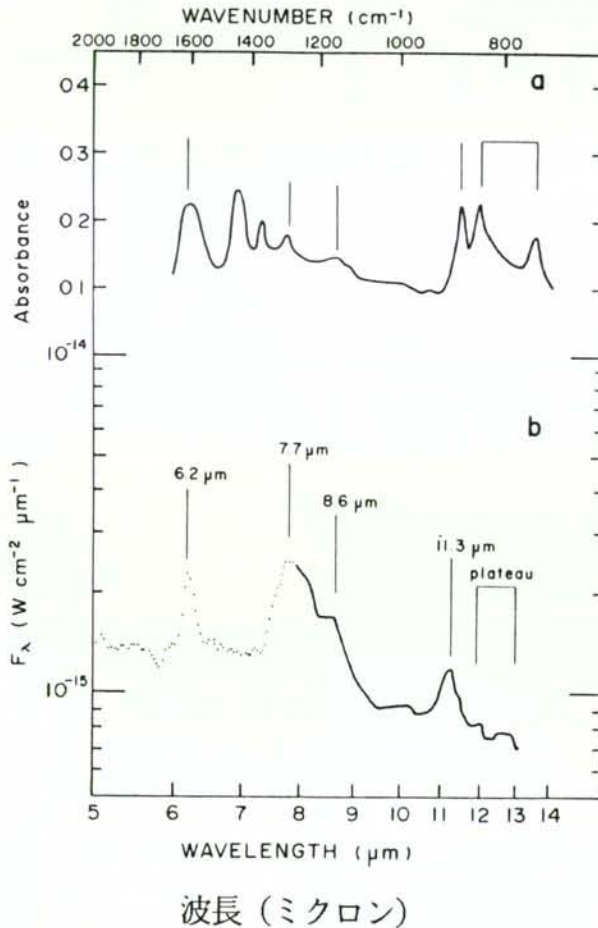


図2 星の周りの炭素質の塵の赤外線に対する性質と、私たちがつくった炭素質の塵の赤外線に対する性質の比較。aは、つくった塵のスペクトルデータ。bは、観測データ(HD44179)。aは吸収、bは発光の強さでめもった。一般に、物質の吸収と発光のピークは同じ波長に存在する。多少、余分なところはあるが、全体によく似ている。

## 7. QCCの蛍光輻射

実をいうと、……という話が多いのは私たちの研究スタイルの常である。今度も実はという話がある。ウィットたちはとうに、“赤い平行四辺形”と呼ばれた星雲を伴った天体で、この星1つだったが、塵による赤色の輻射を見つけていたのである。この観測を知らされて、QCCの蛍光輻射がないか調べたことがある。QCCの蛍光輻射は、通常は黒い物質(“220 ナノメートルのこぶ”の原因物質)と褐色膜状物質とが共存しているので、この固体に紫外線を浴びせても強い発光が見られない。そこで、QCCの成分をメタノールに溶かしてみると、その液には黄緑色の蛍光があった。これは、観測とまったく違う。実は、捨てておいたのである。

その後、QCCのタイプ分けが進み、“220 ナノメートルのこぶ”の原因物質と、赤外未同定バンドの原因物質をきちんとわけてとれるようになった。最近になり、赤外未同定バンドの原因となる褐色膜状物質を熱変成させると、“220 ナノメートルのこぶ”物質になるのではないかという予測のもとに研究を進めようとしていた。まずは、赤外未同定バンド物質をとって、卒業研究の学生に“もの”を見せようとした。そのとき、紫外線照射源が同じ階にあることに気がついた。新任の同僚の教官が、自身の研究の必要上、それをもっていたのである。すぐさま、ちょっと借りて、これに紫外線をあてた。なんと、赤い蛍光を発するではないか。そういえば、前はメタノールに溶かして測ったのだった。この物質のなまの蛍光を見たのは、これが初めてであった。

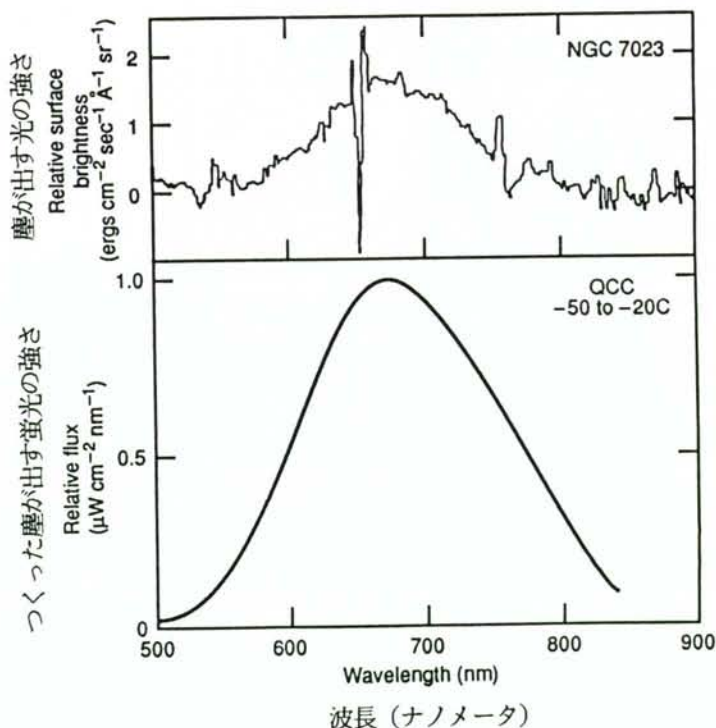


図3 炭素質の塵がふく射している赤い色の光のスペクトルと、私たちがつくった炭素質の塵の赤い色の蛍光スペクトルとの比較。上図は、散光星雲(NGC7023)のデータ。下図は、つくった塵のデータ。

精密な測定結果をだすために、蛍光スペクトル測定のスぺシャリストに参加してもらった。しかも、いいことに、彼は低温技術のエキスパートでもあった。低温の基板上で、急冷固体を集められるようになり、その蛍光スペクトルがウィットの観測データとよくあうことを明らかにできた<sup>4)</sup>。

## 8. QCCの構造について

炭化水素プラズマには、C<sub>2</sub>をはじめ活性な化学種が多く含まれる。このようなガスが真空中へ吹き出され、壁上で褐色膜状固体を形成すると、その固体は外見的には(光学顕微鏡で見て)均質だが、分子構造を調べるとゴチャゴチャした構造のものになっている。いろいろな結合の集合体となるのである。

このゴチャゴチャした構造のものがプラズマからの急冷固体の特徴である。これを、何とか分子とか、何とか

結晶とか分かりやすいように説明してほしいといわれると、いつも当惑する。これまで、しかたなく部分構造について、報告してきた。

全体構造が記述できないからといっても、実際に物質は存在する。この種の物は、石炭、ゴム、木炭、炭素質隕石の炭素質部分など、炭素質物質ではたくさんある。少しずつ、構造を明らかにするしかない。

低温の基板で集めたQCCは、反応しやすい物質である。空気中で着火すると瞬時に燃える。放置すると黒みを帯び、変質する。このQCCは環境が変わると構造を変える。

プラズマからできる急冷固体は、プラズマの状態、固化するときの条件、さらには、それ以後の環境の変化により変わる。すると、何でも出てくる玉手箱のように考えられやすい。しかし、でき方や変化の法則ははっきりとしている。いまは、それを明らかにする仕事よりは、むしろ、まずはいろいろ条件を変えてみて、観測データと合うスペクトルを示すQCCを見つけることが肝心である。観測データと合わない物質をつくっても、天文学では誰も相手をしてくれない。

まだ、3.53ミクロン、5.2ミクロンなど、特殊な天体で見られる小さなピークを、明らかにしなければいけない仕事が残っている。さらに、小マゼラン星雲、大マゼラン星雲などの星間塵の減光スペクトルから、銀河の成長を説明したい。これは、もっとも大事な仕事と考えている。

## 9. まじめな実験天文学

これまで、実験装置を工夫して塵の正体を知ろうとしてきた。まじめな実験天文学者のつもりである。もっと仲間が増えればよい。そこで私たちに得た教訓をお伝えする。

私たちの実験では、よい成果を直接ねらって得たことはほとんどない。いつも当てがはずれる。そのはずれた近くに、実は……という意外な成果が潜んでいた。当たらずとも遠からずといえる場

所に、ねらいを定めたからであろう。通常は、当てがはずれると、それまでの努力はドブに捨てることになる。実験は、大ばくちである。このかけごとに、耐える度胸が必要である。

ねらいはいい加減でよい、ということではない。ひとつの目的にきちんと絞り込まないとあぶない。実験をやればやるほど、天文学では意義は不確定だが、他分野ではおもしろそうなテーマが山ほど見つかる。つつい、実験天文学から消えてしまう。この誘惑に耐える心構えが実験天文学には必須である。

### 参 考 文 献

- 1) A. Sakata, S. Wada, Y. Okutsu, H. Shintani, and Y. Nakada, 1983 *Nature*, **301**, 493.
- 2) A. Sakata, S. Wada, T. Tanabe, and T. Onaka, 1984 *Astrophys. J.*, **287**, L51.
- 3) A. N. Witt, and T. A. Boroson, 1990 *Astrophys. J.*, **355**, 182.
- 4) A. Sakata, S. Wada, T. Narisawa, Y. Asano, Y. Iijima, T. Onaka, and A. T. Tokunaga, submitted to *Astrophys. J. Letters*.

☆

☆

☆

☆