



中国雲南省師宗県雄壁炭坑付近の夾炭層最上部から採取した岩石のTEM写真

この岩石は黄鉄鋼(50%)および炭素(9%)を含む。左端の多層炭素ナノチューブは20層で、内部空隙がほとんどなく、長さが約200nm(見えているのは一部)。右手にはこれも大きな炭素ナノ粒子、曲がったナノチューブ、ナノオニオンらしき粒子などが重なり合っている。いずれも空隙が非常に少なく、長い時間をかけてゆっくと成長したことを窺わせる。

## 話題の研究現場を訪ねて

「スズはフラーレンである」。本誌昨年12月号にもご執筆いただいた豊橋技術科学大学の太澤映二教授は、天然のフラーレンを求めて先頃中国雲南省の炭坑を調査された。詳しい解析はこれからだが、天然のフラーレンやナノチューブが発見され、新たな展開を見せるフラーレン科学。同行された小澤理樹助手にもご同席いただいて、現地調査の興味深いみやげ話をお伺いした。

豊橋技術科学大学

大澤 映二教授に聞く

# 中国の炭坑に天然のフラーレンを追う

30周年を迎え、新たな展開を見せるフラーレン科学

## 雲南省との共同プロジェクト

—今回先生が行かれた雲南省というのは、だいたいどのあたりにあるんですか。

大澤 中国の一番南にあって、チベット、ラオス、ベトナム、ミャンマーに国境を接しているところです。ヒマラヤ山脈の東の端にあたります。

—ということはかなり標高が高いところなんですか。

大澤 緯度からいったら熱帯にかかるところですが、標高は2000mぐらいありますから、冬は温かいし夏は涼しい。雲南省なんていうと田舎だと思うでしょう。ところが省都の昆明は高層ビルが林立してしまっていてね、きれいな街ですよ。

—日本からは何人の研究者の方が参加されたのですか。

大澤 日本人は田中一義先生(京大)、千々和一豊先生(山口大)、保柳康一先生(信州大)、ここの助手の小澤理樹君と私の5人です。

—中国から参加された方がたは科学者なんですか。

大澤 いや、今回は丸紅にアレンジしてもらったんですよ。

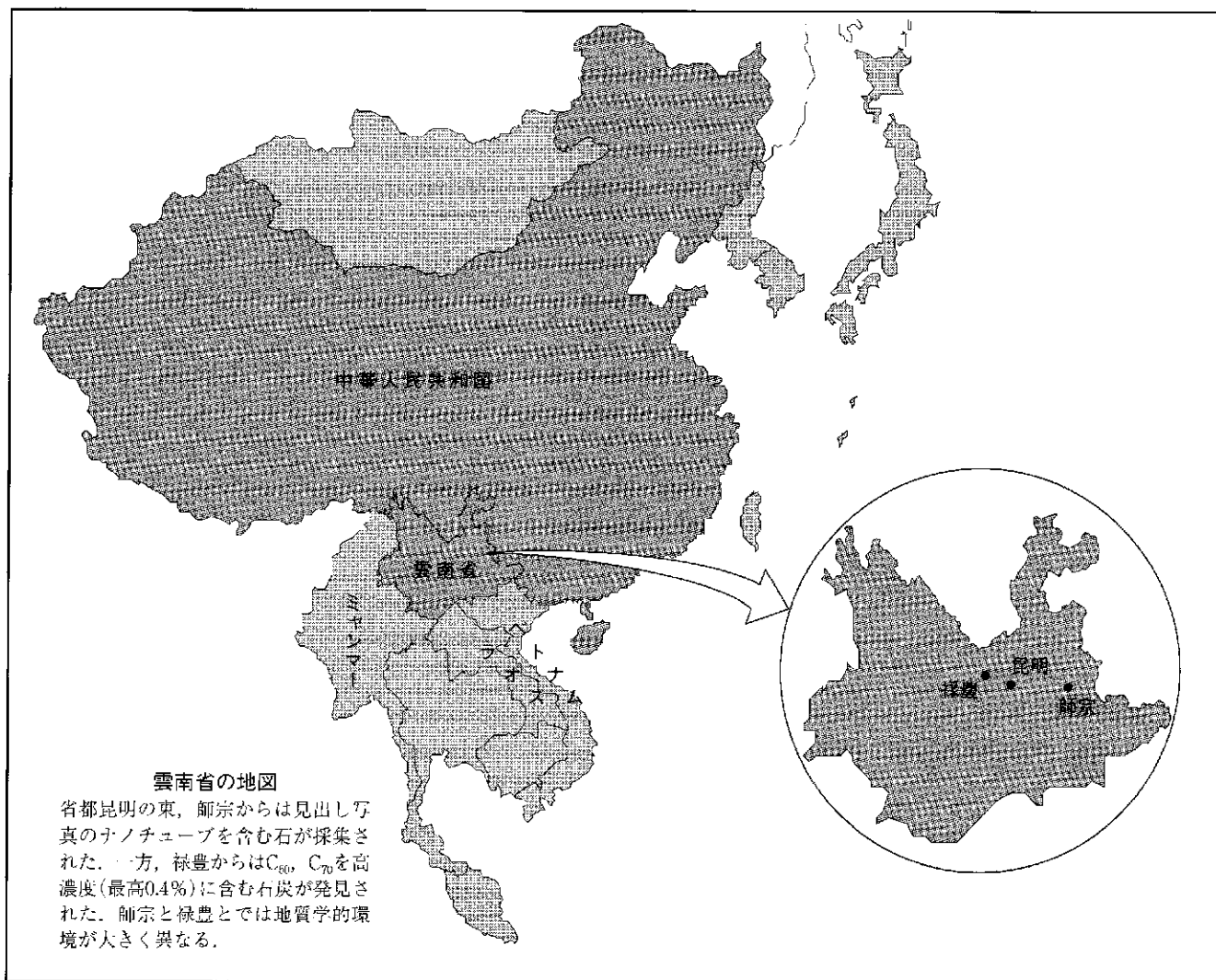
雲南省には丸紅の支店があって、石炭のビジネスをされているんですが、そこの所長の李さんという方が日本人と中国人のハーフで日本語がペラペラなんです。最初は雲南大学との共同研究を計画していて協定まで結んだのですが、うまくいかず、結局この方に何か月も前から役所に行って全部アレンジしてもらって、雲南省の石炭局のプロジェクトとして行ったものです。彼が非常に親目的な方だったおかげで、でかける前に日程は全部できていました。ただ雲南省がすごく期待してしまっていて…(笑)。

## 田舎道を揺られて

—今回調査された炭坑は、かなり奥地にあるんですか。

大澤 現地は昆明から非常に近いところで、あまり奥地というわけじゃありません。まず禄豊ルクフンのすぐそばに、「一平浪」という面白い名前の炭坑があるんですが、ここはフラーレンをたくさん含んだ石炭が、一番初めに見つかったところです。東は師宗シソウというあたりまでですね(地図参照)。

—雲南省にはたくさん炭坑があるんでしょうか。



大澤 1997年の統計によると、雲南省の産炭量は中国で13番目です。一番産炭量が多いのは山西省で、年間3億3000万トンというオーダーですが、雲南省は3300万トンですからそんなに多くはない。ただ隣の貴州省から雲南省にかけての帯は、非常に良質の無煙炭を産出するんです。ところが鉄道が整備されていなかったんで、今まで手つかず、未開の地だったわけです。

— 無煙炭といいますと、かなり古い炭層ですか。

大澤 無煙炭というのは炭化度が一番進んでいる石炭です。製鉄に使うコークスの原料ですから、工業的には一番価値の高いものです。

— 何か露天掘りの大規模な炭出を想像してしまいましたが、むこうの炭坑というのはどんなところなんですか？

大澤 今回訪ねた炭坑はどれも小さいところなんです。なかには個人所有のものもあるんです。小さなトラックが走っていて、事務所はバラック小屋で…。あちこちに点在する炭

坑を巡って、細い田舎道をトヨタのバン2台に分乗して行くわけですが、現地の運転手は、こんなにガソリンを使ったのは初めてだといっていましたよ(笑)。

— 実際に炭坑のなかにも入られたんですか。

大澤 雲南省の炭坑では、はじめから全部拒否されました。安全上の問題があるから坑内に入ってはいけないとかいうんですけど…。

小澤 でてくる坑夫の人たちを見ると入る気がなくなりますけれどね(笑)、真っ黒になってて。

大澤 確かにあまりいい労働条件とは思わなかったね。

### まだフラーレン未開の地

— さて、中国は世界一の産炭国ですが、今回共同のプロジェクトをするということは、フラーレンを資源としても注目しているのでしょうか。

大澤 いや、それは彼らはあまり理解していないと思いま

す。共同プロジェクトになったのも、李さんがうまいこと  
 してくれたおかげです。

小澤 むこうの石炭局は近々民営化されるらしいんですね。  
 今回のプロジェクトに注目した理由もそこにあるみたいなん  
 です。でも、結局はフラーレン自体に興味があるわけではな  
 くて、自分たちの炭坑がこれから生き延びていくのに、何か  
 儲かるネタになるんじゃないかという思惑があったようで  
 …。

—現場の人たちは、フラーレンというものをどの程度理解  
 されているんですか？

大澤 要するに彼らは石炭の山で働いているだけなんです  
 ね。一応、大学や専門学校で石炭のことは習ってきてはいる  
 のですが、サイエンティストじゃないから興味がありません。  
 だからフラーレンの話なんかはまったくわからない。こ  
 ちらもはじめは共同研究というかたちで一緒に論文を書こう  
 かとも思ったんですが、英語の雑誌なんかもまったく入って  
 きていないような状況ですから、そんなことはとても望めそ  
 うにない。そういう意味で欧米の大学との共同研究とは全然  
 質が違うんですね。逆にいえば、それだけ未踏の地というこ  
 とです。

—ご苦労も多かったでしょうね。

大澤 やはり調査に行くとなるとお金もかかる話でしょう。  
 車と運転手を雇って、現地の人たちに案内してもらわね  
 ば、お金がいくらあっても足りないのかもわからない。そ  
 ういう情報を集めるのに非常に時間がかかりました。だから  
 去年はもうこれで明けて、これで暮れたようなもんです。

—体制の違いというのは大きいのですか？

大澤 なんととっても中国は共産主義の国ですから、外国  
 人、とくに大学の人間に対しては非常に警戒しますよね。

小澤 全部いったん上にお伺いを立てるシステムになってい  
 ますから、直接話をするのができないんです。

大澤 最初は現地の大学出の若い技師に、一緒に論文を書こう  
 といって誘ったのですが、みんな拒否されました。仕事上  
 の交流であっても、上を通さないことには何もできないん  
 ですね。それに加えて英語が通じませんから、直接のコミュニ  
 ケーションがほとんどとれない。だから中国の石炭をもっと  
 徹底的に調べようとしたら、私も中国語を本格的に勉強しな  
 ければいけないなと思っています(笑)。

### 天然のナノチューブが見つかった！

—さて、そんな苦労をされてまででかけられたのは、それ

なりの理由があつてのことと思いますが、なぜ雲南の炭坑を  
 選ばれたのか、そのきっかけについてお聞かせください。

大澤 実は、われわれが雲南省の石炭を手に入れた背景に  
 は、方先生という中国人の科学者がかかわっているんです。  
 雲南省というのはたくさんの少数民族が住んでいますが、そ  
 の少数民族出身の方で、若いときにアメリカへ留学されてい  
 る物理学者です。雲南大学の講師などもされていて、いろん  
 な人とつきあいがあって尊敬されている先生なんですよ。

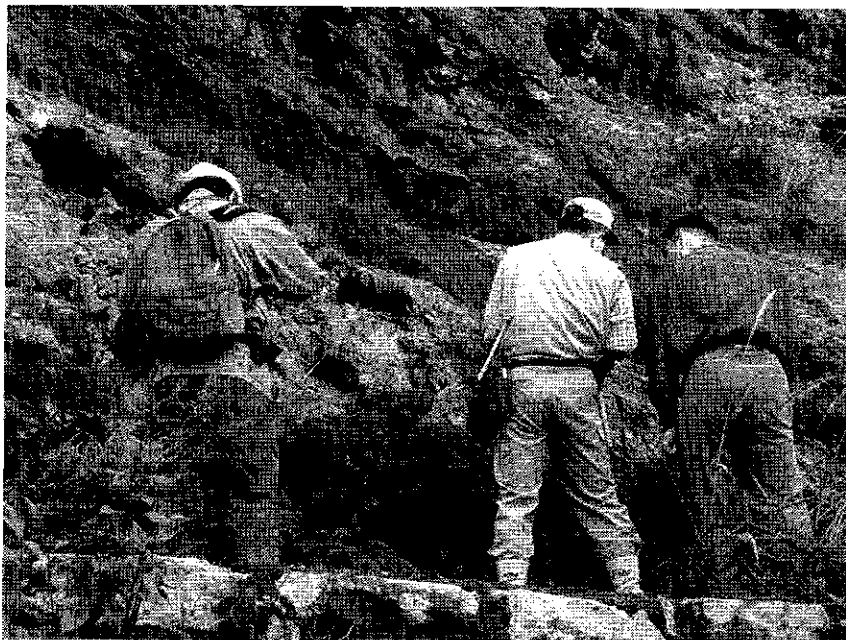
この方が雲南省の石炭からフラーレンがでないかというこ  
 とを考えていたんですね。それでサンプルを送ってきてくれ  
 た。それがそもそもの発端です。もう1か所、シルクロード  
 の通っている甘肅省というところからナノチューブを含んだ  
 ものがでてきたらしいという話もあって、面白そうだから  
 行ってみようと思っていたのですが、あとでちょっと怪しい  
 ということがわかったのと、何より許可がおりなかった。そ  
 こで今回は雲南1か所に絞ったわけです。

—先生ご自身、石炭にフラーレンが含まれているとお考え  
 だったのですか？

大澤 正直いって、私は石炭のなかにフラーレンなんかある  
 わけないと思っていたもんですから、調べなかったんです  
 よ。彼らは1%ぐらい入っているといっていたんですが、ま  
 さかそんなにあるわけではない。でも、まあちょっとやってみ  
 るかという軽い気持ちで始めたんです。ところが調べてみる  
 と数十ppm含まれていた。これはわれわれの常識からいう



—平浪炭坑事務所にて現地のスタッフと  
 右から3人目が李氏、その左から中央の人民服の人を除く5人が日  
 本側調査行メンバー。



試料の採集風景

師宗炭坑の事務所裏手の露頭にて、石炭、砂岩、玄武岩が見事な層をなしていた。

と、2桁ほど多いんです。それでびっくりして、方先生をそのかして(笑)、雲南省の各地から石炭のサンプルを集めてもらった。

そんなわけで、はじめは一平浪の炭坑で見つかったC<sub>60</sub>のほうに興味があったんです。ところが驚いたことに、師宗の近くで採集されたある試料のなかから、実にきれいなナノチューブがでてきたんです。

—これまで天然のナノチューブというのは見つかっていなかったんですか。

大澤 これが初めてです。方先生がこのあたりをやみくもに歩いて見つけた真っ黒な石だったんですが…。

—石炭じゃなくて、石なんですか？

大澤 石炭層の一番下の砂岩層に含まれている石なんです。分析すると炭素は9%しかない、ところがその炭素にすごくきれいなナノチューブが含まれていた(見出し写真)。フラーレンの研究者に見せたら本当にびっくりするぐらい真つすぐで、長くて…。おそらく数万年とか数百万年という時間スケールで成長したんじゃないかなと思うんですが…。

—なぜ雲南の炭層にナノチューブが含まれているのでしょうか。この地域に特有の地質学的な特徴でも。

大澤 雲南省はカンブリア紀の非常に古い地層があることで有名なところらしいんです。いろんな地層が入り組んでいて、しかもヒマラヤ造山紀にすごい隆起とか褶曲とかがあったらしく、非常に複雑な地形をしています。また師宗のあたりの地層の最大の特徴として、地下に火山活動の跡があるんです。つまり玄武岩の非常に厚い層があって、その上に石炭層がある。玄武岩というのは火山岩ですから、かつてマグマ

が上がってきて、石炭層の下で横に広がって固まったわけです。その地域がこのへん全体なんですよ。ものすごく広い。

だからとくに玄武岩と接しているあたりは、かなり高温になっていたと思われるんです。そのために石炭層が加熱されて炭化が速まり、非常に良質の無煙炭ができた。一方、われわれフラーレンの立場からすると、石炭層というのは鉄が多いですから、鉄がナノチューブ生成の触媒になるのではないかと考えているんです。地下から高圧、高温の熱水が上がってくるときに、鉄のイオンをはじめとして、触媒になるようないろいろな遷移金属のイオンをもち上げてくる。鉄があって、温度もかなり高かったのでナノチューブが成長したのではないかと…。

—ナノチューブができる条件がそろっていたわけですね？

大澤 ただわれわれは地質学に関しては素人ですから、一緒に行った地質学者の方から、いつも自分に都合のいい解釈ばかりするとたしなめられる(笑)。もっと慎重にやらなきゃいかんといわれるんです。

でも、これだけ見つかったということは、やっぱり昔から自然界にできていたんでしょうね。これまでに自然界で発見されたフラーレンは、アリゾナ大学のBuseckが見つけたKT層からのものにして、名古屋大学の篠原(久典)先生が見つけたベルム層にして、全部燃焼してできたものなんですね。炭素が不完全燃焼を起こして燃えたときのススなんです。だけどナノチューブは明らかにススではない。要するに石炭ができてから、中で何かが起こって、炭素が変成してナノチューブになったものです。

小澤 たとえば師宗と一平浪とでは全然地層が違うらしいん

ですね、ですからフラーレンとナノチューブは、でき方がまったく違うみたいなんです。

## いい加減な？ 仮説を検証

— 今回は、どれぐらいの試料をもち帰られたんですか。

小澤 70点ぐらい。段ボール箱に2箱ぐらいですね。

大澤 試料をもちだすのもなかなか苦勞するので、量はそんなに多くないんですよ。石炭は中国の国家資源ですから、没収されたという話もあるぐらいで、本当にもちだせるかどうかは最後までわからなかった。結局はわれわれは自分たちではもちださず、丸紅から混載で別送してもらったんです。

— もち帰られた試料の分析は、もうすでに始めておられるのでしょうか。

大澤 これから化学者と地質学者、石炭学者と共同で、われわれが考えたいい加減な仮説(笑)を検証するために試験をやるわけです。

— 先ほどの成因はまだ実証されたわけではない？

大澤 化学者なんてホラ吹きだからね(笑)。ホラ吹き屋と、ホラを全然吹かない人間と一緒にやっていたら、適当なところで落ち着くんじゃないかなと思っています。

とくに下々利先生は光学顕微鏡で表面を詳しく調べられる。地質学の専門家が見ると、試料の温度履歴とか、含まれているいろいろな鉱物が全部その場でわかってしまうらしいんですね。もうすでにサンプルをずいぶん調べたようですが、そのなかから水熱反応の跡を見つけたという報告を受けています。今のところこちらの予想ははずれていない。

あとはもち帰った試料のなかから、ナノチューブやナノ粒子を確認したいですね。電子顕微鏡でナノ粒子を探したりとか、有機溶媒で $C_{60}$ とか $C_{70}$ を抽出したりとか…。

小澤 今回はたとえば石炭層の真ん中と上下の境界、その下の泥岩層、玄武岩層というふうにプロファイルをとって、何が起こったのかというシナリオをきちんとつくっていいこうと思っています。

— フラーレン研究も化学、物理学から、地質学へとさまざまな分野に広がりつつあるわけですね。今回、地質学の先生方とご一緒されたわけですが、やはり分野が異なると研究へのアプローチの仕方に違いがありますか？

大澤 そうですね。地質学の先生方を見ていると几帳面ですね。われわれなんかサンプル一つ一つを表にしたりなんてあまりしないんですが、情報をきちんと表に書き入れて送ってくれますしね。

だいたい調査のときのスタイルがちゃんと決まっているんです。ハンマーとか何とか七つ道具を全部身につけている。たとえば、カンブリア紀の地層があるというので山の奥深くに入っていたときのことで、確かに何か古そうな地層で、見てみると大理石らしいかけらが落ちこちている。これは大理石じゃやないかと思ったら、早速七つ道具をリュックサックからだしてきて、石に何かチャッチャッとかけている。何かと思ったら塩酸ですよ。やっぱりやるのが違うなと感心しました(笑)。それをフィールドで立ったままでやるわけですからね。

## 現地に行かないとわからない

— いってみれば、現地から試料を送ってもらって研究することもできると思うんですが、実際に行かれてみていかがでしたか。

大澤 もう行きたくてしょうがなかった。行かないとわからないんですよ。方先生だけが悪いんじゃないんですが、向こうの人はやるのが雑なんですよ(笑)。第一、メモを取らないんですね。だからとにかく自分で行かないと話にならないと前から思っていたんです。

— メモを取らないとはどういうことなんですか。

大澤 ナノチューブが見つかったとき、当然われわれはものすごくびっくりしたんですが、その石をどこで採ったんだと聞いても、まるで答えられない。今度から何か採取したら、必ず場所と日付をきちんと記録してくれといったら、そのうちに向こうが腹を立ててしまってね、えらいご機嫌が悪いんですよ(笑)。そんなことをやっている暇はないのかいってね。一平浪炭坑の技師長なんかも、すごく几帳面で真面目そうな人なんですが、サンプルを採った場所は記録していないんですね。どうも自分では坑内に入らなくて、坑夫が採ってきたなかから拾うらしいんです。

— フィールドワークの基本ができていない？

大澤 だから今回は、自動車のナビゲーターに使うGPS(全地球測位システム)をもって行って、小数以下第4位まで経度や緯度を全部だして、場所をきちんと押さえながら回ったんです。われわれとしては、たとえば炭坑のなかで採るにしても、炭坑の詳しい地図があれば坑口から何メートル入ったところで採れたのか記録して、坑内の三次元的なマップをつくれます。どこでどれだけフラーレンがでたということを調べられるわけなんです。それができない。

小澤 写真がほしいという希望もだしていたんですが、なか

おおざつ えいじ

## 大澤 映二先生のプロフィール

豊橋技術科学大学教授(工学部知識情報工学系)。1935年6月9日生まれ、群馬県出身。大阪府立豊中高校卒業後、京都大学工学部工業化学科へ、1958年同学卒業。1960年同学大学院工学研究科修士課程修了。同年帝人(株)入社。1964年京都大学工学部合成化学科助手。1970年北海道大学理学部化学第二学科助教授を経て、1990年より現職

現在のおもな研究テーマ フラーレン科学、とくに天然フラーレンとその生成機構およびフラーレンの工業的応用

最近考えること 日本の国立大学に限れば、入学試験制度の消滅、独立行政法人化などに伴って、大学の環境はよくなっている。一方、教師から見ると社会情勢がベンチャービジネス奨励に向かっているので、この波に乗りたい



目標 一般則の発見

信条 自由な発想

最近、面白く読んだ一冊 R. L. Sime, "Lise Meitner"

趣味 仕事(これではいけませんね)

ごひいきの球団 中日ドラゴンズ(場所柄)

なか手に入らなくて、炭坑の規模とかも現地に行くまで全然わからなかったんです。

大澤 石炭層の地図なんかも、やっぱりすぐにはくれない。上を通してこれっていわれるわけですよ。あんまり神経を逆なでしてもいけないですし…。

### 天然のフラーレンを求める旅は続く

—さて、天然のフラーレン探し、次のご予定はもう決まっていますのですか？

大澤 今年はまだ一回中国に行こうかどうか迷っています。実はもう1か所石炭の専門家が奨める場所があるんです。南アフリカのキンバレー、ダイヤモンド鉱山のあるところです。その鉱山の周りから無煙炭がでるんですが、下がやっぱり玄武岩なんですね。だからダイヤモンドの成因と何か関係があるかもしれない。本当にわれわれの考えている仮説が正しければ、キンバレーにもフラーレンがあるんじゃないかと…。

—確かにダイヤモンドとフラーレンというのは同じ炭素ですから、ダイヤモンドの成因と何かつながりがあったら不思議じゃないですね。

小澤 ダイヤモンドの場合は石炭層にあるんじゃないで、母岩、石の中にあるわけです。つまりダイヤモンドは石の中に染みでてきた炭素ですけども、そこにも何か触媒がかかっていると思うんです。それを調べてみたいと思っています。

ますけれども、

—地質学的に同じような条件であれば、そこにはフラーレンやナノチューブがあると思っでよろしいんでしょうか。

小澤 そういう予想を立ててはいますけれど、こういう条件というのはほとんどないらしいですね。

### ナノチューブの量産に役立てば

—いろいろこれから成果がでてくるかと思いますが、研究の見通しはいかがですか。

大澤 そうですね。さしあたっては中国向けのレポートを早く書きあげたい。まずは成果があったことを認めてもらいたいですね。ただあまり彼らに期待をもたれても困るんですが(笑)。

—むこうは資源として有望かどうかというようなことを考えておられるわけですね。

大澤 ええ、すぐにでもお金にしたいという発想ですね。こっちは顕微鏡で1日かけて探して、やっと見つかるというようなものですから、これがすぐにお金になるわけではないし、そんなにうまい話じゃない。性急な話にはついていけないですね。

—応用に結びつく可能性についてはいかがですか？

大澤 石炭からナノチューブを採取することはちょっとできないと思いますが、なぜできたかという話は非常に面白い。その機構が本当にわかれば、地上で再現できますから、工業



大澤教授と小澤助手  
手にしているのは今回もち帰った試料。

的に使えるかもしれないという期待はあります。オートクレーブとか触媒の条件を工夫すれば、今のアーク放電よりもちょっと穏やかな条件でナノチューブが量産できるんじゃないかなと期待しているんです。

—ただ現在は応用については二の次なんですか。

大澤 もちろんわれわれも工学部ですから、最終的には何かの役に立ちたいですが、そのためにはやはりこれをじっくりと調べる必要があります。その研究にどのぐらい時間がかかるか、さっぱり見当がつかないんですが…。

小澤 それでうまくいっても、彼らには何のメリットもない(笑)。

大澤 日本で特許を取ってしまうわけですからね、それこそ一緒に研究をやってくれるんだったら、共同発明にしてもいいんだけど、何もしてくれないんだたらそういうわけにもいかないし…。

## フラーレン30周年、新たな展開へ

—さて今年は先生が $C_{60}$ の構造をお考えになってから30年、実際にフラーレンが見つかったから15年ですね、先生にとりましては非常に思い入れが深い化合物の一つだと思うのですが、何かまた一つ新しい展望、新しいサイエンスが拓けそうですね。

大澤 この研究の成果がうまく実るといいと思っています。ただ私も今、仮説を考えているんですが、それにあまりこだわらなければいいですね。地質学的に見てあまり乱暴な仮説ではなく、着実に推理と実証を積み重ねて、やっぱり誰が見ても間違いのない、もっともだという説をだしたいですね。

今年が私が初めて $C_{60}$ を考えてから30周年ということで、ハワイの学会で記念の会をすることになっているんです。そのころまでに何か結果がでていと面白いんですがね。

—そうですね、ぜひとも期待したいところです。

大澤 今回、中国に行けたのは文部省がサポートしてくれたおかげです。このごろは話が大きくなって、研究費も一件あたり数千円という高額をいただく話をよく聞きますが、今回の派遣費はごくわずかだったんですね。これが余ってしまったんです。

日本から5人行ったでしょう。向こうは丸紅側から常時2人、雲南省側から2人来ているんですね、だからこれだけで9人です。この費用を、食事からホテルから何から全部こちらがもったわけです。それを全部払ってお釣りがきた。こんなに科研費を有効に使ったの生まれて初めてだなと…(笑)。

—そういう意味でも意義深い調査研究だったわけですね。

大澤 ええ、そう思いますね。だから文部省には丁寧な報告書をつくらうと思います。それと、われわれに力を与えてくれた方先生に対しては、やっぱり何かお返ししたい気がするんです。

方先生は、偶然、私の名前をどこかで見てくれていたわけです。フラーレンはアジア人が一番初めに考えたんだということを知って、それで手紙をよこしてくれた。それに丁寧に返事を書いていたら、実はこういうサンプルがあると、もっているサンプルをみんな送ってきてくれたんです。本当に偶然の出会いだったんですが、有難いことだと思っています。

—いい出会いだったわけですね。本日は興味深いお話をどうも有難うございました。