

『上田良二先生生誕百年記念講演会』

2011年10月1日、名古屋大学 IB 情報館

上村泰裕准教授（名古屋大学環境学研究科（社会学講座））による

録音テープ起こし

運のよい人は偉い人——ナノ科学におけるブレイクスルー

篠原 久典

私と上田先生の結びつきは諸先生方や上田門下の方々ほど強くはないですが、私個人は上田先生を心の師だと思っています。今日のタイトルは「運のよい人は偉い人」ですが、これは上田先生の名言の一つです。次に掲げた「上田グループ」という言葉ですが、私は上田学派と呼びたいですね。よく京都大学の連中は京都学派と言いますが、名古屋大学では学派という言葉を使いません。私は上田先生のグループこそ、上田学派という言葉を使ってアピールするのがよいと思っています。この上田グループの研究と、いわゆるナノカーボンと呼ばれる、ここ20年急速に発展した分野は非常に密接に関連しています。誤解を恐れずに言わせていただければ、ナノカーボンあるいはナノテクノロジー一般のすべては上田グループに帰着すると私は思っています。最後に、ナノカーボン研究の現状も少しお話させていただきます。

ナノカーボンはカーボンだけでできている物質です。10のマイナス9乗メートルをナノと言いますが、非常に小さい、電子顕微鏡でしか見えない物質です。0次元と言われるフラーレン、1次元のカーボンナノチューブ、ここ数年急激に勃興してきた2次元のグラフェン。これは昨年、ノーベル物理学賞で有名になりました。それから、人類になじみ深い宝石のダイヤモンド。あるいは、工業的にいろいろな分野で使われているグラファイト（黒鉛）があります。これを見ておわかりのように、カーボンは0次元から3次元まで、たった一個の炭素という原子で全部実現しています。これは周期律表のすべての原子のなかでカーボンだけです。

私も上田先生の書かれたものはかなり読んでいます。上田先生は「偶然の発見」ということをよく言われます。上田先生自身は「セレンディピティ」という言葉は使われていませんが、ここ10年来の流行の言葉で言えば、いわゆるセレンディピティと同じことです。ある科学者が、自分の研究だけに没頭している。その途中で玉手箱があって、つまづきます。玉手箱には“Great Scientific Discovery”（大きな科学上の発見）と書かれています。これを開ければ、この科学者は大発見の主役になれるのです。御丁寧なことに鍵までついています。ただ、ほとんどの人がつまづいても気づきません。私も一、二回つまづいたことがあります。開けることはできませんでした。これがセレンディピティです。科学上の思いがけない大発見のことを言います。これから、上田先生の言葉を引用しながら、ナノカーボンにおける発見はすべてセレンディピティだったということをお話したいと思います。

「運のよい人は偉い人」というのは、1978年に、上田先生が『半導体研究所報告』で最初に

書かれたことです。「私は、自然の研究を宝探しと考えています」。いい言葉ですね。宝探しに行くわけですから、「人の歩かないところに出て行かなくてはだめです」。「独自の考えで未開の荒野を開拓し、幸運に恵まれてそれをつかんだ人を、独創的と言ってもよいと思います」。偶然に発見すると、なんだ、偶然の発見じゃないかと言われる。そんなことはないのです。当座は偶然の発見と思われても、じつは後でよく考えると、必然的にその発見に行き着いていることが多いのです。これらを総じて、上田先生は「運のよい人は偉い人」と言われたのです。上田先生は、例えば飯島澄男先生のカーボンナノチューブの発見に対しても、最高級の讃辞を送っています。

上田先生は、名古屋大学を定年になってから、名城大学教授として新技術開発事業団の超微粒子プロジェクトを指導されました。その超微粒子プロジェクトの終わりのころの1984年に、『固体物理』の別冊で超微粒子の特集号を出されました。上田先生はそこに示唆に富む巻頭言を書かれています。私は当時、岡崎にある分子科学研究所の助手でしたが、これを読んで考えさせられました。私の長年の友人でもあるクラウド・ザトラーというドイツの科学者は、今はハワイ大学の物理学教授ですが、微粒子・クラスターで大きな仕事をしました。彼は大学院の時、5年間一本も論文を出せずに苦しんだ。4年間装置開発をして、最後の一年でやっと結果が出た。それは素晴らしい結果でした。上田先生は、「彼は一つの論文も出さない5年間を頑張り抜いて、遂に成功したという。長くかかっても、困難を克服して新しい道を開く精神は見上げたものである」と言っています。この話は、上田先生の御講演で直接お聞きしたことがあります。この論文です。1980年に *Physical Review Letters* に発表されました。アンチモン・クラスターを上田流のガス中蒸発法で作ってそれを直接質量分析するという、当時としては考えられないことをやり遂げました。マイクロクラスターの分野では有名な、パイオニア的な仕事です。

これは1980年代前半のことですが、私は上田先生の言葉に感化されました。大学院生時代から装置作りが好きだったので、上田先生の研究に技官として協力された、今日もお越しになっている高橋重敏さん（当時、分子科学研究所技術課長）の手ほどきを受けて、毎日、分子研で朝から晩まで、金属工作に明け暮れていました。まず、「影武者」という装置（超音速分子線光解離・四重極質量分析検出チャンバー）を作りました。なぜ「影武者」かと言うと、当時、黒澤明の『影武者』という映画が流行していたからです。2号機は1982年に完成した“Cosmos”（レーザー多光子イオン化・パルス分子線リフレクトロン型TOF質量分析システム）です。本体のアルミニウム製高真空チャンバーはもとより、TOF質量分析計や電源も全て自作しました。なぜ“Cosmos”かと言うと、当時、カール・セーガンの《Cosmos》という科学番組があって、そこから取ってきたのです。分子研装置開発室の技官の堀米さん、岡田さん、鈴木さんたちの御協力を得て、2年かって立ち上げました。こういうオリジナルな装置を立ち上げるのは上田精神の一番大切なところで、既存の装置では勝負しない。科学者として当たり前のことですが、私はそれを上田先生から学びました。

これは上田先生と高橋重敏さんが一緒に写っている、1987年の写真です。上田先生と私が一緒に写っている写真を探したところ、1994年のものが一枚だけありました。隣にいるのが理学

部地球惑星学科の教授だった熊澤峰夫先生です。熊澤先生は非常にアグレッシブな方なので、上田先生に難しい質問をされたんですね。上田先生の「困ったなあ、熊澤君には」という雰囲気の写真です。

上田先生とナノカーボンのつながりですが、上田研では戦時中からガス中蒸発法という方法で、マイクロクラスターよりもう少し大きいサイズの、いわゆる超微粒子を世界に先駆けて作っていました。じつはこのガス中蒸発法が、1990年に起こった、ドイツのマックス・プランク研究所ハイデルベルクのクレッチマーらによるフラレンの大量合成そのものなのです。その延長線上には、飯島澄男先生のカーボンナノチューブ発見があります。これでわかるように、上田グループが戦時中からやっていたテクニックを、クレッチマー先生らが1990年に改めて使って世界で初めてフラレンを大量合成し、その翌年に飯島先生がカーボンナノチューブを発見したのです。ですから、上田グループがすべてのナノテクノロジー、あるいはナノカーボンの起源だということを御理解いただけるかと思います。

ナノカーボンは1990年に大量合成されました。しかしその5年前、1985年に、ハロルド・クロトーという、当時サセックス大学教授、今はフロリダ州立大学の教授が、宇宙における非常に長い直線状の炭素分子を電波望遠鏡で観測しました。クロトー先生の一番の疑問は、稀薄な宇宙空間でどうしてそんな直線状の炭素クラスターが発見されるのかということでした。いろんな実験を試みて、宇宙で発見されるような炭素クラスターを作ろうとしましたが、ことごとく失敗していました。それで、クロトー先生は1985年に、アメリカのライス大学のスモーリー先生のグループと一緒に、ある装置で偶然に、 C_{60} という非常に対称性の高い分子を発見されました。もともとの動機は星間に発見されるような直線状の炭素分子を実験室で作ろうということでしたが、 C_{60} はその研究途上で偶然に発見されたのです。いわゆるセレンディピティですね。

これは、フラレンを偶然に発見して、第一報を *Nature* に投稿した直後に、スモーリー先生の実験室の前の芝生で撮った記念写真です。私は、スモーリーとクロトーに聞きました。「どうして記念写真を撮ったのか?」「いや、篠原、これはもう僕らは確信した。これはノーベル賞だ。確信したので記念写真を撮った」。1985年9月11日水曜日の午前中の写真です。実際、この11年後、1996年のノーベル化学賞を、この3人が取っています。御存知のようにノーベル賞は3人枠なので、受賞者は5人のプレーヤーのうち3人だけです。実際に実験したのは大学院生ですが、栄光は教授に輝くというよくある話です。これはハロルド・クロトー先生、リチャード・スモーリー先生。サッカーボールを持ってほほ笑んでいるのはボブ・カール先生で、スモーリー先生の同僚の教授です。この2人が実際に実験した大学院生です。ジム・ヒース、今はカリフォルニア工科大学の教授です。シーン・オブライエン、今はテキサス・インスツルメンツの開発部長です。この第一報は *Nature* の表紙を飾って、今朝の引用回数が7557回です。

フラレンは実験的に確認されましたが、ほんとうに丸い、いわゆるサッカーボール状の構造しているのかわかりませんでした。ところがその5年後、ドイツのマックス・プランク研究所ハイデルベルクのグループが、偶然に、これもセレンディピティで、非常に簡単な方

法でフラーレンを大量合成できることを発見しました。じつはこのマックス・プランク研究所のグループは宇宙物理学者でした。宇宙物理の研究者には有名ですが、220 ナノメートルに非常に強い正体不明の吸収が 1960 年代後半から宇宙空間で観測されていました。いろいろな起源物質が言われていました。シリコン系の微粒子、あるいはグラファイトの微粒子。マックス・プランク研究所のグループはクレッチマー先生がリーダーで、いろいろな炭素微粒子を実験室で作って、吸収スペクトルを取って、これと合わないかという実験を繰り返していました。

その実験方法は、まさに上田流のガス中蒸発法です。ヘリウムガスのなかに 2 本のグラファイト棒を接して電流を流すと、接触抵抗によってグラファイトが蒸発して、いろんなタイプの炭素の微粒子ができます。その微粒子を集めて吸収スペクトルを取って宇宙の吸収スペクトルと比べるという実験を、10 年近く繰り返していました。こんな簡単な装置です。今でもマックス・プランク研究所ハイデルベルクの物置にあります。これはその結果の吸収スペクトルです。横軸は波長、縦軸は吸収です。宇宙空間において実際に 220 ナノメートルで観測される吸収はこれです。例えば、ガス中蒸発法で 40 トール (Torr) のヘリウムだとかこういう吸収です。ピークはそこそこ合いますが、幅がずいぶん違う。ところが 1989 年夏、短期に訪れていた大学院生が、偶然にも実験条件を変えてしまいました。通常は 40 トールでやりますが、100 トールにすると、ここに赤く示したような新しいピークが出はじめます。これは何だということで研究していくと、じつは C₆₀ の吸収でした。

この話を 1990 年 9 月、ドイツのコンスタンツで、クレッチマー先生が飛び入り講演されました。じつはこの会には、齋藤弥八先生や田中信夫先生や私も出席していました。クレッチマーさんはこの会議で初めて、C₆₀ の大量合成法を発表されました。クレッチマーさんはこの会議に前後して、*Nature* の表紙を飾る論文を書かれました。今朝の引用回数は 5259 回です。コンスタンツはスイスとの国境に近い、非常にきれいな湖畔の町です。私はこのホテルに泊まりました。後で気づきましたが、ヴィラ・アムゼーという非常に有名なホテルでした。このホテルに、クロトー先生と一緒にノーベル賞を取られたスモーリー先生も御夫妻で泊っていました。

フラーレンの発見から 20 年経っていますから、今では年間このくらい作れます。フラーレンはいろいろなものに入っています。面白いことに、最初にフラーレンが応用されたのはスポーツ用品です。ゴルフのシャフトや、テニスやバドミントンのラケットなどに応用され、エンジンオイルや、最近では化粧品にずいぶん応用されています。

私は齋藤弥八先生と、フラーレンのブレイクスルーから一緒に研究を始めました。何か新しいことをしたいということで、われわれが注目したのはフラーレンのなかに金属を入れる研究です。金属内包フラーレンと呼ばれる物質を作って、その構造解析、物性の研究をずいぶん行ないました。これが MRI の造影剤によいということが、10 年ほど前にわかりました。御存知のように、MRI は X 線造影に比べて体に優しい。最近では、臓器特異的、あるいは癌特異的な MRI ができるようになりました。MRI に入る前に、静脈から 2 cc くらい造影剤を打ちます。その造影剤の開発競争が今、世界中で活発に行なわれています。金属内包フラーレンは造影剤として非常に良いので、アメリカや中国ではいくつかのベンチャー企業が立ち上がっています。

話をナノカーボンの基礎に戻します。今までの話は C_{60} の話ですが、フラーレンにはもっと大きなサイズ、 C_{70} 、 C_{90} 、 C_{100} もあります。実際に実験室で作れるのは C_{100} くらいまでです。では、もっと大きな、1000 とか 1 万のフラーレンはないのか。カーボンナノチューブは、長細いチューブ状にすればいくらでも大きくできます。なぜかと言うと、カーボンナノチューブは一枚のグラファイトシート（グラフェン）をシームレスに丸めるだけですから、大面積のグラフェンを使えば長いカーボンナノチューブを作ることができます。

カーボンナノチューブは、皆さん御存知のように飯島澄男先生の発見です。飯島先生が発見されたのも、じつはセレンディピティです。私はずいぶん前から、飯島先生の発見はセレンディピティだと言っていました。ある時、飯島先生が「篠原さん、僕の発見をセレンディピティと言わないで」とおっしゃいました。ところが最近、飯島先生御自身の講演でもセレンディピティだとおっしゃっています。どんなセレンディピティかと言うと、フラーレンを作る時に、さきほど紹介したガス中蒸発法ですが、プラス極とマイナス極のグラファイトを放電すると、大体ここが 4000 度になる。グラファイトは 3800 度が昇華温度なので、瞬時にしてグラファイトが昇華します。それがヘリウム中でコンデンスしてフラーレンができます。飯島先生は、できたフラーレンではなく、実験が終わった後のスラグに注目されました。負極の先端に、私や齋藤さんがスラグ（どうでもよいもの）と呼んでいたものがあります。そのスラグの中心部に、カーボンナノチューブを偶然に発見されたのです。もう少し詳しく言うと、当時、齋藤先生も私も三重大学工学部の助教授でした。齋藤先生の学生さんが、名城大学の安藤義則先生のもとに通っていました。安藤先生も上田門下のお一人です。フラーレンをなるべくたくさん作りたくて、安藤先生の大きな放電装置を使いに通っていたのです。放電した後、齋藤先生の学生さんはフラーレンのすすを持ち帰りましたが、安藤研にはその後のスラグが一杯たまっていました。1991 年の 4 月の初めだったと思いますが、飯島先生が別件で安藤先生を訪問された時に、飯島先生はそのスラグを見て、これは何かあると直観されました。NEC の基礎研究所に数本持ち帰って調べ、その中心部にカーボンナノチューブを発見されたのです。

第一報は *Nature* に発表されましたが、面白いことにカーボンナノチューブという言葉を使っていません。ヘリカルマイクロチューブルズという、ちょっと舌をかみそうな名前で、さすがに飯島先生もあまりお気に召さなかったようです。第二報からは、NEC 基礎研究所の所長だった覧具さんと相談されて、今われわれが使っているカーボンナノチューブという名前にされました。今朝の引用回数が 12234 回です。

ナノチューブはいろいろなものに応用されています。北京の清華大学の范守善先生と台湾の Foxconn の合弁会社が、カーボンナノチューブの透明導電性フィルムをスマートフォンに組み入れました。あるいは最近、カーボンナノチューブで次世代のトランジスタ電子回路を作ろうという研究も、非常に盛んに行なわれています。カーボンナノチューブとフラーレンは私の研究室の主なテーマですが、こういう面白いものを作れます。ナノチューブの空間のなかにフラーレンがどんどん入っていくということで、ピーポット（さやえんどう）と私たちは呼んでいます。金属内包フラーレンも、カーボンナノチューブのなかに入れることができます。面白い

電子顕微鏡像があるので、一つだけお見せします。これは産業技術総合研究所の末永和知さんとの共同研究です。カーボンナノチューブのなかに金属の入ったフラーレンがあります。この丸いドットが金属原子、この場合はテルビウム原子です。電子線があたっているので、ナノチューブもフラーレンもだんだん綻びていきます。フラーレンのこのあたりに綻びができて、そこから原子が飛び出す瞬間をとらえたビデオです。この原子が飛び出します。飛び出しましたね。こういう面白い現象もピーポットで観測しました。

芥川龍之介に『蜘蛛の糸』という小説があります。大正7年に一気に書き上げた、800字ぐらいの短編です。主人公はカンダタ。カンダタがよいことをしたので、お釈迦様がカンダタだけに蜘蛛の糸を垂らして天国へ行かせようとしたら、下からどんどん悪人が登ってくるので、カンダタが「お前ら登ってくるな」と言った瞬間にプツンと糸が切れて、カンダタは地獄に落ちてしまうという話です。これがカーボンナノチューブの糸なら切れません。カーボンナノチューブはフラーレンと同じで直径1ナノメートルですが、幸いなことに燃えることができます。どんどん燃って太くできる。これは産総研の斎藤・湯村・飯島グループの5年くらい前の結果です。今は1センチくらいまで太くできます。現に中国の范守善先生のグループは、1センチの太さで数百メートルのカーボンナノチューブを作っています。そうすると、これを3万5000キロまで伸ばすことができれば、宇宙エレベーターを作ることができます。静止衛星まで3万5000キロですから、普通のワイヤーを使うと自重で切れてしまう。NASAのシミュレーションによると、唯一カーボンナノチューブだけは軽いので切れない。静止衛星は3万5000キロ上空を飛んでいますので、いま500メートルのナノチューブを3万5000キロにするにはしばらくかかると思いますが、こういう夢のある話があってもよいと思います。

昨年、惑星状星雲に多量のフラーレンが発見されました。C₆₀とC₇₀です。Spitzer Space Telescopeという赤外線衛星で、TC-1という惑星状星雲を調べたら、C₆₀とC₇₀が非常に高い、ほとんど実験室のS/N比で観測されました。ということは、宇宙に行けば多量のフラーレンがあるということです。

ところで、上田先生はテニスのプレーヤーとして有名でした。私も二度ほどテニスを御一緒させていただいたことがあります。上田先生はプロテニスプレーヤーの佐藤直子選手と対談されています。「何が得意かな。粘ることですね」。上田先生らしいですね。僕も実感がありますが、上田先生のロブはいやでしたね。でも、上田先生はロブをあげているつもりはないんです。「バシッと打ったつもりでも、ごらんになる方は「あ、上田さんのロブ」と言われる」。確かに、バックラインの15センチにみんな入るんです。

上田先生の教え子の一人に、理学部の技術部の増田さんがおられます。高橋重敏さんの直接のお弟子さんです。鈴木さん、余語さん、野田さんも皆さんテニスプレーヤーで、私も40年近くテニスプレーヤーです。先日、増田さんの退職記念にテニスをしてきましたが、私が持っているラケットに注目して下さい。これ、じつはフラーレン入りです。高反発のヨネックス製のNANOSPEED-RQ7です。

御清聴いただきまして、どうもありがとうございました。