

ゴムの強さの謎の解明に 王手をかける

自動車のタイヤを始め、さまざまなシーンで使われているゴム。
だが、そのゴムの強さの謎は21世紀に至る研究でも解明できていなかった。
池田裕子さんはその解明に挑戦し、今まさに王手をかけようとしている。
はたしてゴム科学にパラダイムシフトは起きるのか……。

京都工芸繊維大学
分子化学系教授

池田裕子

いけだ・ゆうこ 1956年生まれ。1986年、京都工芸繊維大学大学院工学研究科修士課程修了。1988年、名古屋大学大学院農学研究科博士課程中途退学。同年、京都工芸繊維大学助手に。19年間、助手を務めた後、助教授、2015年4月より現職。工学博士。2014年第29回オーエンスレーガー賞受賞。助手時代は学生から「鬼軍曹」と呼ばれたが、今は「学生のお陰で研究ができていて、毎日、手を合わせている」と話す。両親の介護をしながらの研究生活で「仕事と介護の両立のしんどさが身に染みる」とこぼすが、周囲は「あのエネルギーはどこから来るのか」と驚嘆している。

「第27回松籟科学技術振興財団研究助成 受賞」

物性と構造の相関を研究

——ゴムというのはずいぶん昔から利用されてきたそうですね。

紀元前1500年頃から中南米で使われていました。メソアメリカ（現在のメキシコ）のオルメカ文明で、祭事や政治にかかわる道具として利用されたようです。オルメカはゴムを使う人の意味です。

——工業的に利用されるようになったのはいつ頃からですか。

18世紀には消しゴムやゴム引き布が製造されましたが、大きく進歩したのは178年前にグッドイヤーが加硫を発明してからです。ゴムに硫黄と鉛白を混ぜて加熱（加硫）するとゴムの弾性が広い温度範囲で安定して、ゴムの本格的な利用が可能になりました。そしてオーエンスレー

ガーがある種の有機薬品を加えるとその効果がさらに促進されることを見出し、加硫技術が工業的に使われるようになっていきました。その後、カーボンブラックを補強剤として充てんする技術も開発され、ゴムはさまざまな用途に使われるようになりました。

——先生はなぜ、ゴムの研究をされるようになったのですか。

1969年に山下晋三先生が京都大学から京都工芸繊維大学に移ってこられ、ゴムの研究室を開かれました。私は新しいウレタンゴムを化学合成し、人工血管や人工皮膚などの医用ゴム材料をつくる研究をしたくて山下研究室の14期生になりました。この研究ではかなりいいデータが出ていたのですが、医学部のない京都工芸繊維大学ではなかなか生体を扱う研究ができず、限界を感じていました。

ただ、この研究で機能性ゴム材料における「機能」と「モルフォロジー」の相関が極めて重要であることを学び、私の研究も生体適合性に留まらない、ゴム物性と構造の相関に関する研究に広がっていったのです。

21世紀を迎えても
分からないことが

——ゴムの物性ということですが、ゴ



天然ゴム

ムの研究にはもう長い歴史があるのですから、だいたいのことは解明されていたのではないのですか。

それが違うんですよ。いろいろ調べるとまだ分かっていないことばかりで……（笑）。たとえばタイヤとして十分な性能を持たせるためにはカーボンブラックを補強充てん剤として入れるといいことは知られていますが、なぜいいのかということは今でもまだ、はっきり分かっていないのです。

ひとつの理由は、カーボンブラックの分散の程度を調べる分析で、長い間、3次元のものを2次元でしか見ていなかったのが正確な情報が得られておらず、力学物性との相関がうまく説明できていなかったことにありました。しかしトモグラフィ技術などが発達したおかげで、21世紀に入ると私たちも3次元TEM（透過型電子顕微鏡）を使った研究を始めるようになりました。2004年には、世界で初めてゴム材料の中でシリカがどのように3次元的に分散しているかを明らかにした研究を発表しました。

——天然ゴムがなぜ強いのかということも、実はよく分かっていないそうですね。

天然ゴムの特徴のひとつとして、

伸長結晶化が起こりやすいということがありますが、私たちはこれが天然ゴムの強さの秘密と考え、今はその研究もしています。さらに、たくさんのゴム製品をつくるのに使われている硫黄架橋（加硫）の反応機構も、実はまだ、十分には分かっていません。

すでに、私たち人類はタイヤや制振ゴム、免振ゴムなど多くのゴム製品のおかげで豊かな生活を送っています。しかし、その製品をつくる網目構造がどのような網（＝ネットワーク）なのかということも、はっきりと分かっていないのです。

以前、私たちは東大物性研究所にお願いして小角中性子散乱測定を行い、その網目構造を調べたことがあります。そして、網目構造をつくるためにゴムに混ぜる試薬が、網目構造のモルフォロジーも制御していることを掴みました。これは、予想外の、本当にびっくりする結果でした。

このように、ゴムの分野には、まだまだ分からないことがたくさんあって、研究をしていくうちに、私はどんどんゴム研究にのめり込んでいったんです。助手のとき、山下先生から「加硫に手を出さな、泥沼にはまるぞ」と言われていました。でも、いつの間にかすっかりその泥沼にはまっています（笑）。

加硫に手を出して泥沼にはまる

——泥沼とはどういう意味ですか。

加硫反応は極めて複雑な反応で、その機構を一つひとつ明らかにするのは至難の技であるという意味です。また、研究してもなかなか成果が出ない、大変な研究だという意味もあります。

だから、もともと私には加硫の研究をする計画はなかったのですが、知らぬ間にそこにはまってしまいました。天然ゴム架橋体の伸長結晶化の特徴を追究していたら加硫に行きついてしまったということです（苦笑）。研究では化学反応でモノをつくり、その物性を測り、構造を調べるといった経路をたどるのが一般的なのですが、私の加硫に関する研究の場合は順序が逆で、まず構造から入り、物性との相関を調べ、それから化学反応にたどり着いたという感じでした。

——研究では大型の放射光施設を使われているそうですね。

ゴムの加硫反応を調べるためには高温下高速で測らなければならないので、兵庫県にあるシンクロトロン放射光施設スプリング-8を利用しています。最近は専門家ではない私

たちもシンクロトロン放射光を使える環境が整ってきたことが背景にあります。もちろん、素人集団ですから試行錯誤の連続で苦労をたくさん重ねました。しかし、今では世界でトップを走る研究をしていると自負しています。

ゴムのサイエンスをもっと多くの人に知ってほしいので、去年は『ゴム科学』という本も共著で出しました。お陰様で好評につき、今度増刷することが決まりました。また、この秋には英語版も出版予定です。

やっとたどり着いたスタート地点

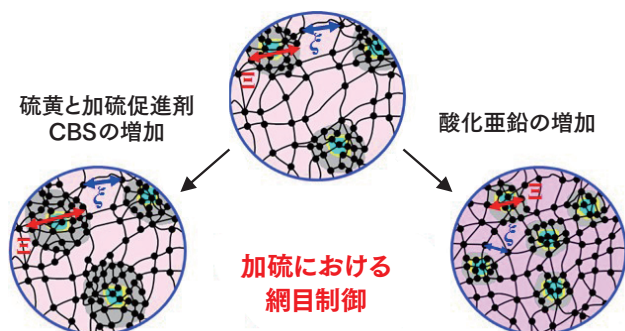
——大変お忙しそうですね。

実は昨日も英語版の本のゲラ校正のため午前3時頃までここにいました（苦笑）。タイから来ている留学生にも手伝ってもらったんです。

——先生の研究の目的は、天然ゴムの強さの謎を解明し、天然ゴムに倣って新しい材料をつくることと、ゴム製品製造に必須の加硫の研究ですか。

そうです、その2つが大きな目的です。私は高分子化学が専門ですから、ゴム材料の構造がどのような反応でできているのかを探るのがメインになります。その過程で、ゴムの加硫における新しい反応中間体を発見しました。酸化亜鉛とステアリン酸はほとんどのゴム製品製造に使われていますが、それらが反応して生成する物質が、亜鉛カチオンとステアレート比率が1対1の中間体であることを発見したんです。ところが2012年にそれに関する論文を投稿したら「常識外れで信じられない」と国際雑誌の審査で指摘されました。そこでコンピュータを使った理論化学により、酸化亜鉛とステアリン酸を反応させるとこの中間体ができる

加硫試薬による網目不均一性形成の概念図



出所：Y. Ikeda, et al., Macromolecules, 42,2741(2009).



ゴム練り機。ゴムを練っているときにカーボンブラックを混ぜる。



熱プレス機。練ったゴムを金型に入れ、プレス機で圧力かける。

ことを明らかにし、論文を再投稿しました。

私自身、びっくりしたのですが、ゴムの加硫反応はこの中間体の働きで生体の酵素反応とよく似た反応経路をとっているんですよ。研究開始から約6年かかって2015年の1月にこの論文を国際雑誌に発表することができました。すると、翌2月にアメリカ化学会（ACS）からメールが来ました。「あなたの発表された論文は、大変興味深い研究なので世界中にプレスリリースする」という内容でした。それはそれは、とてもうれしいことでした。でもそのあとでプレスリリースの文面を読んで、はっとしました。「池田チームは加硫工程のカギとなるステップを明らかにする研究を開始した」と書かれていたからです。

———どういことですか。なぜ驚かれたのですか。

つまり、加硫反応の反応機構はまだ明らかになっていない、その研究はこれからだ、池田らの今回の成果はその一歩となると、正確な表現の記事であったからです。私たち自身は、やっとここまで来たかという達成の思いの方がそのときは強かったので、さあ、スタート地点だと言われて苦笑いとなったわけです。

ゴム研究室の学生は絶滅危惧種

———ゴムの研究の歴史は長く、タイヤメーカーもどんどんタイヤを進化させてきました。にもかかわらず、分かっていないことが多かったという今日のお話には、驚きました。

硫黄架橋ゴムの正確な構造はほとんど誰も正確には分かっていませんでした。しかし、私たちは今、スプリング-8を利用した研究で、その全貌を明らかにしつつあります。加硫反応のメカニズムが分かればそれをコントロールする技術も、物性を制御する方法も確立できるはずですよ。

———約180年の歴史を持つ加硫のゴム科学にパラダイムシフトが起きそうですね。

その可能性は十分あります。日本発でパラダイムシフトが起こるといいですね。でも、今、日本ではゴム科学を学び、研究するところが減ってきていて、私の研究室の学生は絶滅危惧種と言われています（笑）。日本だけでなく、アメリカでもゴムの研究室は減っているようで、この研究室も私の代で終わってしまう可能性が高いです。しかし、日本には優れたゴム会社がたくさんあるので、若い技術者に期待したいですね。

もちろん、私たちも頑張ります。特に、飛行機や大型トラックのタイヤには天然ゴムが必須ですが、地球規模での異常気象の影響で、いつまで安定して東南アジアで天然ゴムが採れるか分からない今、化学の力で高性能ゴム製造技術を確立する必要があります。ヘベア天然ゴムの樹以外の植物から採れる天然ゴム、例えば、ワユレやゴムタンポポから採れる天然ゴムの高性能化には、加硫技術の発展が重要となるのです。私たちも、オハイオ州立大学から、ワユレ天然ゴムをいただいて、その研究を行っています。

———お話を伺っていると、まさにゴムに魅せられた研究者人生ですね。

ACSのプレスリリースが後押ししてくれて、私たちの研究にはJST（科学技術振興機構）からも資金が出ています。また、昨年には京都工芸繊維大学に、恐らく日本では初めてのゴム科学研究センターを開設することができました。定年まで、あと数年しか残されていませんが、天然ゴムの強さの謎とゴムの加硫の正体を解明したいと考えています。そして成果を世界に発信し、人類が平和で豊かな社会の中で幸せに過ごせるよう、ゴム科学から貢献できたらと、人生をかけて研究しています。