

電気回路論とアナロジー

株式会社エヌエフ回路設計ブロック
 東京大学 名誉教授
 北森 俊行



電気回路論は工学の中でも非常によくてきた理論体系である。物理的な素子は厳密に言えば分布定数系であるが、それを集中定数系で近似、理想化した電気抵抗、キャパシタンス、インダクタンス、相互インダクタンスなどを接続してどんな特性や機能が現れるかを明らかにしていく、われわれが人工のシステムを構築するとき、部品を用意し、それを適切に組合わせていく、“要素と接続”というのはシステム構築の基本的なモデルである（生体は細胞の自己増殖と機能の分化という方式をとっていて、真似てみたい憧れもあるが、人工の世界ほどの可能性の広がりはない）。このモデルでは要素としてどんなものを考えるか、その要素についてどんな接続の仕方がありうるか、そして要素と接続でどのような機能が実現できるかを明らかにしていくことになる。

電気回路論では電気抵抗のみで線形直流回路網理論、キャパシタンス、インダクタンス、相互インダクタンスを加えて線形交流回路網理論、ジャイレータを加えて線形受動回路網理論、能動素子を加えて能動回路網理論へと世界が広がっていく。電気抵抗、キャパシタンス、インダクタンスからなる電気回路と質量、ばね、ダンパーからなる力学系との間のアナロジーについてはよく知られている。さらには流体系、熱系などにもアナロジーが成立つ。アナロジーは物理学的必然性がないように思われるが、類推によってわれわれの理解や発想を助けてくれるという意味で非常に重要である。あるいは電気回路論から一般回路論に拡張することで、よりコンパクトな理論でより広い範囲をカバーすることができるので、学習の経済につながる。学問や技術は日進月歩で、学ぶべきことは単調に増加するから、より少なく学んでより多くを知るための学習の経済への努力は重要である。

アナロジーは形式的なもののようなものであるから、見方によっていろいろ考えられる。電圧をかけると電流が流れる、力を加えると質量をもった物（以下単に質量と呼ぼう）が動く、という考え方に慣れているわれわれは力を電圧に、動き（速度）を電流に対応付けるアナロジーに違和感がない。このときはインダクタンスに質量（をもった要素）が、キャパシタンスにばねが、そして電気抵抗には線形な粘性抵抗が対応する。ところがこうするとインダクタンス、キャパシタンス、電気抵抗の並列接続が力学系ではばね、粘性抵抗、質量の直列接続に対応することになってしまう。これに対して、素子を支配する物理的關係に即して、二端子間の電位差に速度差を対応させ、二端子間を流れる電流に二端子間を引張ったり押込んだりする張力、圧縮力などの力を対応させると、直列とか並列とかいう素子のつながり方はうまく合ってくる。これは電位の端子

間の差、速度の差のように差だけが問題になる位差量と、端子間の素子を貫通する電流や張力のような(二端子間のどこの切り口で見ても同じ値になる)流通量という概念を認識することによってはっきり理解することができる。しかし接続するということを接続点では、電気では電位、力学では速度が等しい値になり、また電流あるいは力の代数和(ベクトル和)がゼロになるということを書くのだから、位差量、流通量という概念より、接続点で値が等しくなる“等値変数”、代数和(あるいはベクトル和)がゼロになる“ゼロ和変数”という概念の方がわかりやすいと思われる。

アナロジーに物理学的必然性はないから、それだけで類推を強行するのは危険である。電気抵抗、インダクタンス、キャパシタンス;ばね、ダンパー(粘性抵抗)は直列接続と並列接続ができて、たとえば電気抵抗の値を大きくもできるし、小さくもできる。ところが質量はどう接続しても質量が大きくなるつなぎ方しかできない。もし軽くなるつなぎ方があったらこの世の中はすっかり様相が変わってしまうであろう。荷物を沢山つなげばどんどん軽くなって楽に運べるようになる。空を飛ぶのも楽になろう。現実とは逆であって、工学はそのために一生懸命頑張ってきているのである。

直列接続と並列接続の二通りの接続の仕方があるのは二端子素子だからである。だから一通りのつなぎ方しかない質量は一端子と考えざるを得ない。だから電気回路の図と力学回路の図は同じにはならない。電気系では必ず閉じた回路ができるけれど、力学系では閉路を形成しない枝が含まれる。だから閉路方程式は必ずしも書けない。ニュートンの運動方程式を立てるときは各質量に着目し、その加速度に質量をかけたものがその質量に加わる力の総和に等しいと書く。これは回路論的には節点方程式を書いていることに他ならない。

電気回路論が豊富な内容を持っているので、それを利用するために質量に相当する二端子要素がつかれないかと考える人がいる。ケンブリッジ大学のM. C. Smith教授が2003年の計測自動制御学会学術講演会の特別講演でそのような素子を考案して利用する話をした。¹⁾ いろいろ考えられるようであるが、簡単にはフライホイールに加える慣性を一直線上に配置すればよい。これを教授は“イナーター”となづけている。二端子間に張力あるいは圧縮力をかけるとその力に比例した加速度で二端子間が伸びまたは縮まる。そしてこのイナーターを並列接続するとイナータンスが和になり、直列接続すると各イナータンスの逆数の和の逆数になる。すなわち値が減る。ただし質量はどちらも和になる。イナーターと質量は本質的に別物である。ところで、高橋秀俊教授は回路的なアナロジーを成立させるためにこのイナーターと同じものをすでに1957年に日本物理学会誌の連載記事「物理学汎論」に書いておられることを指摘しておこう。²⁾

熱容量も一端子要素であり、接続すれば熱容量は増える一方である。したがってこれは熱経済的には大敵で、いかに有効な熱エネルギーが目的外の熱容量に吸い取られないようにするか、工学の重要課題である。

“要素と接続”が人工のシステムの成立の基本的モデルだとすると、いろいろなシステムの構造や構築・設計を見通しよくしてくれるはずである。筆者はかつて、計測の種類も多数あり、方式によって姿の異なる数多くの計測システムを、どんな要素がどのように接続されているのか、そしてどんな計測学的機能が実現されているのか、解析を試みた。その過程で物理量の変換、感度(分解能)の向上、偶然誤差の低減、計測量以外の物理量、環境変数、未知パラメータの影響の消去、線形性の向上などの機能とそれに対応する構成要素と接続構造を明らかにできた。これらを総括的にみると、ひとつのデータを得るごとにひとつの関係式が成立し、条件を変えながら得られる関係式を連立させるという意味の接続構造があり、その連立

方程式を解くことによって計測量の値が求まるという構造ははっきりした。アナログ的に構築されていた計測システムが最近では測定データをできるだけ早い段階でデジタル演算装置に送り込んで処理するシステムに取って代わられつつあるが、上記の総合的構造は変わっていない。ついでに、計測のひとつの本質であるが、連立方程式を解くということは物理的世界を支配している因果律の逆の過程“果因過程”であって、物理的自然には起こりえない、人智によってのみ可能な過程であることを強調しておこう。³⁻⁵⁾

参考文献

- 1) M. C. Smith: The Inerter Concept and Its Application. Plenary Lecture at the Annual Conference of SICE, Fukui, Japan (August, 2003)
- 2) 高橋秀俊・藤村 靖: 物理学汎論 (VII), 日本物理学会誌, 第12巻, 第4号, 144-152 (1957)
- 3) 北森俊行: 計測と観測理論 (複数回の測定操作について), 計測と制御, 15, No. 1, 92-99 (1976)
- 4) 北森俊行: 計測系の機能と構造, 計測と制御, 19, No. 1, 27-32 (1980)
- 5) 北森俊行: 計測の本質と計測工学, 計測と制御, 26, No. 2, 145-152 (1987)

北森 俊行 Toshiyuki Kitamori

1933年生。1962年 東京大学大学院博士課程修了, 工学博士。1963年 慶応義塾大学助教授。

1965年 東京大学助教授, 1979年 同教授, 1994年 同名管教授, 法政大学教授, 2000-05年 タマティールオーロ
取締役会長, 2004年 興エヌエフ回路設計ブロック監査役, 1994-95年 計測自動制御学会会長, 1997-08年 応用科学
学会会長, 制御方式と設計理論, 計測システムの機能と構造などの研究に従事, 2010年度 計測自動制御学会功績賞受賞。