

はじめに

つらつら思うに、すべての動物は予測の下に生きている。あそこに行けば餌があると思って行動しない限り餓えてしまう。もしあそこに外敵や危険があると予測しないで動き回るとすれば、一瞬たりとも生きてはいけないうらう。そうやって正確に現状とその先にある事象を予測ができた動物だけが生き残った。不運という言葉は、予測が当たらなかつた時の悲しい結果を表す表現ではないだろうか。ではどうすれば正確な予測ができるのか、予定した目的と寿命を全うできるのか、多分、過去の危かつた経験を思い出すことが必要であり、そこから必死に考える方策(理論)が重要であろう。そして何より、それを実践する知恵と行動が成否を決める。

本書は単なる解説書ではない。横軸に並べた工学理論を、筆者の実践論が縦軸としてクシ刺す構成を取っている。すべての内容をバラバラな単独情報ではなく、一連の有機的な繋がりとしてお届けしたいからである。本書は、寿命を支配するのが何かを徹底して考え、それを予測の形に統合し、新たな技術として生かすことをめざした、実践の書である。何を問題と捉えたか、何が問題解決の糸口を与えたか、いかに難題を乗り越えたかを、筆者自身の研究と開発の実体験を交えてまとめたものである。何事にせよ、予測を成功させるには一般的な原則と理論を知ることが重要である。一方、時々刻々変化する現場で起こる状況では、事態に則した臨機応変の対応が求められる。それを可能にするのは、前もって全体を見据えた視野の広さと、対面する現実問題への深い洞察である。実践とは、そのような準備のうえに築かれる知恵の所産である。

2011年3月11日(東日本大震災)を、後の世の人々は歴史的出来事として「3・11」と称するのではないだろうか。未曾有の大地震と津波によって失われた人的、物的被害の大きさ、計り知れない放射能被害をもたらした重大原発事故の発生。そこで顕わになったのは、予測を超える現実の脅威、起きた時の対応の難しさである。

一方、この原発事故を純粹に技術問題として捉える時、我々が抱える技術開発、製品開発のあるべき姿が浮き彫りになる。予測と実態の乖離が招く事故の悲惨さ。どこにその根本問題があつたのか、どうすればそれを防ぎ得たのか、これは、たとえ対象

や規模が全く違う領域であっても、すべての技術、すべての製品に突き付けられた基本命題である。その対応を間違えといかに計り知れない損害が生じるか。本書を、この事故を念頭に置いて書き進めるのは、まさにそのような視点に立つからである。

さて本書の主題に入ることにする。たとえどのような技術や製品であれ、最も重要な2大要素は「機能と耐久性」であり、この2つが同時に満たされない限り製品にはならない。本書ではその中の耐久性を取り上げる。目的どおりの性能を持って造られた製品になぜ寿命が来るのかを、理論を背景に、知恵を絞って対策を模索していきたい。

本書を、「高分子の寿命と予測」という表題の下に書き進めるが、すべてにおいて高分子全体を網羅しようとする、焦点が分散して平面的になってしまう。そこで本書では、具体的な対象としては“ゴムに焦点を当てる”場合が多い。一般的には、プラスチックが変形の小さい静的な使われ方をするのに対し、ゴムははるかに大変形、かつ非常にダイナミックな条件下で使われる場合が多い。この意味でゴムは総合的な技術論を展開するのに格好の材料と言える。もちろん、ゴム(ゴム状高分子)とプラスチック(ガラス状高分子)は、同じ高分子が外的条件(温度や速度)によって顔を変えた違いでしかない。したがって、ゴムで展開される考え方のほとんどが高分子全体に適用されると考えてよい。

まず、本書の主眼点を説明したい。本書では、“高分子に寿命をもたらす2大要因を力学疲労と環境劣化”と捉える。しかし、そこに行き着くにはいくつかの初期ステップを踏む必要がある。そこで各論に入る前の序(第1章)として、寿命と予測の背景にあるもの、およびそれらを踏まえた「高分子寿命予測の全体像」を概略、デッサンする。まずは肩の力を抜いて読んでいただきたい。続いて、本書で主対象となるゴムがどのような材料であるかをやや詳しくお話する(第2章)。当然のことながら、破壊、疲労、劣化のすべてが材料の構造と物性に強く依存するからである。ゴム材料の不思議さ、面白さを味わっていただきたい。

いよいよそこから、疲労と劣化を支配する「破壊現象」(第3章)を取り上げる。破壊がわからなければ疲労も劣化もその本質が見えてこない。本書では徹底してゴムの破壊論を展開する。まず、ゴム破壊の特殊性を詳しく見ていく。寿命予測を真に実りあるものにするために、破壊を正しく理解することの重要性を繰り返し強調したい。破壊がわかれば、疲労と劣化はもはや庭先の問題として取り扱うことができるからである。

破壊の本質がわかったところで「力学疲労」の説明(第4章)に入る。疲労は破壊の延長上にあるが、かなり異なった視点が必要である。なぜなら、破壊力学は破壊開始に光を当てるが、疲労では破壊の進展が重要になる。ゴムの耐疲労性の素晴らしさは他の材料の追随を許さないものがあり、それがどこから来るかを詳しく見ていきたい。

一方、高分子は酸素やオゾン、紫外線等による「環境劣化」の影響(第5章)を強く受ける。劣化という現象は一般的に行われている分子レベルの化学反応だけでは捉えきれない面がある。各々の環境因子の持つエネルギーレベルの違いが、それらと接する材料表面の劣化状態を大きく変化させるからである。特に、オゾンや紫外線のような高エネルギー源の照射では、表面劣化層におけるクラックの発生、成長が破壊の引き金になる。

さて、後半部では本書の中心課題となる「高分子の寿命予測」に入る。寿命予測は空理空論の研究ではない。何にも増して、理論を生かす実践の学問である。本書では免震ゴムという特定のゴム製品に焦点を当て、筆者自身が行った「免震ゴムの60年寿命予測」(第6章)について詳しく説明する。おそらくこの取組みは、少なくともゴムという分野では、他に例を見ないほどの徹底した寿命予測の実例と言える。本書の前半部で取り扱ったすべての工学理論を、総合的、有機的に結び付けた実践論とも呼べるものであろう。

地震という人知を超えた自然災害から、しかも60年という長期間、建物を守るために行った実施例である。①何が免震ゴムに寿命をもたらす要因と予測したか、②免震ゴムがそれに耐えうるかどうかの定量的判断をいかに設定したか、③どのような実験とシミュレーションでそれを実証したか、④少なくともこの20年間の使用実績を経て当初の予測は当たっているか。寿命予測における、“思考過程と実証”の実例としたい。

続いて、過去に高分子分野で行われた「破損解析と寿命予測の実例」(第7章)を取り上げる。一般的に破損解析と寿命予測は一對として行われる場合が多く、両者は補完関係にある。高分子にとって先輩格である金属に学びながら、多くの実例を紹介する。ただしそれらの中には、寿命予測としては、特に“定量的寿命予測”としては、必ずしも適切な予測法と言えないものも含まれており、筆者なりの考え方を加えてみた。何が問題になるかを汲み取っていただければと思うからである。

一方、寿命予測はそれのみを目的とするより、それを足場にした新技術、新製品の開発を目指す場合が多い。そこで最終章として、寿命予測を基に筆者が取り組んだ2

つの「免震ゴム開発物語」(第8章)をお話ししたい。これらの開発には大なり小なり二律背反ともいえる技術課題が含まれており、その克服に費やした汗と涙の(?)物語でもある。筆者流に言えば、この部分にこそ本書が訴えたい実践の苦しさとしが凝縮されており、生みの喜びと感動を素直にお伝えしたい。苦勞を共にしたパートナーたちとの出会いは一期一会のもの。読者には肩の凝りをほぐしながら気楽に楽しんでいただきたいと思う。

さてここで少し膝を崩して(?)いただき、本書をPRしてみたい。筆者は企業を退職した後のおよそ10年間、大学や企業で様々な国の学生や技術者と交わってきた。そこで痛切に感じたことは、彼らの食い入るような眼差しを前にして、通り一遍の教科書的説明がいかに無力かということだった。実例がないと、特に、話し手の実体験の裏付けがない限り、本当の納得は得られないことを限りなく思い知らされた。それが本書を“実践論”として書く動機になった。加えて、たとえどんなに高邁な理論も、話し手の独りよがりでは、何も生み出さないこともいやというほど教えられた。そこで本書で徹底して追求したことは、“わかりやすさ”である。真意を正確に伝えるために、難しい専門用語や数式を避けて、そのエッセンスを、平易な日常語で、単純明快に説明することに腐心した。

技術者の喜びは、何も眉をしかめて本や機械に向き合うことではない。目の前の出来事に必死に立ち向かいながらも、その奥に潜む普遍的な課題とその答を探し求めることである。実験をしながら、理論を学びながら、どのような答えが出るか、ワクワクする心を抑えきれずに更なる実験に挑戦する。本書は、そのような冒険を重ねる研究者や技術者がいつも傍らに置き、事あるごとに好きのところから読み進めてもらえる“愛読書”になって欲しい。ある時は技術問題解決の書として、またある時には未知の分野に対する冒険と挑戦の書として。

残念ながら、個々の問題に対する正解はどこにも用意されていない。もちろん、筆者などが何か特別な答えを持っているはずもない。その回答は、苦しくても、技術者、研究者自身が試行錯誤の中で自ら探しだすしか方法がない。ただ、筆者にできることが1つある。それは、常に読者諸兄の側にあって、自らの体験を基に、一緒に悩み、考え、答えを探す旅をすることであり、その思いを込めて本書を書き進めた。

破壊や疲労、劣化という領域は、すべての諸兄には必ずしも取つきやすい課題ではないかもしれない。でも、心配ご無用である。ここに書き進めたことは、高校生程度の学力と興味さえあれば何ら抵抗なく読みこなせるものである。ただしその内容には、

ゴムを中心とする高分子の破壊や疲労、劣化に関する基本課題のほとんどすべてを網羅している。したがって、大学や企業の現場で研究や開発に携わる技術者諸兄にも、大学院で研究を始めようとする学生諸君にとっても、本格的な専門書としてお役にたてると確信する。

加えて、特筆すべきは、およそこの10～15年のゴム技術の目覚ましい進展である。これまでは想像の域を出なかったことが、最新の機器分析手法やコンピュータシミュレーションの進展により、その実像をかなり明確にイメージできる技術領域が急速に拡大している。そのようなゴム分野の新展開は高分子全体を理解するうえでも大いに参考になる。本書ではそれらの新しい技術情報をふんだんに取り入れ、また、わかりやすい説明のために多くの図や写真を採用した。

世の中にゴムほど面白い、摩訶不思議な素材はめったにない。力学発現のメカニズムにしろ、強さ、弱さや寿命においても、金属等とは大きく異なっている。この違いがどこから来るのか、その謎解きも楽しんでいただきたい。本書はもちろん、純粹に技術論として展開したものであるが、筆者の感性(独断と偏見)で取り上げた部分も少なくない。内容の良し悪しの判断はお任せするとして、筆者が体験したことのすべてをお伝えする気持ちで書き上げた。その試みが読者諸兄の心の琴線に触れるのを、今はただ、願うのみである。

なお本書は、「月刊ラバーインダストリー」(ポスティコーポレーション)掲載中の連載講座、「右脳で捉えるゴムのサイエンス」を基にしているが、まったく新たな視点に立って書きあらためたものである。最後に当たり、本書出版に向けて常に二人三脚で取り組んでいただいた技報堂出版の小巻愼編集長に、心からの謝意を伝えたい。

2013年9月

著者しるす

第1章 序——寿命と予測のプロローグ

1.1 筆者がゴムの寿命予測に取り組まざるを得なかった事情

筆者がゴムの長期寿命予測に取り組まざるを得なくなったのは、ゴム技術者としてのつひきならない事情が起こったからである。それは免震ゴムの研究開発に取り組み始めて間もない1985年の、ある建設会社との技術会議が発端であり、席上、次のような指摘があった。

“自分達は高層ビルの耐震設計を行う時、建物の詳細な地震応答解析を行った後、建物の構造強度を計算し、これに十分な安全率を見込んで設計する。免震ビルも耐震構造体として同じ手法、同じ精度で設計する。ところが免震ビルでは、最も重要な建物の基礎を支える免震ゴムの得体が知れない、と言うのは、長期使用中に起こる免震ゴムの特性変化が正確にはわからない(予測できない)との話を聞いている。

もしそうなら免震構造全体の安全設計はできなくなる。つまり、大地震の時、免震ゴム内に発生する局部応力やひずみの大きさに対して、免震ゴムの破断特性にはどの程度の余裕があるかを定量的にわからない限り、免震ゴムの変形限界と建物に許される変位限界が決められない。増してや、それらの値が経年変化するのであれば、それを正確に予測することが絶対的に必要である。そうでなければ怖くて使えない。

一方、実質問題として、免震ゴムが建物寿命(コンクリートビルの寿命は当時60年と設定されていた)より短寿命の場合、建物を建て替える前に免震ゴムを何度も取り替えることが必要になる。つまり、「免震ゴム性能の経年変化と耐久寿命が正確に予測できて、かつ、その寿命が60年以上でなければ、耐震基準の厳しい日本で免震ゴムを用いる免震建築が普及するのは、極めて難しい」というショッキングなものであった。

事実、その言葉どおり、建設各社は当時、既にフランスやイギリスで開発され、アメリカ等で使用され始めていた免震ゴムには手を出そうとしなかった。バネ要素としての免震ゴムの有効性は十分認めていたものの、それらの経年変化と寿命が全く不明だったからである。

言うまでもなく、この2つの命題は当時のゴム屋にとっては途方もない難題であった。なぜなら、当時、ゴム製品の使用寿命はタイヤを含めて最長5~10年程度であり、その5倍、10倍の寿命をどう確保するかは全く見当もつかなかった。一方、ゴムの寿命予測というのは、研究テーマとしては概略(定性的に)検討された例はあっても、これを実際の強度・構造部品としての定量的基準、つまり設計法としての予測や安全性の設定基準として用いられた報告は皆無であった。

しかしながら、建設会社のこれらの指摘はまさに的を射たものであり、免震建築全体の責任を持たなければならない建設会社としては、当然の要求であった。ここまでくると、上記の2つの難題を解決しない限り、免震ゴムという製品は日本では成り立たないと覚悟せざるを得なかった。こうして、筆者が免震ゴムの長期寿命予測と60年耐久性を保証できる免震ゴム開発に着手したのは1985年の秋のことであった。

1.2 寿命とは何か

1.2.1 人の老化をもたらす血管の老化、寿命を縮めるストレス

“人は血管とともに老いる”と言われるほど血管と老化の関わりは深い。血管の老化現象の1つは血圧上昇(高血圧)で、血管の壁が厚くなって伸縮性を失うことが原因とされている。もう1つの老化現象は動脈硬化で、コレステロールの蓄積等により血管の内壁が厚くなり、血管の弾力性が失われ、血液の通りが狭くなるために起こる。血管は、生命作用の源である心臓、肺のポンプ機能や、胃、腸、肝臓のエネルギー交換機能はないが、それらの機能を円滑に作動させる不可欠の働きをする。すべての臓器は血管に連結されて初めて機能を発揮する。

人の老化と寿命決定の第一因子は遺伝子であり、その次が環境因子だそうである。環境因子の中でもストレスの影響は非常に大きい。なお、ここで言うストレスとは、外から加わった刺激によって身体に起こる反応を指す。ストレスの原因となる刺激には、例えば、暑さ、寒さ、騒音、痛み等の身体的なものと、不安、緊張、怒り、恐怖等の心に感じる痛みがある。ただし、どちらの場合も、身体に生じる反応は同じであると言われている。

ストレスの原因のうちで最も重大なものは、配偶者の死である。特に、妻に先立たれた男は、ひどいストレスを受けて寿命が短くなるというのはデータが示している。これに比べると、怪我や病気はその半分程度のストレスであり、会社の上司とのトラブルなんぞはそのまた半分にも満たないそうである。だから、上司とのストレスは居酒屋で治るが、妻に先立たれることは取返しのつかないダメージを残す。気を付けて

第8章 免震ゴム開発物語

さて、第1章で述べたように、免震ゴムを用いた免震建築が日本で定着、普及するためには、長期寿命予測に加え、60年以上の耐久寿命を持つ免震ゴムの開発が不可欠という建設会社の指摘(1985年)があった。これを受け、ゴム製品としては全く前例のない、長期耐久性を保証する「60年耐久免震ゴム」開発に着手し、開発が終了したのは1988年であった。続いて取り組んだのは、「高減衰免震ゴム」である。これも同じ長期寿命予測に則って開発したものであるが、新たな機能を付与した次世代免震ゴムへの挑戦であった。寿命予測が免震ゴムの骨格だとすれば、免震ゴム開発はその肉付け作業だったと言えよう。以下にお話しするのはそれらの開発にまつわる表と裏の話であり、汗と涙の奮闘物語の1つとして楽しんでいただければと思う。

8.1 「60年耐久免震ゴム」の開発

8.1.1 どうしようもなかった初期の試作免震ゴム

1984年初頃、ブリヂストンで試作した最初の免震ゴムは、外国品の写真から見様見真似で作ったものであった。あらかじめ加硫したゴム板を市販接着剤で鉄板と貼り合わせ、これを水平方向にせん断変形させたのであるが、あっという間に破壊した。どんなに注意しても接着剤の塗りむらを改善できなかった。そこでとりあえず5層の鉄製円盤を円柱状の板金を取り巻くような簡単な金型を作ってもらい、何となく積層ゴムらしいものを作ってみた。早速、この積層ゴムをせん断変形させたところ、これもまたすぐに壊れた。加硫条件として、免震ゴム側面からの加熱が全く不足していたのである。そこで急遽、分厚いリボンヒーターを探してきて、金型の外表面をぐるぐる巻きにして加熱した。ところが今度は、スピーー(ゴム逃げ)部からはみ出したゴムがリボンヒーターで加熱され、煙と火を噴き出した。慌てて消火器で消し止めたが、全くどうしようもない状態であった。

このような情けない試行錯誤の末、やっと普通の金型に近いものを用意した結果、外形だけは一応まともな免震ゴムができるようになり、それなりの変形量まで耐え得る免震ゴムが得られた。“免震ゴムと言っても、まあ、こんなものだろう”と自信めいたものが生まれていた。そんな時、筆者らと共同開発していた田崎貞則免震開発部長

が、将来ユーザになりそうなある大手企業の幹部を実験棟に招待して、免震ゴムの実際の変形試験を見てもらうことになった。我々としては、万一にも簡単に壊れることがないように、慎重に試験用免震ゴムを作った。特に、接着剤塗布には細心の注意を払った。そして当日、せん断変形試験が行われた。

ところが、である。こともあろうに、その免震ゴムは皆の見ていた前であっけなく壊れてしまった。予想した破断せん断変形の1/3にも満たない変形量で、無残な接着剥離を起こしたのである。その場にいた全員は凍りついたように動けなくなった。その時である、田崎部長がにこやかにユーザを見渡して言ったのは、“あなた方は本当によい時に来られましたよ。こんな珍しい実験はなかなか見られるものじゃないですから。普通はこの程度の変形では絶対に壊れませんのでね。もしかしたら、皆さんがお見えになるので、担当者が緊張のあまり、接着剤を塗り忘れたのかもしれないね、ア、ハ、ハ”と。これを聞いたユーザの方も、“妙に感心して”帰られたとのこと。まさに、周囲を思いやる大人同士の対応ではないか。幸運にも(?)、筆者はその見学会の現場に居合わせなかったが、そこに居た人たちの話を聞くと、そして当時、人気があったNHK放映の“プロジェクトX”的に言えばこんな状況だったらしい。

これだから、筆者は田崎部長を尊敬していたし、好きだったのである。しかし一方、自分らの接着、製造技術がまだこのレベルだったかと思うと、そして、もし大地震の時、このような事態が1件でも起こったらどうなるかと思うと、甘く見ていた自分が恥ずかしく、冷や汗の噴き出す思いであった。そのような時、第1章で述べた建設会社の指摘があった。

こうなると、もはや腹をくくるしかなく、基本に戻って1から開発に取りかからざるを得なかった。そして、ここからが本当の意味で、60年耐久免震ゴムの研究開発が始まったのである。まず、開発の主眼を次の3点に絞った。①ダウエル式形状から新形状への変更、②ゴムと鉄板の接着技術の開発、③製造条件の確立。なお、内部ゴムと外皮ゴムの開発については第6章でも触れているので、ここでは割愛する。この開発でも恒例の如く、FEM計算等の数値解析は関互社員にまかせ、筆者らは実験を含む雑用一般を担当した。なお、企業内での役割分担は、筆者の部門が研究開発を、田崎部隊が実大試験や構造設計を受け持ち、常に二人三脚体制を取った。

8.1.2 ダウエル式免震ゴムから基礎固定式免震ゴムへ

1985年当時、イギリスやニュージーランドで開発され、アメリカ等で使用され始めていた免震ゴムには大きな問題があった。それらは「ダウエル式免震ゴム」と呼ばれ、図8.1に示すように、免震ゴムの上下のフランジ(厚い鋼板)部に各々、数箇所のみ