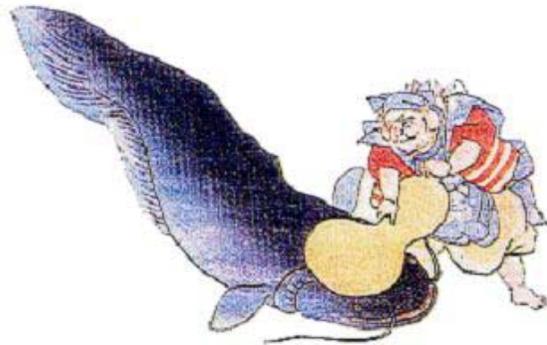


# 簡明な文章・シミュレーション ・機械の分野での人間工学

独立行政法人防災科学技術研究所 /  
財団法人地震予知総合研究振興会 /  
東京大学名誉教授

柴田 碧



## 簡明な文章・シミュレーション・機械の分野での人間工学

独立行政法人防災科学技術研究所 /  
財団法人地震予知総合研究振興会 /  
東京大学名誉教授 柴田 碧



名古屋近郊春日井市、小生郷里のお寺  
二重の塔は濃尾地震（1891）でも大きな被害がなかった（文中の法事のお寺とは異なる）。

### 簡明な報告書

工学を学び、使い、研究する者にとって、もっとも縁がうすいことは文学である。しかし、それと隣り合せのことに、わかりやすい文章表現ということがある。

昨夕（10月11日）、筑波のホテル（防災科技研はつくば市にある）である夕刊の“プロローグ”という欄を見かけた。内容は読まなかった。明け方目が覚めて、この原稿を書くこととともにもう一つのことが、ふっと思い浮かんだ。

数年前、父と母の17回忌を、秋に入った昨日のような好天の日に行った。その日からしばらく経って、夕べの新聞の“プロローグ”欄にその折のことが出ているということを知った。小生の兄弟の1人は文学系の研究者で、小説も書く。その秋のひとときをプロローグ欄に書いた文章を読んで、小生もそこに居たときのことが、このように書けるのかと俗な表現でいえば、目からウロコが落ちる思いであった。そこにいた小生の孫を指す代名詞の使い方、また瞬間的な情景のとらえ方、この二つに感心した。後者は読んでみれば小生にもありありと浮かぶ情景であったが、そこに書かれてなければ二度と思いつき出さなかったかも知れない。

ASMEにRice Lectureという記念講演がある。日米の関係の方々の方々の努力の結果、小生が機械工学でサンタンたる出来であった。その後、PVPのジャーナルにその稿を載せてもらったが、これも同様である。30年あまりの間の、ある分野の発表を書くのに、文章の

簡潔さに乏しく、くどくなって、今でも“何故”そんなになったのかと思う。

耐震の仕事、原子力の仕事をしていて、現在の大部分の時間は、大学に籍をおいていたときと同様、自分で文章を書いたり、他の方々の文章を通じて、研究内容を把握し、そして他の人々に理解して貰えるようにすることに費やされている。

このように、研究者として重要なことは如何に文章を簡明に書くかが、焦点である。

われわれと同年輩の方々は、学長のような職を通り越して、社会を動かすような地位につかれている方も多い。その方々の文章は個性があり、誰が書いたかはすぐわかるくらいである。しかし、その一方小生にとってその内容はわかり難いことが多い。簡潔に書かれていることは確かであるが、簡明とはいえない。恐らくは、小生が扱って来ていることが、工学での具体的な内容を書こうとして、こちらの頭がポリシーなどの抽象化に追いつけないからであろう。工学のレポートを判りやすく書くということと、政策・理念を述べることは別のことであり、ここでの論点は前にある。

文頭の“プロローグ”の話の彼は、工学の分野を目指したが、途中で文学部へ進み、そこで研究的な仕事を行って来ている。もう1人の義理の兄弟は工学の分野にいる。2人ともよく文を書く。また、もう1人は工学の実務的研究者であり、ときには図面がその成果である。3人の文章をいま思い起してみ、今迄述べて来たことを比べると、2人めの文章は面白いと思って読んでみると、ふっと理解仕難くなる。その仕事の性質上“理念”を中心としたところがあるからである。われわれ、機械工学の仕事は、いままで理念を論ずることはすくなかった。したがって、“簡明”ということを一に言うことができた。

しかし、小生の仕事の中心を耐震、原子力から進めて“安全”という分野に踏み込むと、“理念”を論ずることも多くなる。原子力関係では、“理念”にもとづくこと、“安全”を念頭に置きながら、“事実”つまり、実験の結果を具体的な面から出発して、単純化して（たとえば減衰定数など）直接設計に役立つよう記述して行かなければならない。ここによい報告書を書くことの難しさがあるのかと思う。

文章を書くことが、苦痛であった時期が長い間続いた。雑誌などから、解説の原稿を求められても、論文とか報告書の作成で手一杯でその他の文を書くことはほとんどお断りするある状況が続いた。

最近になって、やや書くことができるようになった。書くことのイメージが紙に向う前にできるようになったからである。古く、学位論文を書いていた頃も、今思い出してみると、イメージが先行し、そのための仕事は苦痛ではなかったようである。

いろいろな研究の報告書が、多くの研究者の手元で、数多く用意されて、関係の委員会などで討議されている。各々の研究者は楽しんで書いているのだろうか。結論のはっきりしない報告書を見るたびに、そのように思う。

### コンピュータと現象の理解・シミュレーション

ここで内容は変る。最近ではシリコン・エッジといわれるように計算機によるシミュレーションが研究方法の主体になりつつある。シミュレーションによって得られた結果が“現象”なのであると理解されるのが今日この頃である。本来の機械力学は、事象をよく見詰め、それによってなるべく正確な運動方程式（振動方程式）で記述し、その方程式の厳密解を求めることにあった。

先日亡くなられた山梨大学の前澤先生は晩年、病床におられる期間が長かったが、その間も、方程式を解くことを、常に考え、そして口にしておられたという。

計算機によるシミュレーションは、それまでの“方程式”を作り、その解を求めるという仕事を、“数値モデル”を作り、その解を時空間で直接描き出すということにした。

工学の実務的研究者である方の兄弟は、実験を行いそしてシミュレーションを行い、それに基づく結果を図面にして“もの”を作っていた。あるとき、それによって得た知見を組込んだシミュレータを作り、さらに実機を作った。操縦者に“このシミュレータに実機がよく似ている”といわれて、これは褒められたのかどうかと首をひねっていた。ロボットがあって、人がいて、“この人はこちらのロボットによく似ている”といわれたような感じがしたからかも知れない。

小生は最近10年ぐらい「人間工学」の分野での仕事もしている。“安全”を考えると、“安全”は、このようにあるべきであるということから、つまり枠をはめること、“規制”からはじまることが多い。規制によって定形化された安全についての理想の人があって、“実機がシミュレータによく似ている”ということと同じように、安全のためには人を定形化することを目標にしているのではないかとも思う。この問題はまた、後で書く。

## シミュレーションとその展開、二つの立場

シミュレーションということのもう一つの側面について書いてみる。大学院時代（1953～1958）頃は国鉄、私鉄とともに電車の速度の向上を目指していた。そのため、繰返し試験を行っていたが、100km/hを超えると、パンタグラフがとびはねて離線をくり返し、電力をとり込むことができず、したがって加速不能となって、110km/h以上での運転を行うことがむづかしかった。

あるとき、小生が乗っていた試運転電車が偶然に下り勾配で107km/hに達することができた。すると離線が減り、再び加速し、115km/hぐらいにまで、さらに速度を出すことができた。パンタグラフの上下運動はいわゆる共振現象的であった。（写真1）

このことは、一つの発見で、指導教官であった藤井澄二教授と討論した結果、架線がばね系となって、場所によりその値が周期的に変動するモデルに辿りついた。

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

という方程式に単純化することができた。この右辺が0になったのは有名なMathieuの方程式である。この方程式の解はMathieuの方程式の不安定な解と、右辺が $P_0$ とばね定数項の周期的変動による強制振動解が重なっている。強制振動解は、高次（強制振動に対し）解がある。したがって、主共振のほか副共振のピークが続くが、ところが各ピークのところなどは、Mathieuの不安定解があるため、共振曲線が存在しないで“ぶつ”切れたかたちの解析解が得られる（図1）。われわれは、これの方程式をパンタグラフ方程式と名付けた。



最近のパンタグラフ（JR西）

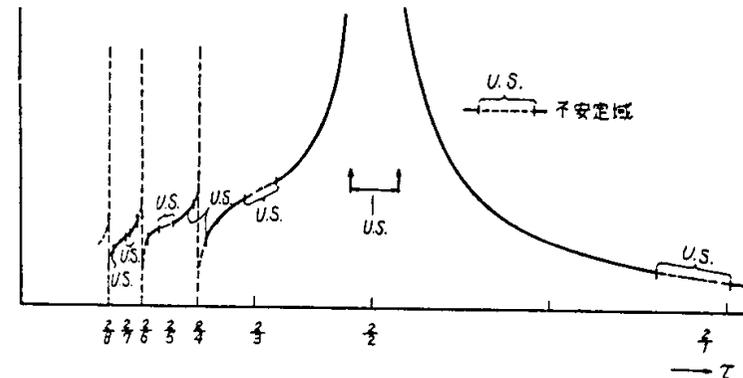


図1 パンタグラフ方程式の強制振動解模式図（学位論文から）

この解析解を実証するために、アナログ計算機を手製で作  
り、解を求めて解析解と比べることとした。今でいうシミュ  
レーションを行うことにした。ただ、実はこれは本当のシミュ  
レーションではないのである。

当時わが国には、既製品のアナログ計算機は全国で数台しか  
なかったが、東大生産研（当時千葉）の第一部森大五郎研究  
室で手製に成功していたのに勇気を得て、さらに簡単化した  
ものを製作した。運よくうまく行き基本的な計算が出来るよ  
うになった。これで、上述の式のパラメトリック励振を行っ  
たところ、強制振動解のピークと、不安定解の領域が重なっ  
ているので、短時間では出難いMathieuの不安定解がよく出  
て来て、予期したような“ぶつぶつ”切れた共振曲線が得られた（  
図2）。

現在は、アナログ計算機は使われていないが、MATLABという  
ソフトでこれと同じシミュレータを組むことができる。

今、もし、解析解について全く検討しないで、MATLABでこのパンタグラフ方程式を解こうとしたら、図2のよう  
なグラフから曲線を除いたドットだけの絵になり、しかもドットが存在しない（不安定で一定の解がない）場所  
もあり、多分全体の様態を把握することはできなかつたと思われる。

一方、

$$p = 2\pi \frac{V}{l}$$

と、架線を支持する柱と間隔と、電車の速度 $V$ で、加振（励振）振動数 $p$ は定まる。

この解の話は、架線の支持柱間隔が一定のところを、一定の速度 $V$ で電車が走るときのことである。現実には電  
車のスピードは変化し、支持柱は一様な間隔で建植されてはいない。したがって

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + k(\xi) \left\{ 1 - \cos 2\pi \frac{V(\xi)}{l(\xi)} t \right\} = P_0$$

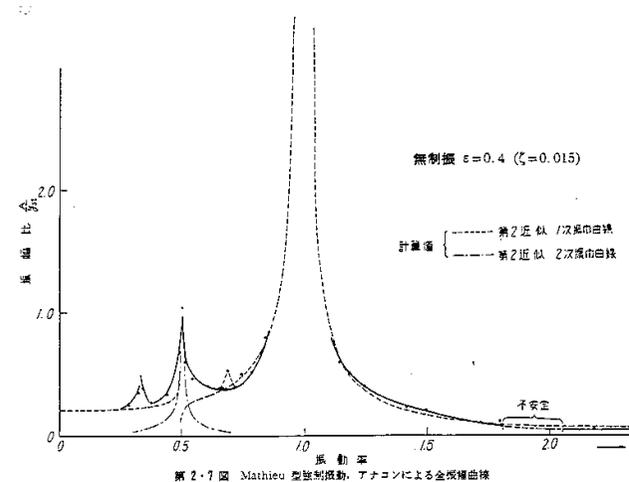


図2 パンタグラフ方程式のアナログ計算機による全振幅解  
（学位論文から）

と、電車が走っている場所  $\xi$  の関数となる。この方程式を、ある初期条件から出発して解くことはアナログ計算機やMATLABが得意とするかと思えるが、実は架線の支持柱の間隔が変化したり、電車の速度が変化したりすることを入れて行くためには、シミュレータ用のソフトが必要である。このようないろいろな架線状況のところを、速さを変えながら走って行くときのパンタグラフの挙動は解析解や、それをベースにした積分で求めることは、ほとんど不可能である。

前に述べた解析解をアナログ計算機で求めることは、本当の意味ではシミュレーションではない。このようなアナログ計算機やMATLABの使い方がシミュレーションの特徴である。

なお、計算を始めるに当って、設定した初期条件の影響は実際の系には減衰があるので、パンタグラフの挙動には何分かの後には消えてしまう。

パンタグラフ方程式を導いて、それに線路の条件を入れて解くこともシミュレーションであるが、実は、これも中途半端で長く続く架線とそこを走るパンタグラフの力学モデルを作って、その挙動を求めることもできる。これの方が、より本来のシミュレーションである。

現在の機械力学は、このようにある路線の力学的な姿をモデルで表し、そこを走る電車のパンタグラフのモデルと組み合せて、その挙動を予測することに重点が置かれている。しかし、現実に走る電車のパンタグラフの挙動をシミュレートし、それを推測することができても、その一般的な特性は、実物の挙動を現車の試験で、いくらデータを把握しても、解析解として得られる“ぶつぶつ”の共振曲線のように、特徴あるものとして把握することはできない。図2のドットだけを見て曲線を入れることはできない。

設計のための解析を目的として簡易モデルを作ることは重要である。大きなシミュレーション・モデルを使わないと、適切な設計ができないという考えは、なかなか魅力があるが、現実はどうだろうか。どのようなことが現実の世界で起きるであろうか、すっきりしたイメージを持つことが、重要なのであろう。ある種の系ではわずかな初期条件で解が大きく異なる。

### 崩壊、破壊の実験とシミュレーション

方程式に基づく力学のシミュレーションは、外からの乱れ、自由度が余り多くないことが条件にその系の固有の性質を見極めるために行なわれるものである。

しかし、非常に単純な系でもカオスは起る。“カオス”を複雑系の代名詞（あるいは、その逆）にすることがあるが、シ

ミュレーションの難しさと、それを事前予測に使うことの困難さが、ここにある。また実系を念頭に置いたシミュレータでも、僅なきっかけの差で解が異なる。実物とシミュレーションの類似性の問題の限界もここにある。

現在、小生の取組んでいる仕事に、「人間工学」と、「1200トンの3次元の震動台の建設」がある。震動台、*E-defense*は独立行政法人防災科学技術研究所のプロジェクトで、2005年の完成を目指しているが、震動台上で地震による構造物の崩壊実験を目指している。

震動台もコンピュータと別の次元のシミュレータの一種であるが、崩壊を目指すことは、力学としての方程式の解を求めることから、逸脱しており、そこでの実験結果は予測不能の事象の一つとなる。このように、応答から、一步踏み出すと偶然が入りこみ、力学の面でも必ずしも整然とした解が得られないことは、皆さんが知られるとおりである。

### 人間工学・スポーツ工学

人間工学の方の話題を移す。最近、機械力学の分野でスポーツ工学など人間が関与した研究を行う研究者が増加している。このことは好ましいことである。ただ本来の「人間工学」の研究者の世界とは、かなりのギャップがある。

本来の人間工学 (Ergonomics) では、

- (1) 人間の体力の限界を知るなど、作業環境に関する課題が挙げられる。この課題は、人体の負荷をどのようにしたら軽減できるかも含む。
- (2) 人間の心理的負担を中心とした労働に関する課題。
- (3) 労務管理に関する課題。

このうち、第2項は部外の小生などにとっては、精神的負担と同一の課題と考えられるが、研究に従事している当事者にとっては、かなり心理的負担と精神的負担は相互に異なった課題として写っているようである。



図3 独立行政法人防災科学技術研究所が兵庫県三木市に建設中の1200ton 3-D震動台*E-defense*完成図

以上の、三つのアプローチは労働科学をベースにした、労働負担の限度の確認と労働環境の改善という面をもった研究領域である。英国のErgonomicsという分野の線上にある。

Human Factor Engineeringというアメリカのアプローチは、軍事研究に端を発し、システムに組み込まれたかたちの人間が、システムの挙動にどのような影響を与えるかの議論が中心である。いわゆるhuman errorについても、基本的にはこの範疇に属するとされている。“安全”を確保するためには、人間を規範でしぼり、定形化してhuman errorを減少するようにするといった理念先行の、いい方によれば人間不在ともいえる考え方である。

### 機械工学における人間工学

機械力学をベースにした「人間工学」とくに「スポーツ工学」はこのいずれでもないところから出発していると小生は考えている。人間を力学モデルで記述し解を求めようとするものである。

しかし、この線で研究を進めて行くと単純な力学とは異なるのではないかという考えに行き当たる。「スポーツ工学」を例にとっても、ボールの打ち心地のような感性の面も出て来るし、また、スポーツにはエラーがつきもののようにいわれるが、そのエラーとはなにか、どのようなこともある。

機械力学をベースに人間工学の研究を進めるに当たって、純力学的なところから踏み出したくなる気持は当然であるが、その際に従来の人間工学の分野で、どのように研究を行って来ているかをよく知り、理解すべきである。

日本人間工学会の会員数は6000名を超している。また一昨年San DiegoであったHFES主催の世界人間工学国際会議の出席者は2000名を超えている。この分野での力学的因子を明確にして行くことは、われわれ機械工学を専門とする者の任務であるが、人間工学全体としては既に莫大な研究の積み上げがあることを忘れてはならない。

### おわりに

はじめは、三題ばなし的に思っていた本稿であるが、書き出すと、どんどん変質して、このようなことになった。要約すると、文章の順とは異なるが、

- (1) 機械力学にベースを置いた、人間の力学的な面での解析、分析は非常に重要である。
- (2) シミュレーションも、そのツールの一つであるが、いろいろ落とし穴もある。とくにシミュレーション、シミュレータの限界として安全にかかわりの深いキャットストロフがある。
- (3) 話は飛ぶが、このように、力学ですっきりした（筈の）解を得ることになれたわれわれにとって、その内容を文章（論文、報告書など）を簡明に書くことは重要であり、訓練が必要である。

という点が、小生の主張であり、気持である。

文章は簡明にといったが、この文自身簡明とはいえないし、終り（ここまで）読み続けられる方は、そうは多くないと覚悟している。

また、このような形式で文章を書いたのはじめてで、小生にはどのようにしたら皆様が読みやすいか見当がつかない。この点お許しいただきたい。



手で投げたテニス・ボールを打ったところを半図化したもの  
横浜国大、大学院工学研究院システムの創生部門  
高田研究室撮影図化

以上