

積層ゴムの開発を振り返って



芳澤 利和

1 はじめに

皆さんがこれを読まれている頃には、私は74歳になっています。65歳で現役を退いて以来、悠々自適とはいいがたいですが、家内には疎まれながらも何とか好きな「ゴルフ」と「釣り」と「ときどき協会の仕事」を楽しみに生活しています。ゴルフも釣りも「道具一流、腕二流、結果三流」の状態で、なかなか物事を極めるのは難しいと痛感しています。

また近頃は、どこかの某大統領がホイホイサイン一つでやりたい放題のことを発令して、世界中が上へ下への大騒ぎになっています。大統領の権限とはこんなに強いのかと驚くとともに、今まで自由世界の秩序を牽引してきた国だと信頼していた人々は、船頭を失った船のごとく、どこへ向かうのでしょうか。さらにこの影響が日本経済に波及すれば、当然景気後退が懸念され、建築業界も大きな影響を受けるのではないかとやや危惧しているところです。

さて前置きはこれくらいにして、表題にある「積層ゴムの開発」について振り返ってみたいと思います。私は1974年に大学の機械工学科を卒業後（株）ブリヂストン（以下BS）に入社し、当時新商品開発部に配属されました。ここで少し会社事情に触れておきますが、BSはその売上げの80%がタイヤ事業、20%が化工品事業（防振ゴム、ベルト、ホース等）の比率です（当時）。新商品開発部というのは、BSがタイヤに依存していて、未来永劫会社が存続できるのかを懸念した経営層が、将来の事業の柱となる商品を開拓しようと、立ち上げた部署です。私はここで「積層ゴム」と出会いました。

積層ゴムの開発は1981年から始まり、1994年に事業化して現在に至っています。その間多くの建築関係の人に助けられ、また協会の設立にも参画し、協会が現在のように大きくなったことに感銘してい

ます。以下に、その間の出来事を振り返って紹介したいと思います。多少私的なこともありますので、ご容赦下さい。

2 積層ゴムの開発のきっかけ

私が積層ゴムに出会ったのは前述の通り1981年で、この時に私が生涯の師と仰ぐ、東京大学生産技術研究所の藤田隆史教授と出会いました。藤田先生は1979年頃から精密機器等の免震・除振の研究をされておられ、当時BSとパネル水槽の高層階設置における耐震化の共同研究を行っていました。BSが積層ゴムを開発するきっかけとなったのは、藤田先生がカルフォルニア大学のKelly教授が発表した、「A Practical Soft Story Earthquake Isolation system」の論文に興味を持たれ、当時の私の上司である田崎氏（故人）にやってみないかと話が合ったことです。

そこで、まず積層ゴムの理論や特許が存在するのかと同時に、海外駐在員に依頼して世界の積層ゴムの情報を調査することにしました。その中にはロンドンのアルバニーコートに、地下鉄の振動を防振するために積層ゴムで建物を支持したものもありました。また特許については、積層ゴムの特許は既知となっていることが分かりました。この結果を受けて、社内で積層ゴム開発の実行化（私の苦行）が決まりました。



写真1 藤田先生（左）、私、田崎氏（右）

3 積層ゴムの試行錯誤時代

最初に行ったのは、どんなものか試してみることでした。積層ゴムの設計理論は集めた情報で分かっていましたが、これを実証するには実際に積層ゴムを造る必要がありました。しかし当時はまだ一体加硫で造る技術がなく、社内をかけずり回り、たどり着いたのが加硫したゴムシートと鋼板をエポキシ樹脂で接着させる「Stap6」という技術でした。これは一般的にゴムとエポキシは接着しにくいのですが、ゴムに特殊な溶液（BS開発品）を塗布することで接着が可能となる技術です。これを用いて直径5cmのゴムシートと鋼板を接着した5層の積層ゴムを1ユニット製作し、これをさらに複数連結して製作しました（図1）。これは予想以上に大変な作業で、エポキシを薄く塗らないと3ユニットで15層、接着面は30面あるため、油断するとエポキシだけでゴム1層分の厚さより厚くなってしまうため、ゴムと鋼板を1層ずつエポキシを塗って加圧し、その状態でオーブンに入れ硬化させます。これを繰り返すことで造るのですが、これには涙が出るほど苦労しました。

しかし、積層ゴムは設計通りの性能を得ることができ、これはいけるかも知れないと確信しました。

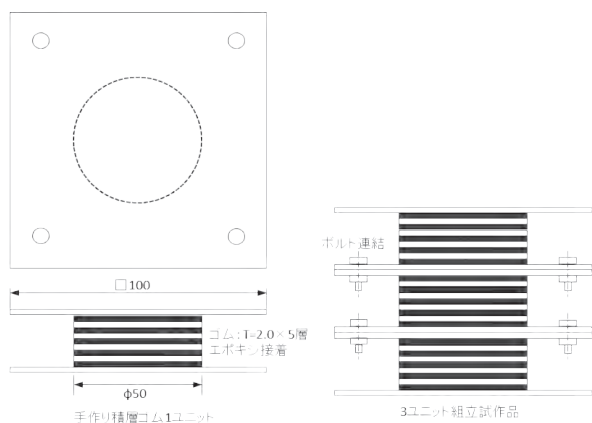


図1 初めての手作り積層ゴム

次に挑戦したのが、変圧器の碍子の免震化です。これは、遠くの発電所から大都市への送電圧を、50万ボルトから100万ボルトに上げ、送電効率を向上しようとするものでした（UHV送電計画：Ultra High Voltage）。当時はまだ免震という概念が世に知られていなかった



写真2 変圧器の碍子イメージ

たため、まず免震効果を実証することが必要ということで、振動台実験を計画しました。しかし困ったことに当時はまだ面圧が50kgf/cm²程度であったため、実用積層ゴムを設計すると、直径25.5cm、ゴム厚3.5mm、積層数57層となり、また振動台実験用にはその1/2程度の縮小モデルを製作しなければならないことでした。これには私もさすがに無理といったのですが、先生と上司から何とか頑張ってもらったのですが、泣く泣く引き受けた思い出があります。写真3が完成した実大モデルと振動実験用モデル（左写真）です。見た目はできていますが、接着層だけでも114層あるため、どこか1カ所接着が弱いと、そこで破断（右写真）してしまい、昼に実験し

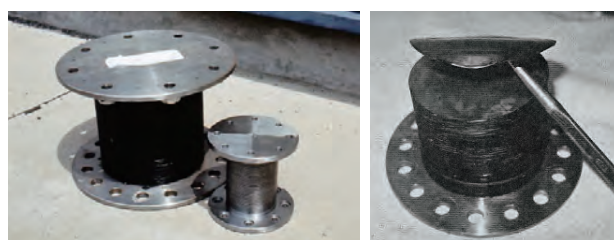


写真3 実験用手作り積層ゴム

て夜に徹夜で補修して、小平（BS研究所）と西千葉（東大実験所）を車で往復しました。残念ながらUHV送電計画は中止となってしまったのですが、この実験を通じて設計通りの性能が確認できたことから、本格的に加硫一体型積層ゴムの開発が始まりました。社内の材料と製造のプロが参画してくれ、何十年も使われるのだから被覆ゴムは耐候性がないとダメ。耐オゾン性は、結露は、水や油は？。変形時に端部に応力が集中するから、端部はR形状がいい。と次々に質問と議論が飛び交っていました。こうしてできたのが写真4に示す積層ゴムです。

この一体型積層ゴムを、東京大学の本郷にあった2000Tアムスラー試験機を用い、重工関係、電力関係、建築関係の人々を招いて、圧縮・せん断破断試験の公開実験を行いました（写真5）。



写真4 加硫接着積層ゴムプロトタイプ
φ440-5.0×30 ts=3.0mm
W=50ton fh=0.5Hz fv=18Hz

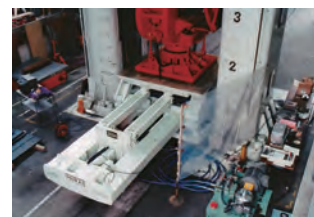


写真5 東大2000ton アムスラー試験機で破断試験の公開実験

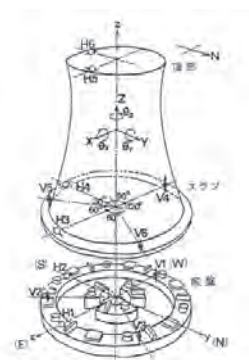
4 積層ゴムの転機

私が積層ゴムに携わった間に、以下に述べる3つのグッドタイミング的な転機がありました。

(1) 建設会社の参入

1984年に我々が実験の結果を論文で発表したところ、建築業界の人が興味をいだいてくれたことです。ちょうど竹中工務店が偏断面サイロの施工実験を計画されていて、それに免震の実大実験ができないかと藤田先生に協力依頼があったことです。藤田先生も建築免震には非常に興味を持たれていたもので、まさにグッドタイミングで計画はどんどん進んでいきました。

写真6は当時の竹中工務店技術研究所の中庭に建設されたものですが、実験は上部サイロを一定の応力で破断するようにした鋼棒を介して引張り、サイロを自由振動させようというものでした。この時の感動は今でも忘れません。実験開始とともに技研の多くの人々が見守る中、「バーン」という衝撃音と地響きと共に、サイロが大きくゆっくり動き、見学者から思わず拍手喝采が上がりました。私もこんな経験は初めてだったので、「ヤッター！」とガッツポーズを決めていました。その後、多くの建設会社が免震建物の開発をスタートさせたのはご存知の通りです（写真7）。



試験体測定点位置



写真6 竹中工務店サイロ免震実験



写真7 各建設会社免震建物
鹿島建設音響実験棟 大林組 61 実験棟
竹中工務店竹友寮 清水建設（東北大学免震実証棟）

(2) 原子力免震プロジェクトの開始

2つ目は、原子力発電で免震化の検討が始まったことです。これは次世代型原子炉の高速増殖炉を免震化しようとするもので、当時の通産省資源エネルギー庁の委託によって、1987年から「発電用新型炉技術確証試験（高速増殖炉技術確証試験に関するもの）」として（財）電力中央研究所が主体となり、7か年計画で実施されたものです。この実験は積層ゴムの水平、鉛直性能はもとより、限界はどこにあるのかに注力して行われました。

原子力用の積層ゴムは図2に示すように直径1600mmと大きく、これでは限界試験が出来ないので、縮尺1/1.58の直径1012mmの積層ゴムで実験が行われ、天然ゴム系積層ゴム（昭和）、高減衰積層ゴム（BS）、鉛入り積層ゴム（BS+オイレス）の3社が協力しました。

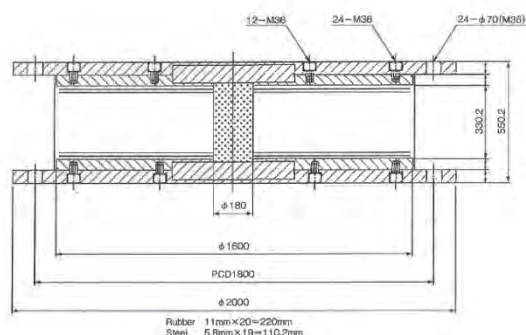


図2 原子力発電用積層ゴム

実験は（財）電力中央研究所の我孫子実験場にて軸力600tonの静的2軸試験機（破断時の衝撃にも耐えられる設計）を用いて行われました。私もこの実験に立ち会いましたが、「ハラハラ、ドキドキ」もので、腕を後ろに組んで人差し指と中指を交差させていました。しかし、中には目標に到達しないで破断して

しまうものもあり、これに対しプロジェクト側から、この原因を究明して報告するようにと指示がでます。BSもゴムのトップメーカーとしての意地もあったことから、保有技術を最大限つぎ込んで解明に当たりました。この時の知見が今の積層ゴムの信頼性と技術基盤の確立につながっていると思っています。

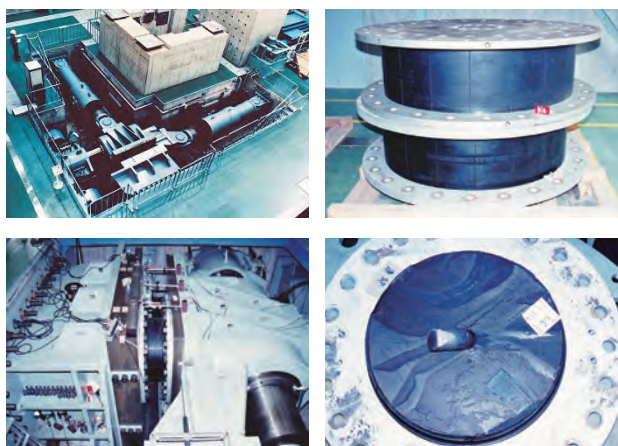


写真8 (財) 電力中央研究所 2 軸試験機と破断試験

(3) 兵庫県南部地震の発生

3つ目は、皆さんもよくご存知の1995年の阪神・淡路大震災です。これまでに経験したことがない多くの人命が失われ、また建物、インフラに大きな被害が出ました。しかし反面この経験が免震の発展に大きく寄与したのは確かだと思います。

それは、この大地震を経験した免震建物が兵庫県三田市に2棟あり、いずれも設計通りの免震効果を発揮したことです。これにより一挙に免震の概念が世に広まり、コンピューターセンター、マンション、半導体工場、行政庁舎、物流倉庫等の地震時に被害を受けてはならない建物へ発展していきました。

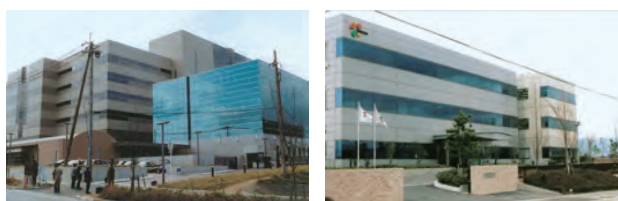


写真9 兵庫県三田市にあった免震建物
郵政省 WEST ビル (左)、松村組技術研究所 (右)

Isolation Result

	UD	EW	NS	
Ground Acceleration	213	300	263	
1st Floor Acceleration (Gal)	193	106	57	
6th Floor Acceleration (Gal)	377	103	75	

図3 郵政省 WET ビルの免震効果

以上の3点ですが、ここで述べたかったのは積層ゴムの開発が非常に幸運に恵まれたということです。1981年に開発をスタートし、UHV計画が中止になったら、1984年に建設会社が興味をもって来て、さらに1987年には原子力プロジェクトで、国の予算援助をもらって積層ゴムの性能分析・評価技術、さらに製造技術に磨きをかけることができ、さらに1995年の大震災で大きくマーケットが広がったことです。

5 ISOとJIS規格

話は変わりますが、現在免震建物のISO化が進行しているようです。しかし、積層ゴムには既にISOとJIS規格が制定されています。これについて少し紹介したいと思います。

成り行きは、1999年にイタリアが積層ゴム支承のISO化を提案したことに発します。実は、当時イタリアは積層ゴム支承に関するヨーロッパ共同規格(CEN)を作成中で、このCENの規格がISOに提案されると、途中の審議が省略され、一気に規格化される場合があります。日本は寝耳に水の状態であわてたのが日本ゴム工業会(ゴム材料・製品におけるISO規格審議承認団体)で、急遽西敏夫教授(当時:東京大学)を主査とする免震ゴム・ゴム支承分科会を設置し、日本案の作成に取りかかりました。

ここで面白いのは、日本では建築と土木(橋梁支承)を全く別と捉えますが、外国は建設工学(Construction Engineering)として同一に捉えることです。したがって建築用積層ゴムと橋梁用ゴム支承が同時に審議されるのです。これにはあわてました。見た目は積層構造ですが、建築と橋梁では要求性能が全く異なり、相手も民間と国ベースで違います。

委員会には橋梁関係の委員も参画しましたが、当初は全く意見がかみ合いませんでした。しかし、私が最も危惧したのは、全て文書は英語で交渉も全て英語となることでした。本来ならば翻訳業者に委託するのですが、時間と専門用語の関係からこれはたまたまと、当時社内留学でアメリカにいた室田氏(現JSSI副会長)に手助けをお願いしました。

ISOで日本として次の3点の方針を策定しました。

- 1) 積層ゴム支承の規格であって、構造物の設計を制約するものであってはならない。
- 2) 設計者と生産者間での共通認識と性能確認が出来るようにすること。
- 3) 仕様規定ではなく性能規定を重視し、要求性能項目と評価方法を規定すること。

このような状況の中で、作業の原動力となったの

が、日本が免震では世界のどこよりも進んでいるし、また積層ゴム支承の技術データ蓄積も最も充実しているということから、日本がこの規格を作らなくて誰が作るのかという自負（イタリアに負けてなるものか！）でした。そして2005年にようやくISO 22762が制定され、その後2011年にJIS K 6410規格が発行されました。

写真10は2003年にロンドンのBSI（British Standard Institution）で開催されたISO国際会議参加メンバーです。



写真10 BSI（英国規格協会ビル）と委員会参加者
後列左から2人目：西委員長、4人目：飯場（国総研）、右端：私。
前列左から1人目：運上（土木研究所）、3人目：室田（BS）。敬称略

規格に関して全くの素人が、ISO規格に6年、JIS規格に5年、足掛け11年間積層ゴム支承の規格化に携わりました。そこで感じたことは、

- 1) ISOについては英語が堪能でなければ諸外国と渡り合えない。
- 2) 規格は投票によって決まることから、低い水準に合わせざるを得ず、規格成立を優先するか、規格基準を高くするかが悩ましいところ。
- 3) JIS規格については、行政からの明確な指示や方針はありませんが、行政の了解を得ておかないと進まない。

もし、これからISOやJIS規格に携わる方があれば、上記を肝に銘じて取りかかるのが肝要でしょう。

6 おわりに

よく製品開発では「千に三つ」といわれます。すなわち千の開発を行っても、ものになるのは三つということです。開発当初は社内から「ゴムの上に建物を載せて大丈夫か、製品に何かあったら会社は責任取れないぞ」といわれたものです。私もこれを心配したのですが、ある時に建設会社の技術研究所の所長さんが「何を心配しているのですか、そんなことが無いように建設会社が全てにおいてチェックし、我々が自信を持ったものしか使用しません。したがって責任は建設会社が持つのですよ」といわれました。これが社長の耳に入り、「面白い、タイ

ヤも人の命を載せて走っている。BSの社是でもある（最高の品質で社会に貢献）で行こう」ということで開発が決まりました。

製品開発から事業化まで13年かかりました。BSではほとんど有り得ないことです。これは先にも述べたようにダメになりそうになると、次々に新しい展開が始まり、これがBSの予想外の大きなテーマとなって開発を推進させたのだと思います。また私が所属していた研究開発本部が社長直轄で、予算が潤沢にあったのも幸運の一つでした。

分野の異なる建築技術者と話すときに、私が心掛けたのは、日頃鉄とコンクリートを相手にしている技術者に、ゴムというものを理解してもらうことでした。BSにも多くの優秀な化学者がいますが、彼等の用語は他分野の人には意味不明で、理解できない。私も実際そうでした。そこでまず私が理解し、これを図や写真、イラスト、例を用いて分かりやすく説明することです。例えば、鉄の弾性はエネルギー弾性で、ゴムの弾性はエントロピー弾性なのですよと説明したものです。エネルギー弾性とエントロピー弾性の違いが分かりますか？

ここでちょっと、私の個人的な思い出で申し訳ありませんが、ここに記載させて下さい。それは、1988年にBS社内の特別功労賞を受賞したことです。これは開発に携わった設計、材料、製造、販売部門の協力者全員に送られたもので、代表して私が授賞式に出席しました。写真11はその時の家入社長（故人）と握手しているものです。



写真11 プリヂストン特別功労賞授賞式 左：私 右：家入社長（故人）

最後に、「建築とは」について私を導いていただいた、建築界の大先生方、特に東京建築設計の山口先生（故人）には、本当に感謝の念に堪えません。また、福岡大学の多田教授（故人）とは、ゴムに関する意見の相違はありましたが、今の建築免震の礎を築いた素晴らしい発想と思想、そして行動力を持たれた方と尊敬しています。

ご清覧ありがとうございました。