

ある研究テーマの発展とその動機

柴 田 碧*
Heki SHIBATA

本稿は1958年から発足した装置機器学（化学機械）部門担当の柴田研究室の研究課題の発展の経過についてまとめたものである。同年発足した日本最初の原子力発電所の耐震設計に関する委員会に参加したことがきっかけとなって、それ以来機器・配管系の耐震設計手法の開発を行って来た。これは1970年代になり石油化学プラントへと発展した。この間、理論、試験方法、実地震応答観測などを手掛け、さらに防災関係と展開した。そして、地震による損傷事例の原因を解明していくうちに、ヒューマン・エラーなどに関する研究へと進展した。どのような背景で、30年余の間研究がこのような発展したかを述べる。

1. はじめに

本稿は平成4年3月16日の生産技術研究奨励会および3月24日の退官記念の両講演の内容を一つにまとめたものである。著者の大学院以来の研究がどのように発展して来たかの動機を中心に時間を追って述べてみる。1988年にソウル国立大学で、著者の機械力学についての研究テーマがどのように選択されたかについて話をしたことがあり、その折にまとめたものが基礎となっている。

著者の動くものへの関心は小学校へ入る前からあり、その関心が一貫して現在に至っている。それと同時に、中学時代（旧制武蔵高等学校，尋常科）の趣味、研究グループの影響が色濃く反映されている。これは、指導に当てられた先生はもちろん、先輩、同級生、後輩の個性ある方々の影響によるが、ここでは、その内容について、個々のお名前については触れないことにする。

退官に当たっての生産研究への執筆は多くの先輩方によって為され、それが意味での本所の歴史を、10年ごとに発行される記念号とともにかたち造って来ているが、この稿は多少それとは焦点がずれているかも知れない。しかし、この稿を書くに当たって考えてみると、本所の研究環境は全く制約のないものであったことに気付く。

2. 中 学 以 前

小学校に入学（1938）する以前、中国との関係も平穏で不況の時代、鉄道への関心が強くその中に工学への関心の芽生えがあったことに気付く。それと共に、水道工事などの土木工事、浅間山の噴火による降灰（1934?）、

祖父を失くした関東地震とその後の火災の話なども強烈な印象がある。このようなことから、現在の専門への素地は小学校へ入学する以前にほぼできていたように思える。一つ一つの事柄について詳しく書けば、それなりに現在の仕事への連がりを見出すことができるが、そこまで書く必要もないと思われる。

小学校に入り、比較的低学年から「子供の科学」を読むようになった。ルビ付きであっても漢字の意味もよくわからず、ただ工作（とくにラジオ類）の記事の面白さとともに、「緑の日章旗」という木々高太郎の小説に出て来る光導体や小切手流通の話や、その他磁気浮上鉄道の話、まだ中性子に言及していない核子と核構造モデルのことなどが印象に残っている。その後、2～3冊の気象関係の本、とくに玉川学園出版の児童百科全書で気象に、また日本の災害を記した新書版ぐらいの本で津波や火山の恐ろしさを、祖母や母の関東地震の体験とともに身にしみて感じた。岩波の児童むけの文庫で、丹那トンネルの工事誌、新元素発見物語（これは岩波でないかも知れない）などを読んで、次第に興味の中心が固まって行った。小学校4年の頃には新元素発見物語の最後の部分にある、サイクロtronによる超ウラン元素の発見に興味を覚え、実験核物理をやりたいと人に言った記憶が、その本の挿絵に仁科博士の英文論文の第1ページの凸版が載っていたのと同時に鮮明に憶えている。仁科博士とは東大教養学部時代、先生の亡くなる直前にお会いして、二三言葉をかわしたことがあるだけに、思い出が深い。戦争が激しくなるに従い小学校の生活も荒々しくなったが、理科教育も盛んにいわれるようになり、理科教室でウラニウムのイエロパウダを見付け手にとって、そのずっしりした質感をアじわったのを思い出す。その折に

*東京大学名誉教授・日本学術会議第5部会員
横浜国立大学教授

は原子爆弾のことを知っていたのかどうか憶えていないが、山中峰太郎の小説や子供の科学の記事に話が出だしていたように思う。

小学校を終える頃には鉄道とともに気象が興味の中心で、生物にはほとんど関心はなかった。

3. 中 学 時 代

専門に近い関心が形成されたのはこの時代である。尋常科2年、1945年8月に終戦となったが、それまでの数ヶ月陸軍気象部の動員で軽井沢に行き、極東天気図を描くことと開墾を行った。極東から千島にかけての地名に詳しくなったことや、浅間山を見て暮したため火山についても関心を増した。一年先輩の現北大教授（東大名誉教授）荒牧重雄氏が火山を専門とされるようになった動機もこの軽井沢での生活であると同っているが、その後もいろいろ地質などを含め、著者の関心のあり方の原因の一つとなっている。その後、気象観測班も復活したが、多くの班員が鉄道にも興味を持っていた。その中の先輩のうちに、電車の制御器と線路に関心が深い2人がいた。この2人は後に鉄道の仕事を本業をとするようになったが、この時代に実物の内容を深く知るだけでなく、定速制御回路や弾性支持枕木などの考え方を示して、その後本職となって中学時代のアイデアを実現しているぐらいの傾注振りであった。

このような先輩というか、環境、それは先輩の方々も含め、それが自由であった指導教官のお陰で、著者の現在の関心が成長したものといえる。

4. 東 大 学 部 時 代

新制第1回の教養学部は予算の通過がおくれて、1949年7月に入って入学式が行われた。講義は9月からで、とくに印象に残るようなこともなく、実験の内容のものを楽しんだ。このとき、物理実験は仁科雄一郎氏と組み、それで仁科先生にお会いする機会を得たこともさることながら、いわゆる理研精神を知るきっかけにもなった。一方、地学のグループに入って、野外調査などを楽しんだりしたこともある。このような中で進学振分けの時期になったが、いずれにしても理学部へ行く気持はなかった。これは大学受験のときからそうであった。鉄道ということで工学の方を向いてしまっていた。電気、機械、土木のいずれかというところと考え、土木は当時ダム開発が盛んであったので、消去した。次に電気は数学が得意とは思えなかったので、1年間強の成績も考慮して、これも消去した。そして機械に決めて最初から鉄道の台車を専門とする積りであった。台車、すなわち力学ということで、藤井澄二先生（現富山県立大学学長）の研究室を志望した。実験はスクターのダンパ、これはとくにどうということはなく、実験のリポートとしては、それ

までの熱、内燃機関、サイラトロン（電気）などの方が考える余地があって、面白かったように憶えている。図面を書くのは面白かったが、上手でなくその点困った。卒業設計で念願の鉄道台車を課題とすることができた。4年夏の工場実習は近畿日本鉄道の高安工場で1ヶ月を過ごしたが、その際、1931年製の鋳鋼台車の枠に亀裂が入る故障が何例か続いて起き、疲労現象を知った。また、戦後の製造のピニオン軸の破断の発生、U弁と称する大変複雑なブレーキ制御弁の分解、組み立てを見たことも、ずっと後の研究に関係して来ている。そして、当時の国鉄臨時車両設計事務所の先輩（高校、大学とも）に表紙を外した一冊の設計図書をお借りした。これに疲労計算が詳しくなされており、ある意味で図面より面白かった。その頃、ゴムのブロックをばねとして使う台車が気動車にできており、ゴムと空気圧を使って心皿を浮かす計算をしたりした。空気ばねのような制御弁は考えつかなかった。

このようなことを背景に、鋳鋼台車メーカーに就職を希望したが、卒業の1953年は新制と旧制が同時に卒業した年で、新制は受験させてもらえずどうしようかと考えているうちに、旧制とは異なった大学院ができるとの事を知り、進学を希望した。このことは奨学金制度の改正との関連で博士課程へ進学することに続き、こうして研究教育を専門とするようになった理由である。

学生や自分の子らが進路を選ぶのに消去法によっているとか、また、小学生時代の関心が学習塾などの負担で消されるという感じを持つことがあるが、自分自身の進路を思い出しても同じようなところがあることは確かである。ただ、強い関心のある事が芯にあたったことは確かである。ある新聞に著名人の自伝が毎月出ているのを拾い読みしていると、そのような人のある部分は幼い折の関心が崩れていないように書かれているが、これはエンジニアより芸術的な領域の人についてが多いように見える。工学教育は工学好きにするのが楽であるが、消去法で工学嫌いだけを除いた一般人への教育が本当ではないかと思う。この点、好きな者の集団の中で過ごして来た著者には理解しきれないのかも知れない。

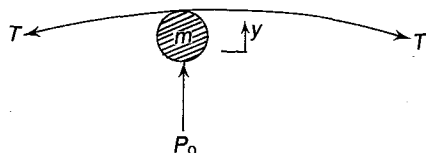
5. 大 学 院 時 代

藤井研究室ではプロペラ軸の振れ廻りを課題として行った。自動車の両端にユニバーサル・ジョイントのある軸の振れ廻りであった。藤井先生は1953年秋より1年間、フルブライト留学生として、MITに留学しおられた。実験を主としてやっているうちに両端に粘性減衰のあるはりの複素解に熱中してしまった。これは主な課題であるジョイントに角度がついた場合の分数次共振とは大分、方向がずれていた。重田助手（現本所、当時技術補佐員）の助力で小型模型実験と理論解析を終えた。指

導教官の意図はなかなか学生に伝わらないものである。しかし、この両者の仕事とともに、自分の仕事の展開に役立っている。

修士時代、工場の工作が隘路となったこともあり、また、アナログ計算機の試作が国内でも行われるようになって来たので、とにかく手計算で解けない対象を解いてみようと考え、1955年から試作をはじめた。解析の対象はボギー車の蛇行動である。2軸貨車の蛇行動はすでに理論が確立し、一方、ボギー車（電車）でも現象的に観察されていた。演算増幅器を2台作り、自励振動を発生させた。アナログ計算機なるものデモを、単純な積分器ではない回路を作って用いた。その後蛇行動の原因となる軌条、タイヤ間のクリープ力を計測することを試みたが、大変難しく、またそれが測れたにしても、アナログ計算機に組み込むのはかなりの予算が必要と思われた。その一方、当時の国鉄はボギー車の蛇行動には余り関心がなく、本格的に取り上げられたのは新幹線用車両の蛇行動が問題となった1962年以降であり、結局このテーマは断念することになった。

1955年に鉄道電化協会の集電委員会が集電の力学問題も扱うようになった。一方、当時、国鉄、私鉄で高速集電試験が繰り返し行われ、それに乗車する機会も多かった。ある条件下では、共振速度があり、それを越えることができると、再び離線が減少するという事に気づき藤井先生に報告した。藤井先生が基本的な定式化を試み、それから次の式を導びいた（図1）。



$$m\ddot{y} + k(1 - \varepsilon \cos pt)y = P_0$$

図1 パンダグラフの動力学的モデルと、パンダグラフ方程式とよばれる数式表現。

$$m\ddot{y} + k(1 - \varepsilon \cos pt)y = P_0 \quad (1)$$

この式は Mathieu の式の右辺に定数項があるもので、解は Mathieu の解と、定数項による強制振動解とから成り、解くのも比較的簡単であった。蛇行動の問題で行きづまったとき、集電委員会のための計算ファイルを調べたら、ある程度の計算がすでにやっていたことが見つかり、博士論文のテーマをこちらへ切り換えることとした。式(1)は $\cos pt$ の項の乗算装置を作れば、アナログ計算機の演算対象としては、蛇行動より簡単であり、まだ他で行われていないこともあり、この場合適当な課題であった。架線系のモデル化としては弾性支床上の弦が

考えられ、演算法としては弾性支床のはりの演算と同じようにして解けると考えられた。事実、それからの仕事は比較的容易で、実験（3スパンの実物架線モデル）も含め、10ヶ月ほどで論文としてまとめることができた。ただ、弾性支床上の弦など解は、無反射の境界が無限遠にあるとしたもので、それを具体的に実験や数値シミュレーションで実証するのは、当時としては困難であった。したがって、生研報告についてもパンダグラフ編はあるが、架線編をまとめてない理由の一つである。

6. 1960年代

1958年3月に大学院を修了し、4月より化学機械部門の担当として本所へ助教として着任した。専門として自動制御に関心があったが、他の部門と重複するので、原子力の分野を手掛けることとした。大学院時代、西脇仁一・渡辺茂両先生を中心としたグループで日本原子力研究所・国産一号炉（JRR-3）の設計コンベの作業を担当したのが原子力の分野の仕事の最初である。その後、原子力産業会議の勉強会などで勉強の機会はあったが、いざ、専門にしようとするところから着手してよいかわからなかった。ところが、6月になって日本原子力発電所の東海発電所の耐震設計を検討する委員会が、内藤多伸先生（当時早稲田大学）を委員長として開かれるので機械工学の分野から手伝うようにとのことであり、1958年の夏は、英国3社からの図面と計算書を見ることで過ごした。技術的などの側面とそれに関連した動きはすでに記したのでここでは述べず、研究上の観点についてのみ記す。

耐震設計の基本は静的震度法にあるとの認識は持っていた。日本側から提示された案は、重要度分類と動的特性を考慮に入れた対象別の震度係数であり、とくにガスダクトを2Gとした点だった。これらの値は同社の組織前にあった日本原子力研究所に設置された原子炉耐震委員会で決定されたものと思われるが、現在の原子力発電所の耐震設計の基本に連なる非常に重要、かつ有益な方向を示していたものと思う。

最重要な課題はグラファイト炉心を支持する方法であった。グラファイトをたがで締め付けることが基本であり、構造材と炉心との熱膨脹率の差を吸収するのに、異種金属を組み合わせる方式が3社から提案された。これらは構造物の大きさに比べてやや非現実的に見えた。その後、グラファイトの照射特性のデータが積算線量の高くなった領域まで明らかになるに従い、この方式は不可能であることが判明した。そして現在の六角形、キー方式が考え出された。

著者の立場からみて関心が強かったのは、ダクトの固有値解析である。3社とも Rayleigh 法を使って計算していた。その計算は水平、垂直2方向ににダクトの静的

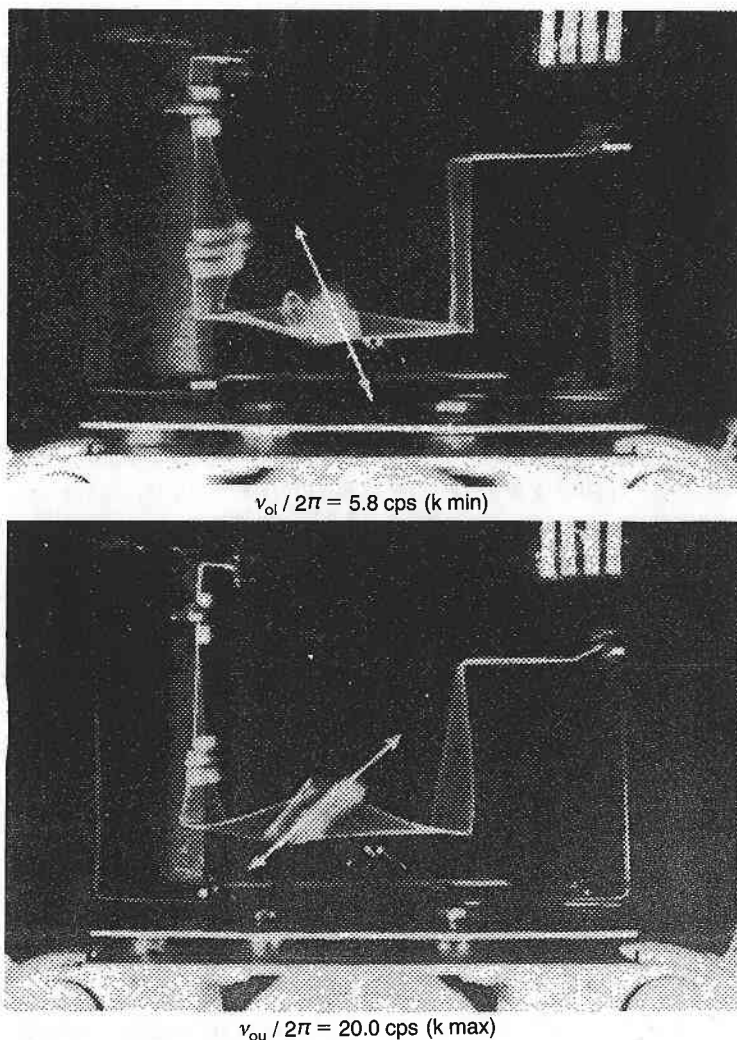


写真1 東海1号原子力発電所, ガスダクトの模型実験, 東京
大学工学部藤井研究室 喜山・重田氏(当時助手・技
官)による。

変形を求め、それによるエネルギーを求めて固有値を求めている。これについて疑義があることが討議され、東大工学部藤井研究室でかんたんな真鍮板モデルによる実験が行われ(写真1)、振動の主軸という概念が明確になり、Rayleigh法も、この2軸の方向を選んで適用しなければならないことがわかった。この振動主軸の概念については、実験が先か、Rayleigh法についての考察が先かは今の時点では明確に思い出せない。このダクト系については、減衰値、ダンパの装着のことが話題となったが、設計は前述のように静的震度法で行われた。

著者はこの間に、静的震度法と従来から学んで来た振動学との間にギャップのあることを認識し、機器、配管系のダイナミックスに興味を持ち、重点的に行うことに

なっている。グラファイト柱の安定性、ボール式中性子吸収体の落下特性について、モデルを作成し実験を行ったが、前者については $P-\delta$ 効果についての考察が不十分で精度の点からうまく実験ができず失敗に終わった。後者はボールが落下して行く過程で、正規分布状に拡がるなどの結果は得られたが、実物との相似性についてわからず役立つ結果は得られなかった。この二つについて、実物のモデル化という点での認識が不足だったと思っている。

1960年頃になり、配管の固有値解析のことが話題となった。それ以前から、径2mmの針金を用いたモデルを作り、加振器として、ペン書きレコーダのペンを使用して共振実験を行い、その振動モードの一般的性状につ

いてはかなりの知見を得ることが出来ていた。IBM704が、通産省の政策で輸入されることになり、それを使って計算をということになった。藤井教授の指導で当時大学院学生であった佐藤壽芳氏が奥村敦史氏（早大教授）の論文により遷移行列法で試算したところ、精度の維持などで多くの問題点があるものの、行列の固有値を解くのが、行列のサイズが一定なので比較的楽だと判断された。桁落ち対策などを考えて、日本アイ・ビー・エム社とプログラムを作成し、三菱原子力工業㈱に計算機が入るのを待って計算を開始し、1963年春までには解が出るようになった。各梁の長さが1:2:3のZ型梁を考え、針金モデルと比較したら、3桁は合うので驚いた。このプログラムは、DYNAPSと名付けられ、1963~64年の文部省在外研究員として著者がカルホルニヤ大学バークレ校に滞在中、数値的な実験を行い、帰国後、日本機械学会のグループで汎用プログラムとして完成し、東大、EC（ヨーロッパ経済共同体）のコンピュータセンタなどに入り、現在でもそれなりに使われている。

この間、品川火力発電所などの主蒸気管などの振動実験を行い、減衰定数の標準的な値の把握に努めた。この場合、当時の新設の発電所と、解体直前の千住火力発電所のそれでは傾向が異なったのは、後になって考えてみれば当然である。

1961年に原子力発電所安全基準第一次案が発表され、その第19条が耐震設計である。これをまとめるに当たって、秋野金次氏（現NUPEC）と動的解析の骨子を考え、現在のものの基本的体系を作り上げることができた。このとき、許容応力の体系で弾性限を超えることの合理性について、よく理解できなかったことを記憶している。前述のプログラム作成や、実験もこの基準案と平行して行われた。

1965年頃までに送り速度10 cm/sec 程度の地震波形の入手を目標に小規模な装置の開発を試みたが、これは成功しなかった。その後、文部省一般研究Bにより1991年

まで観測を続けた化学プラントモデルの設備を設置することができ、これは応答のゆらぎに関する重要なデータを得るきっかけとなった（写真2）。一方、前記日本機械学会の研究分科会の継続として、殻の固有値解析プログラム開発の実験部分と配管の多入力応答解析とを分担した。前者も殻体の非線形性が微小振幅でも現われるなど、いくつかのことを見出すことができたが、後者はホワイトノイズを基にした擬似地震波を使ったこともあり、応答のゆらぎの問題に直接触れることになった。清水信行氏（現いわき明星大教授）が、アナログ計算機によるシミュレーションおよび理論解を試み、いわゆるサンプリング効果で、変動係数（dispersion factor）が30%ぐらいになることが低減衰系ではあることを明らかにした。この値は、千葉実験所における自然地震による応答観測の結果ともオーダーとしては一致し、その後の確率論的危険度評価（PSA）などにも役立った。

1969年に第4回地震工学会議がチリのサンチャゴであり、1964年の新潟地震でのプラントの被害調査の結果を、前年1968年の十勝沖地震のこととともに発表した。到着便のおくれから、空港から会場に直行したが5分か10分の差で、開会式につづくよい条件で発表できなかったことを今でも残念に思う。しかし、産業施設の被害について、多くの人が関心を持つ動機になったことは、このとき、不規則振動論と地震応答解析が結びつくセッションがはじめて行われたこと、それに帰国したら安田講堂事件が起きていたこととともに印象が深い。その後、1971年にサフェルナンド地震が発生し、東京都の調査団の一員として危険物を担当し、原子力発電所の耐震設計から、その対象が拡大する動機となった。新潟地震当時から関心を持っていた、タンクのスロッシングに関することもその一つである。写真3はチリのコンコン地震（1961年）のもので、エレファントフット・バックリングのはじめて入手した記録である。1973年に神奈川県が高压ガス製造施設耐震設計指針を策定する作業をはじめたのが



写真2 千葉県実験所科学プラント自然地震応答観測モデル（1985年頃）、1971年~1990年のデータが主なもの、最初は一般研究Bによる施設が主体。



写真3 チリ・コンコン地震（1961年）におけるエレファントフット・バックリングの内面からの写真、コンコン製油所から武藤 清先生を経て入手した報告書による。

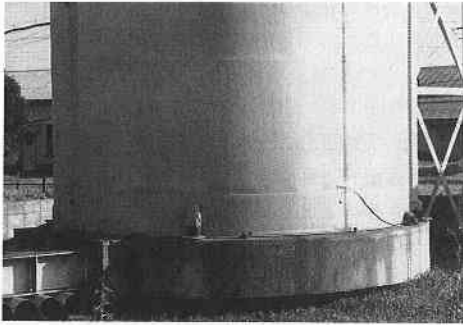


写真4 1980年9月の千葉県中部地震で生じた60 m³水タンク（肉厚1.9 mm）の座屈の状況、実際に見えるようになったのは、1980年代に続いた震度Ⅳクラス以上のいくつかの地震により変形が進んでからである。

きっかけで、その後1981年の通商産業省告示515号が完成するまで、この作業は続いた。タンクのスロッシングも液化ガス用貯槽ということで、その基準に含まれている。ただサンフェルナンド地震の水タンクで有名になったエレファントフット・バックリング（バルジング）は当初の予測は異なり、スロッシングによるものではないことが、多度津における実験（1983年、原子力工学試験センタ・多度津実験所、高压ガス保安協会による）などで、主として秋山教授（東大建築）の努力で明らかとなった。また、千葉実験所のモデル・タンクB（60m³・水）に1980年の千葉県中部地震で座屈を生じさせることに成功した（写真4）。しかし、スロッシングによる石油タンクの損傷・火災の問題は1964年から25年以上経った今でも完全に防止できる状況になっていない。

7. 1970年代から80年代にかけて、そして1990年

1971年の東京都防災会議による被害調査や、藤田教授（東大生研）の学位論文のことも多し、危険物や火災についてのことも関心を持ったが、研究としては大きな進展がなかった。電力網の損傷と安定問題なども同様である。告示515号の策定は、それまでの安全基準一次案、国際原子力機関（IAEA）の立地指針作成の作業とともに、指針とか基準の標準的なかたちや、またその構成の検証に計算機を使用することに興味を持った。この研究は堤氏（当時大学院・日本アイビーエム TRL）によってまとめられ、また告示を計算機プログラムで代行する試みは1981年以来、実際に運用されるようになった。しかし、理論的、とくに指針等の定量評価という点については、未だ最初意図したところに到達していない。

当時東工大におられた寺野先生と菅野教授（東工大計測）がはじめられた「あいまい研究会」に参加し、その後、生研などを会場とすることがあり、10年以上続いた。このベースになっている Fuzzy Set 理論は1987年の東京における IFSA の国際会議と仙台地下鉄の成功がきっか

けとなって爆発的に進展し、最初（1965年）から20年ぐらの期間がなんであったかと思われるくらいである。著者にとって、Fuzzy 理論にはいくつかの顔があるように思える。いま一般の関心となっていること以外に、人間の判断の本質と、そのエラーという点にかかわりがあるように見え、今盛んな実用面とは別な有用性が見出されればと努力しているが、その導入部はこの頃にあったと思われる。

1978年にアメリカの Diablo Canyon 原子力発電所のことが発端となって、原子力発電所の地震時危険度解析の非公開セミナーがベルリンで開催された。Seismic PRA と呼ばれたこの解析評価の手法は、1960年代に発端のある構造物の信頼性理論などと密接な関連がある。アメリカのカリフォルニア大、ローレンス・リバモア研究所（LLNL）が SSMRP というプロジェクトとして具体的な問題と関連付けてスタートさせた。著者は1977年の第4回の SMiRT（原子力炉構造力学学会）に、震源位置、マグニチュード、応答の不確定性を考えると、耐震設計を行っても、地震発生時の原子力発電所の損傷確率は以外に高いのではないかと指摘したことから、この会議に出席する機会を得た。このときの話題の中心は、地震学から、建築構造物の損傷が重点であり、機器や配管系については、基本的な考え方が示されたにすぎなかった。一方、国内では EDR 研究会と称して、電力共同研究に大学側が協力するかたちでこの関連の研究を開始した。その後、このグループは動的機器の耐震性の研究などへと展開し、アンカ・ボルトやポンプの動的応答の研究など、機械の他分野や、建築の分野の先生方の協力を得て新分野へと展開して行った。そして、現在、多度津実験所で行われている、非常用ジーゼル発電機、電子計算機などの機能的機器の耐震試験へと連なっている。

1970年に発行された日本電気協会の原子力発電所の耐震設計指針は、1984年に重要度分類・許容応力編を追加したが、70年版を改訂することとなり、2年余をかけて89年に完成した。この改訂に分科会長として当たった。前述のいくつかの基準類の策定の経験から、その構成を秩序だったものにすることに努力を払った。この全文は英文に翻訳されアメリカ・原子力規制委員会からの委託で、ブリック・ハーブン研究所（BNL）が幹事となって、両国の基準の比較検討が行われている。これが定量的に行うことができれば面白いと思われるが、当面は無理であろう。

1979年と81年に、アルゼンチンのコルドバ市の近くにある Empresa 発電所（CANDU 型・重水炉）の現地調査と設計のレビューを行った。現地調査と改善点の指摘などは効果のあるものであったが、設計のレビューは資料不足などもあり、その取りまとめは、その後のルーマニアの同型（Chernavoda）を IAEA として調査したと

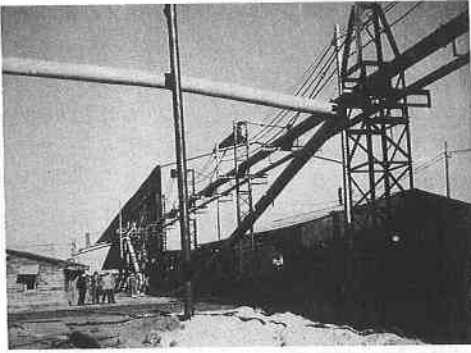


写真5 チリ・コンセプチオン所在、国有製鉄所高炉ガス配管が1960年のチリ地震に際し、配管ラックより落下した状況を示す写真（同所提供）。ガス配管としては無損傷で、1969年に訪問した当時、ラック上に戻してそのまま使用していた。

きの報告書（1990年）に比べ不十分であったと考えている。現地調査を行い、そこで得た知識をいかにわかり易い報告書に手早くまとめるかも一つの研究課題である。

配管の地震時の許容応力は新しい問題を含んでいる。その一つがラチエティングである。1960年代後半の日本電気協会が科学技術庁からの原子力平和利用委託研究費で受けた実験で偶然見出したことがきっかけで、この継続研究から、EDR 研究会などの成果を、第4回 SMiRT（1977年、ベルリン）で発表して以来、アメリカ P & P Council、NRC などの関心を惹くようになり、ここ数年大規模な実験が行われ、ASME の基準も改訂される方向になりつつある。このラチエティングは、熱応力に関係しては多くの研究があったが、地震時の現象としてとらえたのは著者が最初である。わが国では比較的関心は薄いが、通産告示501号などより S-N 曲線で見るとかなり危険側によっている。現在（1992年9月）も一部で実験を継続しているが、通常の状態では S₂地震でも問題はないが、配管支持物の損傷などと重なると100～2000回程度の繰返し歪でクラックが貫通する状況を実験で発生させ得る。地震許容応力の改訂は、日本でも今後大きな話題となるであろう。1969年にチリの Concépcion の製鉄所を訪問し、チリ地震（1960年）の際の写真（写真5）と現場を見、配管の粘りを実感して以来、配管の地震時許容応力はどうか迷うことも多かった。千葉実験所での実験をはじめ、防災科学技術研究所との共同研究は、EDR 研究会以来、石川島播磨重工業（株）の協力によるところが大きい。

1960年代から現在まで続いている配管に関連した仕事の一つは、定ピッチスパン法とよばれる設計法である。原子力燃料公社時代に端を発した東海燃料再処理プラントの数多い配管の耐震設計法を簡易に行うために開発したもので、セルモデルを使った実験（写真6）を行った。

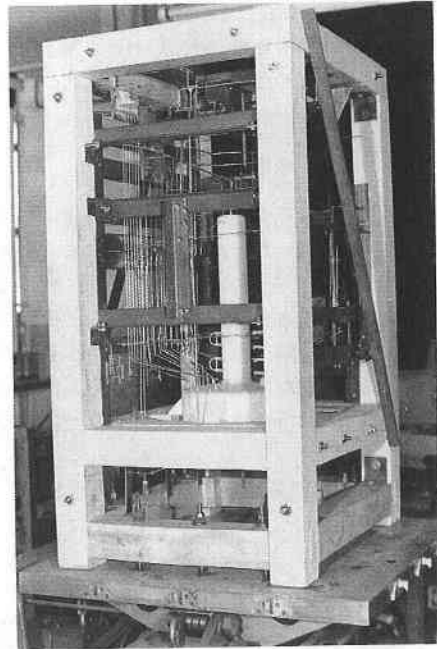


写真6 定ピッチスパン法で設計した燃料再処理プラントの配管振動特性確認試験（1960年代後半）。

これは現在の六ヶ所村の日本原子燃料サービス（株）のプラントにも採用され、小口径配管の衝突実験なども行われており、この結果も配管が損傷し難いという心証を得た一つの因子となっている。

1970年だったか、フランスで Saclay の研究所を訪れたとき、原子力発電所の基礎にゴムパッドとスライダを入れることについての説明を受けた。例として南アの Kôberg 発電所のことが挙がっていたように思う。その折の印象と発言は地震動の不確かさ、ゴムなどの劣化、工作精度だった。その後、1979年の第6回地震工学会議がイスタンブールで開かれたが、革命さわぎが金曜日（？）であった。20ほどの発表が予定されていたが、ほとんど発表者が来ず、著者は座長として当惑した。しかし、論文の大部分は、フランスのゴム系のものと、ドイツ・トルコ系の機械式コイルスプリングのものであり、結果としては16 mm の映画をやったりで、土曜日午前中両グループの宣伝戦で終った。このときは、日本からは1編の発表もなかったが、そのあとのサンフランシスコ（1986年）では激増し、フランスの知人からよくこのことをいわれる。

著者は現在でも、地震動の不確定性と、建築構造物のようなものと機械（とくにサーボ・制振）との調和という点に異和感があるが、1987年に開始された電力中央研究所の高速増殖炉（FBR）用の免震装置の開発研究には参加して来ており、とくに、その指針の整備と

PSA 的研究には関心を有している。免震装置はすでに実用化され、サーボ系を使用した、いわゆるアクティブな系もその段階に達しつつある。これらの系についての安全の概念の確立が急がれる。

8. 今後の歩む方向

耐震設計にしても、その他の機械力学の課題にしても、その最終の目的はシステムの安全性の確保にあると著者は考える。一方、安全を阻害する要因は、自然災害とヒューマン・エラーであろう。航空機事故など操縦の際のエラーがよくいわれるが、このようないわゆるオペレーションの際の問題だけでなく、設計から製作、検査、保守など、いたるところにヒューマン・エラーは生じる

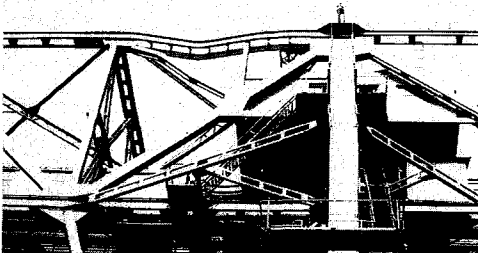


写真7 設計時のエラーに起因すると思われる鉤石トランスポートの部材座屈，十勝沖地震—1968年，室蘭製鉄所（当時富士製鉄(株)提供）

可能性がある。1970年代の終わりから、日本学術会議の安全工学研究連絡委員会に関係し、各方面の安全関係の方達と接するようになった。1975年に日本機械学会が主催で小さな国際会議を東京で開催した。HOPE シンポジウムと称するもので、かなり広い分野にわたるものであったが態勢が十分でなく、決して成功とはいえなかった。しかし著者が安全に関係するようになった一つの動機である。現在、著者は第15期の学術会議の会員として世話する立場にあり（委員長 上原陽一横浜国大教授）、先般、新たに安全制御小委員会（委員長 向殿政明明治大学教授）が発足した。安全性を確保するための基本的な概念を確立させたいからである。安全についても、決定論的対策と信頼性向上という確率論的評価と2通りあり、この両者はなかなか融合しない。この点について、今後考えて行きたい。

9. 最 後 に

今春の講演では、今後の発展を考えてのいくつかの課題について、考えていることを述べた。多くは直観的なものであり、紙に書くほど成熟したものではない。しかし、碍子の脆性破壊など触れなかったいくつかの問題が、なお残っている。前節で述べた安全ということに、常に原点を置いて考えて行きたい。

ここでペンを置いて、本来なにを書く積りだったかを

改めて考えてみた。多くの方から、著者の研究はそのバックグラウンドとすることが非常に幅広いと言われる。これはホメ言葉でも、その逆でもないと思うが、安全問題の統合には役立っている。そして、これは中学時代の交遊が役立っていることは確かである。しかし、自分の関心が広がったからか、先輩、友人の影響が強かったからか、よくわからない。そして、いろいろ手掛けても、まとめていないこと、報告書（論文）になっていないことも多い。最近論文にまとめるように努力しているが、後になってみると、アイディアのみが記されていて、完全なものになっていないことに気付く。読まれた方の新しい仕事のヒントになればと、言い訳をして済ませようという心が陰に潜んでいるようで、反省すべきと思うこともある。大学院入学からが研究生活とすれば、39年になるがその間の社会に対する寄与と、研究成果とは別の次元で考えなければ、この39年の年月が、無意味なものとなる可能性もあると感じている。

以上、読み返してみると、やって来た研究について、すべて述べたのではなく、かなりむらがあることを感じるが、この稿のタイトルとの関係もありそのようになった。また教育については述べなかったが、大学院での原子力機械工学特論の第1回の受講者8名の名簿を見ると5名までは大学の教官になっておられ、また前述のSMiRT-11の実行委員会で活躍した方の何名かが含まれているのに、研究室の整理をしていて気付き大変驚いた。最後の年は、出席者のサイン簿はなんと70名以上の名前が記されている。この講義の内容は現在の著者の安全面の研究に連なり、かつまた、安全工学に力点を置いている横浜国立大学に引き続き教官として勤務するようになったこととも連なっている。

ここに至るまで、実に多くの方々のお世話になり、かつ影響を受けた。文中では、指導教官であった藤井澄二先生（富山県立大学学長）と、あとは内容のオリジナリティに関連のある方々のみにとどめた。お名前を挙げなかった多くの方々、古くからの友人、家族その他に深く感謝する。

一昨1991年8月、東京で第11回国際原子力炉構造力学会議（SMiRT-11）が開催された。著者は、この会議の母体のIASMiRTの会長と実行委員会委員長ということで、会議の運営に当たった。原子力産業の置かれた厳しい環境にもかかわらず、1000名を超える参加者、しかも海外から40%を超える参加者があり盛況に終わった。組織委員会委員長の三島良績先生をはじめ、組織委員、実行委員、各部会、募金委員会などの委員長・委員、事務局（電力中央研究所）など約100名の方々のご尽力のたまものである。提案者としても、IASMiRT側の一員としても、本当に心から感謝していると述べて、この稿を終りたい。

(1992年10月4日受理)