

前書き

この随筆集では、私が気になったことについて述べています。勝手にそう思っているだけです。真理とは異なった内容についても記述していると思います。一言で言いますと私が生涯かけて学んだ内容に対する私自身の感想です。

この随筆では、電気に関して重要と思われることについて主に述べています。いろいろな話が抜けている可能性もありますが、現場の電気関係技術者には貴重な内容だと思います。

まず最初に考える学問として一般的によく言われるのは数学だと思われがちです。しかし考える学問としては電気やその他の理論も同様だと思います。つまり電気理論においても、多数の定義や公理、公式、問に対する答えが存在しますが、それらを理解し覚えることも多少必要ですが、いちばん大切なことは考える力を伸ばすことだと思います。

本文を読みすすめるにつれその意味がわかってもらえると思いますが、電気理論では抵抗と容量とコイルそれと電源しか素子が存在しません。それにも関わらず未だに新しい発明発見が発表されています。なぜそのようなことが可能なのかというと、素子やその組み合わせである回路をどの様に解釈するかどの様に考えるかということによって新しい理論が生まれているということです。つまり電気理論は覚えることではなく、考えることが重要なのです。

電気に関する文献や特許は膨大な数存在し、今も増え続けています。これらの知識を身に付けないと回路設計はできないのでしょうか。いくらベテランと言われている回路設計者であっても全ての文献や特許を知っている人はいません。知っているのは大きな発明や発見などで名前が付いた知識だけです。必要なのは創造力です。この事が重要であることは電気を学んでいくことによってよりはっきりと理解できるでしょう。

数学とその他の学問との違いは、数学は厳密さが常に要求されます。厳密とは厳密が実証された後には未来永劫に渡って反論されることがないことだと思います。その他の学問は同様に厳密ではあるのですが、将来反論されることもあるため、近似の学問なのではないでしょうか

日本における電気に関して大きな問題があります。それは電気知識が誤った形で理解されていることです。一番大きな問題としてオームの法則があります。オームの法則は本文でも述べますが、電気の法則ではありません。電気の法則は電圧や電流が存在する場合には電圧は電圧だけ、電流は電流だけで考えなければなりません。電圧と電流の関係を述べているオームの法則は、電気の法則でなく物性の法則でありしかも近似式に過ぎません。電圧と電流の関係式は一般的には非線形になります。

一般的にすべての学問について言えることは「ソクラテスになれ、決して孔子になって

はいけない」ということです。ソクラテスは「正義」というテーマを生涯に渡って追求しました。孔子の言葉はさっと読んだだけでは一見正しいことのように思えますが、改めて本当に真理であるかと考えてみるとほとんどの言葉が正しくなるにはかなり多数の条件が必要であることがわかります。つまり殆どは再考する必要があるということです。よって「ソクラテスになれ、決して孔子になってはいけない」という言葉は自然科学を学ぶ人にとっては重要なことなのです。

目次

前書き	i
第 1 章 はじめに	1
1.1 学ぶための心得	1
1.2 間違いの修正	3
1.3 自然界の分類	5
第 2 章 日頃の出来事	9
2.1 歴史について	9
2.2 人	10
2.3 論語その他	12
2.4 現代の若者	12
2.5 倫理	13
第 3 章 学問について	15
3.1 学問への情熱	15
3.2 東洋と西洋の学問	16
3.3 学問の認識	17
3.4 学問を身につけるには	17
3.5 創造力とは	18
第 4 章 電気の簡単な歴史	21
4.1 1700 年	21
4.2 1800 年	22
4.3 1900 年	24
4.4 近世の話	27
4.5 物理学における電気	28
4.6 電磁気学	32
4.7 電気回路	33
4.8 発電と送電	34
4.9 風力発電	34
4.10 仕様	35
4.11 日常用語における電気	35
4.12 感電	36

4.13	自然界における電気現象	36
4.14	文化と電気	37
第 5 章	電気理論の分類	39
5.1	アナログとデジタル	39
5.2	機能による分類	40
5.3	信号の位相の数による分類	41
5.4	極の数による分類	42
5.5	線形・非線形による分類	42
5.6	機能回路を組み合わせる分類	42
5.7	電圧モード・電流モード	42
5.8	素子の変化による分類	43
第 6 章	電気基礎の疑問	47
6.1	電気の世界	47
6.2	電圧について	48
6.3	電流とは	48
6.4	電圧と電流の関係	49
6.5	電気におけるエネルギー	49
6.6	電源って何	50
第 7 章	電気理論の基礎的思考	51
7.1	東洋と西洋	51
7.2	日本の教育	52
7.3	日本の商品開発	53
第 8 章	回路について	55
8.1	アナログの体系	55
8.2	デジタルの体系	56
8.3	電気について	56
8.4	電気素子	57
8.5	回路の問題	59
8.6	解への路	59
8.7	エネルギーについて	63
第 9 章	信頼性の簡単な説明	67
9.1	信頼性工学基礎	67
9.2	信頼性試験	68
第 10 章	その他	71
10.1	その他の科学について	71
10.2	芸術について	71
10.3	未知のこと	74

第 11 章	主な文献の説明	75
11.1	電気回路理論	75
11.2	能動素子	76
11.3	電子回路理論	77
11.4	電磁気学	79
11.5	制御理論	79
11.6	帰還回路	79
11.7	雑音	80
11.8	フィルタ	81
11.9	電気に関連した数学	82
11.10	マイクロ波	82
11.11	論理学	83
11.12	信頼性	83
11.13	シミュレーション	83
第 12 章	芸術について	85
12.1	芸術の変遷	85
12.2	東洋の科学と芸術	86
12.3	東南アジアの科学と芸術	86
12.4	南北アメリカの科学と芸術	86
付録 A	数学公式集	87
A.1	微分・積分	87
A.2	ベクトル解析	89
A.3	行列式	91
A.4	三角関数	92
A.5	複素関数	93
A.6	双曲線関数	95
A.7	フーリエ解析	97
A.8	ラプラス変換	98
参考文献		101
索引		103

第 1 章

はじめに

何のためにこの章を書いたかと言う問いに対する回答や、自然界全体に対する疑問について自分なりの考えをまとめてあります。

このようなたぐいのテーマは簡単に述べようとすれば、いくらでも安易に述べる事が出来ると思います。しかし真剣に取り組むと、これほど難しいテーマはないような気がします。つまり自分が思っていることは一時限りであって翌朝には別の考えに至ってしまうことがあるのではないかと恐怖さえも感じます。何を頼りに述べるのか、非常に難しい問題です。何の根拠もない空理空論を述べているのではないか、そんな不安が常に脳裏をかすめるのです。実際その通りかもしれません。しかし何かを書きたい、残しておきたいという情熱は真実だと思います。

逆に何の役にも立たないかもしれません。その様に感じる人にとって時間と金の無駄遣いをさせているのかもしれません。そうならないように努力をしているつもりなので、ご容赦ください。

1.1 学ぶための心得

電気屋として必要な心構え などについて、ここでは述べています。

1.1.1 現代の方法を学ぶ

昔のことを知っておくことも大切なことです。しかし電子回路設計の場合、世の中は既に新しい方法へ入れ替わっているにもかかわらず、昔の方法に固執している人が数多くいます。

例えば次のような事柄です。

オームの法則 オームの法則は、物の性質を表現する近似式に過ぎないので、電気の法則ではありません。オームの法則は物理法則で、しかも微小信号に対する近似式にすぎません。

オームの法則はこの後述べる電圧と電流とを結びつける式ですが、一般的に比例関係にはなりません。むしろ非線形であることのほうが自然です。1980年以降では「電圧と電流の関係式」と呼ばれることが多いようです。

よって電気の問題を考える場合、物が存在しない場合には不要となります。例えば真空中においてオームの法則は出てきません。

電圧と電流 電圧と電流は明確に区別して扱わなければなりません。全く別の概念であると理解しないと、様々な場面で矛盾に陥ります。

電圧は電圧だけで回路の記述が可能です。電流も同様です。つまり回路の問題を記述するには電圧だけの式、あるいは電流だけの式が必要となります。

理想と現実 これについても混乱している人がいます。明確に分ける必要があります。

電気で扱う抵抗・容量・コイルは、大きさも形もない点に過ぎません。しかし点では何のことだか分かりませんので、様々な記号が用いられています。

なぜこのようなことを考えるか、それは式を簡単に扱えるようになるからです。物理の世界も同様です。比較的簡単に扱える質点の力学と複雑な剛体の力学・弾性体の力学・流体の力学に分かれていることと同じことです。ですから我々が日常扱っている抵抗・容量・コイルは質点の力学の相当することを忘れてはなりません。これらを区別する方法については文献 [5] または文献 [6] 等を参照してください。

四端子網 現代社会においてマイクロ波用回路を除いて、四端子網を用いて設計している人はいません。1980年頃から四端子網ではなく、デバイス・モデルを用いた設計へと変化しました。しかし未だに、使われなくなったはずの四端子網を用いた回路設計を行っている人がいます。不幸なことは高校や大学において未だに旧態然としたテキストによって教えられていることです。四端子網理論はマイクロ波の領域を扱う場合では必要です。

現代の回路設計はデバイス・モデルを用いて行われています。デバイス・モデルについて詳しく知りたい方は、次の著書を読んで下さい。文献 [1] 文献 [5]

1.1.2 何を学ぶか

電気の問題を解いていくには何を学んでいけばよいのでしょうか。電気電子の分類は、混沌としてきれいに体系付けられていません。しかしだからといって何もしない、出来ないと進歩がありません。「電気回路」「電子回路」とか書かれているテキストは、最低限理解しておく必要があります。

これらの内容を理解するためには、フーリエ解析やラプラス変換、微分積分、関数論なども平行して学んでいく必要があります。それからもう一つ重要な学問があります。それは現代の情報産業を支えている先程述べました、半導体のモデルです。

電気理論では回路合成という学問分野があります。デジタルの世界では、論理合成が当たり前のようになっていますが、アナログの世界ではまだまだ未発達としか言えません。計算機を用いて自動的に合成が出来るようになれば、素晴らしい世界が広がると思われます。しかしアナログの世界では、当分訪れることはないでしょう。

1.1.3 解析・合成の基本

1980年頃から回路設計はデバイス・モデルを元に行われるようになってきたことは既に述べました。四端子網を用いた回路設計は、デバイス・モデルが適用できない周波数の高い分野へと追いやられてしまっています。近年 SiGe などの新しいトランジスタが現れ、その傾向は益々強くなってきました。しかし現実の回路設計の大学などでは、未

だに古めかしい四端子網による設計法が行われているようです。四端子網による弊害として、次のようなことが考えられます。

1. 設計完了までに時間が掛かる
2. 出来た回路の信頼性が低い
3. 不良が発生しても原因特定が難しい
4. バラツキに対して弱い設計となり易い
5. 回路に余裕がないため不測の事態が起きやすい

これらの項目を全て解決した方法が、デバイス・モデルを用いた回路解析・合成となります。

1.1.4 個別半導体と集積回路

個別半導体と集積回路に使用されている素子は同じものですが、次のような違いがあります。

1. 集積回路は全ての素子が基盤と呼ばれる絶縁物あるいは半導体の上に形成される
2. 個別半導体は部品の交換が自由にできる
3. 集積回路は部品の交換ができない
4. 個別ハンド歌はペア性^{*1}がないが、集積回路では簡単にペア性を実現することが可能
5. 個別半導体では何度でも修正ができる
6. 集積回路では修正ができない

この様な性質があるため、集積回路ではペア性を利用して設計しなければならないし、ベテランの技術者ならば99%以上の歩留まり^{*2}を実現できます。アメリカではペア性に関する専門書が市販されていますので、より詳しくはそちらをご覧ください。

回路の設計解析については私が体系づけた「簡略モデル」というモデルがあります。このモデルを使えば回路図を眺めるだけで、電卓さえあれば簡単に回路設計解析を行うことが可能になります。

アマゾンから出版している「設計のための電気」および「アナログ回路設計法」を御覧ください。

1.2 間違いの修正

何が正しくて何が間違っているかを証明、つまり他人に伝えることの難しさを痛感しています。新しい理論は理論を発見した人にとって当たり前のことでしょうけれど、知らない人にとっては最初は奇異に感じる内容だからです。時が解決するといってしまうえば簡単ですが、理論を発見した人にとって待ってられない時間です。

芸術などと違って、電気の世界は証明ということが出来ますので、比較的楽なのかもしれませんが、それでも特殊相対理論のように、にわかには信じてもらえない理論が存在し

*1 お互いの素子を同様な性質を持つように製造すること

*2 良品数割の全体数のこと

ます。

その良い例として電気の世界では発振器の雑音のように、発振の周波数の直ぐ側の雑音は、非線形によって低周波における雑音が発振周波数の側の雑音を生じているという現象です。今でも非線形による奇妙な現象を説明することはかなりの説得力が必要になります。

1.2.1 考え続ける

最近思っていることの中に、仏陀や孔子になってはならないということがあります。これは彼らが考えることを途中で辞めてしまっているからです。つまり最後には、ほとんど抽象的な概念で断言してしまい、話をお仕舞いしているからです。

昔は様々な病気や災害に対する客観的な知識がありませんでした。今でも完全ではありませんが昔ほど病気や災害で人が亡くなることは少なくなりました。しかし昔はそのような知識が全く無いので、想像の世界による何か得たいのしれないことまたは言葉などに頼る以外方法がなく唯一の解決法でした。現代社会にあってはそうであってはいけないと思っています。

自然界は未知の分野が多数未だに存在しますが、見いだされた自然界の法則に忠実にしかも同じ結果をもたらすことが分かっています。例えば集積回路の設計において、現代では未知の分野をよく調査せずに量産することはありません。ある回路で99.99[%]以上の良品率を実現することが通常出来ますが、その良品率は繰り返し行われる生産においても必ず実現し続けることができます。現実を冷静に見つめることが大切なのです。

常に「本当にそう?」「他に考えられないの?」という疑問を持たねばならないのではないのでしょうか。ただ仏陀や孔子の言葉でお終いにしたからと言って何か不都合が生じるわけではありません。しかしヒンズー教と他の宗教との対立、儒教と他の思想との対立によって殺戮の歴史が生じてしまった過去の歴史事実を見ると、仏陀や孔子になってはならないという言葉は、自然を相手にする技術者には重要なことではないのでしょうか。

1.2.2 経験のまとめ

誰しも地球は、自分のために回って欲しいと願っていると思います。それはこの場所この時代に自分がいたことを、後世の人も含め伝えたいという思いを持っているからに他ならないと思います。その一つとして、自分が経験してきたことをまとめるという作業が存在するのではないのでしょうか。「歴史に名を刻む」という言葉は技術者冥利に尽きると思っています。

1.2.3 楽しさのため

自分の知識の整理、進歩のためにまとめておきたいという思いです。これは、そのことに集中できる喜びでもあります。人は何かに集中することによって充実感を味わうことが出来ます。このことは、中山報恩会^{*3}への論文の中でも書きました。その思いは、今でも変わっていません。同じ思いは思わぬところからも聞くことが出来ました。様々な賢人が

*3 中山製鋼による同人誌

同じことを言っていたのです。人は、忙しいときが一番幸せなんだ

1.3 自然界の分類

自然界全体を分類することは、非常に難しく、人知を越えた課題だと思います。しかしこの課題は、非常に重要な課題であって、今後解き明かしていく必要のある課題であると思います。

1.3.1 一つの簡単な分類

一つの分類方法というのは、過去の歴史において我々人類が身につけた方法です。

その分類とは、自然科学・宗教・音楽・社会科学・論理学などの分類方法です。これらの分類については、各分野において更に細かく分類されています。

1.3.2 自然界を評価する方法

自然界を評価するという試みがあり、その中に解析とか合成という方法が存在します。

自然界を評価するというのは、自然界を眺めたとき、その自然界はどの様に評価しあるいは解釈できるかということです。この手法は、解析とか合成という方法とは異なります。

解析とは、一つの問題に立ち向かったとき、その問題をもっと人類にとって自明なしかも簡単な内容で言い換えることであると考えられます。つまり例えば一つの方程式が与えられたとき、その方程式を解という別の式あるいは数値でもって表現することだと考えられます。具体的な例を示しますと、ある電気回路が与えられたとき、その回路はどのような動作をするかということを求めるのが解析です。

合成とは、何かある目的を実現するためには、どのような手段があるかということを探めようとする方法です。例えばある式あるいは数値を実現するには、どのような方程式が成立すればよいかという問題です。具体的な例として再び回路の問題を考えますと、ある動作を実現するためには、どのような回路形式が存在するかという問題を考えるのが合成という手法です。

以上の解析および合成と言うことに対して、評価という方法は、具体例として再び回路の問題を考えるとすると、一つの回路が存在するときその回路は何と解釈するかということです。より具体的な例として、次の回路を考えてみます。

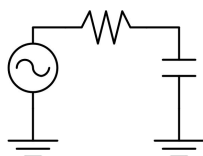


図 1.1 RC 回路

この回路を見て、何をやる回路だと皆さんは考えるでしょうか。ただ単純に RC で出来た低域通過フィルタであると考え人は、回路について素人であるといえます。しかし

この回路をどの領域で解釈するかということによって、次のように解釈することが出来ます。

時間領域 遅延回路

周波数領域全体 周波数領域全体で考えるならば、低域通過フィルタ

特性変化領域 周波数特性が変化する領域では、位相回転器

複素数領域 積分器

これ以外にも解釈できるかもしれませんが、同じ RC 回路であってもどのような立場で解釈あるいは評価するかということによって、様々な解釈が可能であるということが分かると思います。

ここでは回路のことを取り上げて考えましたが、この方法は全ての自然界において考えることが出来ます。つまり自然界は、解析や合成の問題だけではなく、評価あるいは解釈という方法も存在するということが分かると思います。

1.3.3 存在

前節では、評価もしくは解釈という分類について考えました。それ以外の分類方法として、「存在」という分類も考える必要があります。存在というのは、自然界の中にどのような真理が存在するかということです。どのような真理が存在するかという問いに対して、それを見いだす方法は慎重にかつ詳細に自然界を見つめること、および何らかの真理を見いだすために自然界に何らかの信号を送ってみることで、送った信号に対して今までに無い応答があった場合、そこに新しい真理が存在していることを示しています。その応答は、単一の真理に対する応答ばかりとは限りません。複数の真理が複雑に絡まった結果生じる応答かもしれません。大切なことは、単一の真理からの応答であれ複数の真理が複雑に絡まった結果からの応答であれそれらを解きほぐして一体どれが真理であるかということを見いだすことです。

どのような真理が存在するかということは、誰にも分かりません。しかし自然界の現象を見て、今までの理論では説明できないことがあれば、そこに必ず真理が存在していることとなります。自然界の現象を見ると言うこと自体、非常に困難な努力を必要とします。その努力の一つの目安として、自然現象を評価解釈し、解析し合成してみるのが大切でしょう。

一つ忘れてはならないことがあります。それは宗教学者が言うように例えば「無の境地を得ることが出来れば真理が見えてくる」というような根拠のない屁理屈です。我々はその様な自然界に対して、おごり高ぶった態度であってはなりません。自然に対して冷静に、素直に見つめる必要があります。そして自然に対して正面から対峙していかねばなりません。自然界の真理を見いだすのは、精神世界ではなく、冷徹に自然界を見つめる心構えで真理からの応答を素直な心で受け止める頭脳です。自然界に対して合理的な素直な心を持たない宗教学者には、いつまで経っても真理の姿は見えてきません。

自然界は、今もって偉大な存在です。未だにその全貌を明かそうとはしません。それほど自然界は、複雑怪奇なのです。我々はその全貌を明らかにしていかなければなりません。宗教学者のようにあるいは中国の諸子百家のように考えることを途中で辞めてはなりません。彼らは真理を追究する意志は、全くと言って良いほど持っていません。昔の権力者の

考えを今だもって忠実に守っているに過ぎません。しかし人間は、全く無知の状態から様々な学習によって成長していく限り、どうしても宗教や諸子百家の影響を必ず受けてしまいます。どの様にそこから脱却するか、難しい問題です。キリストやモハメッド、仏陀などの幼い考えはもはや必要ありません。彼らから何も得るものは無いからです。

第2章

日頃の出来事

日頃思うこと、とりとめもなくまとめた文章。何か役に立つとは、あまり思えません。

2.1 歴史について

最近色々なことに会うようになってかどろは分かりませんが、自分なりの歴史観が、変化してきたように思います。それらのことについて、雑多なことではありますが書きつづっていきます。

2.1.1 今と昔

思うに今と昔では、何か違いがあるのだろうか。「ソクラテスの弁明」を読んで、ソクラテスが深い思考力を持った人物であることはよく分かります。このような人物が、紀元前の時代に生存していたことは、その他の人々も現代と変わらない思考力を持っていたに違いないと想像させます。ただ違うのは、その時代の神と国家に対する重きの置き方が違うだけのように思えます。もしソクラテスが現代に生きていたならば、その当時と同様に偉大な哲学者？ になっていることでしょうか。要するにソクラテスの時代と現代とでは、人の思考能力はほとんど変化していないということではないでしょうか。

しかし多くの書物や、過去の人々の言動が忘れ去られているため、同じことを再び繰り返しているようなところがあります。現代は、情報社会と言われています。この過去との違いが、古代とは違うということなのでしょう。

2.1.2 天保の飢饉

これもNHKの番組から聞いた話ですが、二宮尊徳が住んでいた地域では、二宮尊徳の功績により餓死者はゼロであったとの内容でした。NHKの番組は、二宮尊徳の功績をたたえる内容でしたが、そのことよりも非常に印象に残ったことがあります。つまり二宮尊徳が貢献した地域では餓死者はゼロであったが、その他では何万人もの死者が出たということです。そして二宮尊徳が餓死者をゼロにしたその対策というのは、裕福な商人からお金を募ってそのお金で米を買い貧しい人々を救済したということです。つまり天保の飢饉というのは、完全に人災だったということです。そこから想像するに、日本において過去に何度も飢饉が訪れていますが、それらは全て人災だったのではないのでしょうか。確かに収穫がゼロ近くにはなったのでしょうか。しかし人類が死に絶えてしまうほど収穫が無

なくなったことは無いのではないのでしょうか。飢饉と言ってもある町や村が消滅してしまったことはあるのでしょうか。もし消滅してしまっていれば、確かに飢饉なのでしょうけれど、もし過去において消滅した所が無いとすると、全て人災であったという気がします。要するに全体を取り仕切る実力者が無能だったからに他なりません。歴史を学んだとき、昔は何度も飢饉があって、何万人もの死者が出た。と教わりはしましたが、これらの歴史は、単に上辺だけであるような気がします。つまり悪いのはおてんとう様であって、全ての人間は善良であったと思わせるような歴史教科書だった気がします。そこに多くの非情な人々がいたにも関わらず、そのことについてはいっさい述べていない歴史教科書など意味があるのでしょうか。

2.1.3 各地のお殿様

先日甲州の武田信玄の菩提寺に行って来ました。その前から少し疑問に思っていたことがあります。武田信玄って本当に立派な人なの。また各地のお殿様ってほんとに偉いのかと言う疑問です。つまりどういうことかと言いますと、単に地方の大將であって、昔の山賊や現代のやくざと同じではないかと言うことです。親分子分が、殿様家来と言っているだけではないのでしょうか。山賊ややくざの世界にも掟があるし、殿様家来にも家訓とか何とか条があるわけですから、ただ単に規模が少し違うだけなのではないのでしょうか。武田信玄公と言っているけど、武田信玄親分と言っていないだけの気がします。清水の次郎長は親分ですけど、清水の次郎長公とはなぜ言わないのでしょうか。考えている内に分からなくなるのではないのでしょうか。武田信玄は、風林火山の旗を掲げ、戦いに強かっただけですが、清水の次郎長は、官軍に破れた幕府の水軍の死体を官軍の脅しにも負けず立派に葬ったし、日本で初めて英語の塾を開催して、後世の学問に貢献したりしています。さてどちらが立派なのでしょう。お金持ちで社会に何の貢献もしなかった人それとも貧乏人で社会貢献をし、人材育成に励んだ人????

2.2 人

人には様々な考えに人がいるものです。共通して言えることは、人それぞれ自分中心に物事を考えていると言うことです。他人に迷惑をかけているにもかかわらず、全く認識がない人は、多いようです。これはいったいどの様にして作られた性格なのでしょう。一つの答えとして、真実がどれなのか明確でないと言うことがあります。つまりある人が見ると人道に反するあるいは道徳的に好ましくないと思っている事柄も別の人にとっては、取るに足らないことが多く存在し、どちらの主張が正しいことなのか判断できないためです。

もう一つは、地位が上の人が出たことは必ず正しいと錯覚してしまう人が多数いることです。物事が正しいことなのかあるいは間違ったことなのかを判断する方法はあるのでしょうか。これについては、昔から良く悩みました。多くの人は、現在自分が置かれている状況、過去の経験から判断しています。昔正しい判断を行うには、自然における真理を基本にすべきではないかと考えました。確かにそれは当たっているとは思いますが、二つの問題が存在することを痛感しています。一つは、真理として分かっていることがあまり多くはないことです。もう一つは、真理を伝えているにもかかわらず、それを聞いて

いる人が真理だとは理解していない場合が多いということです。真理が少ないのは、これから徐々に増えてくるでしょうし、向き合った自然の中で解決していけばすむように思われます。しかし真理と気が付かない人を納得させるには、どの様にすればよいのでしょうか。これは難しい問題です。また世の中にそのような人は数多くというか、ほとんどの人がそうだと思います。私も含めて。これに関連して、正義は勝つという言葉があります。しかしよく考えてみると、正義とは何でしょうか。正義なんてあるのでしょうか。よく言われる言葉の中に、一人二人を殺せば殺人だが、何万何千の人を殺すと英雄だという言葉があります。正義の名の下に行えば英雄になれるということなのでしょう。

世界中で、太古の昔から様々な政権が現れては消えていきました。政権の移り変わりのとき、倒す方は、正義の名において戦ったのだと思います。倒される方は、現状維持をし平和を継続するために戦ったのだと思います。もし倒される方が、自分たちの行為を正義に反する行為だと思っていたら戦うことをしなかったのではないのでしょうか。一例として、明治が変わるとき、幕府軍は単に自分たちの利権のために戦ったのでしょうか。白虎隊は、悪いことをしていると思って戦ったのでしょうか。そのようなことは、決してないと思います。また上からの命令に逆らえなかったからだけなのでしょう。それも違うと思います。お互い自分の行為が正しいと信じて戦ったのだと思います。勸善懲悪や正義の戦いなんて元々無いような気がします。こうして過去の歴史を振り返ってみますと、昔ほど一握りの権力者のために、言いくるめられた戦いの歴史であった気がしてなりません。つまり実際に戦った人々は、自分が正しい、正義の行為だと信じていたのではないのでしょうか。

2.2.1 性格

人にはそれぞれ、その人の性格があります。この性格はいったいどこから出てくるのでしょうか。三つ子の魂百までと言う言葉がありますが、九割方当たっている気がします。残りの一割は、その後の教育に依存しているように感じます。それでは三つ子の魂は、どこから生じているのでしょうか。遺伝、確かにそれは大きいと思います。

この九割と一割とでは、人の性格に与える影響としてどちらの影響が大きいのでしょうか。これも人それぞれのように思えます。大きく性格が変化する人、そうでない人そんな人は確かにいるように感じます。感じるというのは、これらのことを調べる術がないからです。よって直感に頼らざるを得ません。しかし直感というのは、当たっているのか外れているのか全く分からないところですので、今まで述べた事柄は、全て嘘かもしれせん。重要な事柄とは思いますが、直感に頼らざるを得ないというのは、なんともはや。

現時点で（あるいは現代の世の中で）このようなことは、考える以前の状態なのでしょう。

前にも考えましたが、その時点でへその曲がった人、意地悪な人、笑い上戸の人、泣き上戸の人色々な人がいることは確かです。これらの人は、本人自身が他人とはどう違うのかということについてしっかりと認識していないことは確かなようです。よく自分自身を良く見つめると他人からも自分でもそう思うことがみんな良くあると思います。この自分を見つめるといのは、実際問題として可能なのでしょうか。自分を見つめる人が自分であるわけですから、当然自分が思うようにしか思えないのではないのでしょうか。では他

人に聞いた場合はどうでしょう。これも自分のある一面から見た自分を語ってくれるだけに過ぎないのではないのでしょうか。要するにどの様な観点から見ても、本当の自分というのは分からないのではないのでしょうか。しかし自分のある部分にしろ、自分で考える場合においても、他人から言われる場合にしろある一部分の自分を示していることは間違いのないのでしょうか。全てを知ると言うことではなく、ほんの一部であっても自分が分かると言うことは、重要なことではないのでしょうか。そのためには、まず自分で自分を見つめ、他人の意見を聞き、そうして自分自身を理解していくその一步一步のステップが重要なのだと思います。もっとも全く自分を見つめようとしなくてまた他人の意見に決して耳を貸さない人も多いのは事実ですが、その人はその人の中で完結しているので、そのままが良いのかもしれませんが。しかし他人に迷惑をかけるのだけはよしてもらいたいものです。その認識も持たない人には、どう対処すればよいのかというと、あとは大衆の力に頼る、法律に則って対処するのが一番なのでしょうね。ただ法律は、人間が決めたことだし、全てについて述べていないのでほとんど無力ではあります。

2.3 論語その他

私は、論語が嫌いです。その理由は、考えが途中で止まっているからです。何となく雰囲気的に正しそうな感じがするところで、それから先に進んでいかないからです。

朋あり、遠方より来る、また楽しからずや

友であっても、相手に依りますよね。嫌な友であれば楽しいはずはありません。このようなことも有るには有るでしょうが、真実ではありませんよね。論語は全てこの様な中途半端な言葉に終始して、それから先がないのであまり読む気にはなりません。また論語以外の孫子や墨子などが現れたのも、論語の曖昧さが原因なのだと思います。これらの諸子もまた同様に議論を途中で止めていますけど。

それに比べて西洋の哲学は、とことん追求していくので好きです。ただ結論が出ていないこともあるし、昔の哲学書は未知の世界が多いわけですから間違った結論も多数存在しています。しかし論語のように考えることを止めてしまうことはありません。

こうやってしまいますと論語は悪くて、西洋哲学だけが良いように聞こえるかもしれませんが。それは違います。先程も述べましたように、哲学は完成されているわけではありません。未だ進歩の途中に過ぎません。論語にあって哲学にないものもあります。特に人の心の部分などです。このような事柄については、今から研究が進んでいくのでしょうか。

2.4 現代の若者

「現代の若者は、無気力、無関心・・・」と言っている人がいるようです。しかし私の感じでは、今も昔も変わらない気がします。若者もそうだし、年寄りも同じ。昔の若者も無気力な連中は居たし、元気な連中は居た。また「現代の若者は、・・・」と言っていた年寄りも居た。「現代の・・・」と言っている年寄りが居ること自体何の進歩もない年寄りだと思ってしまった。過去と現代とで大きく異なっているのは、「若者が・・・」などと言うことではなく、みんな大学へ行き、大学の質が落ちている ことではないのでしょうか。昔だったらとても大学生とは言えない連中が大学生になっている、そんな気がします。そ

のような連中に時間と金を掛けても、時間と金を掛けない場合と何か違いがあるのでしょうか。もっともそれで生活している人がいるわけだから、役に立っていると言えばそうかもしれない。ただ社会的な、つまり経済や文化に大して何か貢献があるとは決して思えません。無駄な浪費が許されると言うことは、それだけ世の中が豊かになった証拠かもしれませんね。

会社組織だって似たようなものでしょう。優れた人物が出世しているのではなく、上司の機嫌を取ることが旨く、自分より上になりそうな人物の足をいかに旨く引っ張るかにたけた人物が出世するのであって、経営能力や技術能力が評価されるわけではありません。もっとも欧米の社会では、通用しませんけど。欧米では、経営能力や技術力が重要であり、単にごまを挿ったり足を引っ張ってもその人物は評価されません。それに対して日本では、MBA や IEEE フェローは、評価の対象にはなりません。また特許なども大した評価にはつながりません。

このような現象は、やはり一般大衆の思考力が高まらない限り無くならないことだと思います。やはり日本人独特のものの考え方、感じ方が残っている限りなくならないのでしょうね。

日本人独特のものの考え方というのは、考える途中で考えることを止めてしまうことです。感じ方とは、考える途中であっても納得してしまうことです。逆に納得しない場合には、しつこいと相手に思われてしまうことを意味しています。よってそう思われたいためには、考えることを途中で止めること、そこで納得することが大切となります。

2.5 倫理

なぜかしら国では倫理について講習会を盛んに開いている。しかし倫理は、全く人為的な事柄であって、その時の人々が、「これは倫理的に悪いことだ」と言えば悪いことだし、「これは倫理的に良いことだ」と言えば良いことでしょう。

極端な場合を考えてみます。「人を殺すことは倫理的に悪いことでしょうか」現代の多くの人は「悪いことだ」と答えるでしょう。しかし江戸時代を考えても、親の敵で人を殺すことは立派なことでした。むしろそうしない人は臆病者だとか卑怯者だとかさげすまれていました。これは日本に限らず世界中でほとんどの人によって支持されていた考えです。しかし当時であっても肉親を殺すことは、禁じられていました。つまり人を殺すということ自体は、良いことでも悪いことでもなく、その当時の人々がどの様に思うかということに関わっています。人間の社会を離れて蜘蛛の社会を見てみますとある種の蜘蛛は、子供が親蜘蛛を食料としています。まさに肉親とかそういった区別は、蜘蛛の世界には存在しないわけです。おそらく人間の世界においても、太古の昔には人が人を食べて生存してきたのだと思われます。

この例は極端な例ではありますが、倫理と言うこと自体人間が決めたことであり、内容はその時、その時代のその場所によって異なってくると考えられます。

このようなことから、一つ一つの事例を取り上げて、良いことであるかあるいは悪いことであるか判断していく必要があります。このとき役に立つことがあります。それは犯罪という法によって定められた規則です。一つ一つの事例を考える場合、犯罪であるかどうかを考慮することによって、ひじょうに多くの事例が犯罪という範疇に入れることが可能となります。そうすれば改めて倫理的な判断をしなければならない事例は、極端に少な

くなると考えられます。

判断をしなければならない事例は、山のように考えられます。また犯罪と指定している事例も山のようにあります。民法、商法、行政法、著作権法、特許法・・・数え切れないほどの事例が取り上げられており、しかも日々追加修正されています。法と名の付いているもの以外、マナーなども考慮していかねばなりません。それらの犯罪とは呼ばれていない事柄も、いつ犯罪の仲間入りをするか予断を許しません。その良い例が、セクシャル・ハラスメントではないでしょうか。

倫理という問題を真剣に考え解決するならば、とにかく気の遠くなるほどの事例について考え、解決する必要があるようです。

第3章

学問について

学問は、おそらく人類が生まれたと同時に始まったのだらうと思います。そこで私なりに、学問についてまとめてみたいと思い立ちました。「学問ということについて考えてみたい」そう思ってここにまとめていくことにします。

3.1 学問への情熱

学問に対する人類の情熱には様々な原因が考えられます。このことについて考えてみましょう。

3.1.1 未知の世界への探求

学問への情熱と言っても、様々な要因が考えられます。真っ先に思いつくことは、とにかく未知の世界を知ることが面白いということではないでしょうか。なぜ未知の世界を知ることが面白いのか、それはおそらく誰にも答えられないことなのかもしれません。分かれば分かるほど、さらに多くの分からないことが出てくる。それほど自然は、奥の深い内容を含んでいると思います。まさに永遠のテーマなのでしょう。

日頃ぼんやりと考えていては、何も気付かないことですが、一つのことに対して「それは何で・・・」と考え始めるとなかなか結論が出てきません。次から次へと、分からないことが出てきます。

このような状態から、まず始めに何から出発して良いのか分からなくなってきました。一番基本となるのは、一体なんだろう。こう考えることも、さらに基本が何であるかということをつ分からなくしてしまいます。

古典力学を考えてみます。ニュートン方程式が、力学の基本であると考えられ、多くの定理がその中から見いだされました。そして美しい理論が、構築されました。しかし基礎であると思われていたニュートン力学が、量子や相対理論の発見からもろくも崩れ去ってしまいました。今では基礎の理論を見つけようと、世界中の科学者が一生懸命努力をしています。しかし次から次へと新しい理論が出てきてなかなか本質に到達するまでにはなっていません。要するに力学の世界においても、基礎、基本は何であるか分からないのが現実の姿です。それだけ自然界は複雑であると言ってしまえばおしまいです、逆にそれだけ面白いということになります。

このような事情は、芸術の世界でも同じことだだと思います。今までに繰り返し出てきた

ような状況や音楽、絵画では人を魅了することは難しく、何か新しい内容がなければ大衆を感動させることは出来ません。これらは、自然を探求することと違って、人間の心の問題でしょうけれど、次から次へと新しい感動作品が出て来るという事実は、たとえ心の問題であっても、人を感動させるには、新しい事実が必要であることを物語っていると思います。

3.2 東洋と西洋の学問

東洋と西洋においては、学問のあり方について大きな違いが存在しているように思えます。様々な点でその違いが見られるようです。自然界を探求するという事柄についてもかなりの違いが見られます。

3.2.1 東洋西洋の違いの根本

代表的なこととして東洋における孔子やその他の諸子百家と西洋におけるソクラテス、プラトン、アリストテレスやその他のギリシャ哲学者を考えてみます。東洋における全ての学問は、一見正しいことを主張しているかのような印象を受けます。しかし「本当に正しいの」と改めて自己に問うてみると彼らが正しいと主張している内容は、様々な条件があって初めて正しいと言えるだけであり、かなりの部分正しいこととは言えない内容が非常に多く存在します。

それに対して西洋のいわゆる哲学と称している内容は、必ずしも結論が出ないことも多いのですが、新しい問題提起として述べられており、誰しもが正しいと主張しない限り正しいとは言っていません。

このように東洋と西洋とでは、基本的に自然界に向かう姿勢が異なります。

3.2.2 知識の継承の違い

東洋と西洋では自然界の解釈の違いの他、得られた結果を後世に伝えていき、さらに発展させるという点において大きな違いが存在しているようです。

東洋においては、絶対に正しいと言えない知識であるため、諸子百家のように簡単に他の学者によって異なった主張が出てきます。

また失われても後世に大きな影響が出ないため焚書坑儒のようなことが発生しやすいことになってしまいます。

知識継承について、特に日本の場合を考えてみると、日本においては免許皆伝として一部の人にしか伝えず、蔵の奥深くにしまうかもしくは神社の中に宝物として納められほとんどの人の目に付かない状態としてしまいます。そうする方が島国である日本にとっては、一部の人に多大の利益をもたらすからなのでしょう。更に新しい流派が出て、再度何かを構築しても島国ということで問題が出なかったのでしょう。

それに対して諸外国では、弟子を集め多くの人に知らしめていく方が利益が出たのだと思います。その結果西洋では、古代の学問が今でも残り、一般の人がたやすく閲覧が可能となっています。

3.3 学問の認識

全ての社会生活および家庭での生活は、学問の根源に違いありません。ただそれらの生活と学問の違いは、前者が特に腰を据えて認識されるわけでも、まじめに考えるなどということは無く、それに比べて学問は細かく体系付け、キチンと整理されているという違いだけではないでしょうか。言葉を変えて言えば、学問とは世の中の知識全てを整理整頓したものということです。しかも整理整頓することによって今まで誰も気がつかなかったことが見えてくるということです。それによってさらに今まで未知の世界であったことが次第に明らかになってきます。逆にあまりにも複雑であることが分かり、躊躇さえ起こすことも出てきます。体系付けられていなければ、それは単に経験とか勘と呼ばれるものであり、体系付けられ整理整頓されることにより学問と呼ばれることになるのではないのでしょうか。つまり同じ対象でありながら一方では経験あるいは勘と呼ばれ、もう一方では学問と呼ばれるということです。

では学問とするために体系付け、整理整頓するにはどうすれば良いのでしょうか。過去の例で見ると、似通った事例を集め、それに名前をつけていく手段が通常行われるようです。そして次々に現れる事例をこれらの分類の中に仕分けしていきます。全ての事例がこれら分類の範疇に入る 場合については、大きな問題の発生は生じませんが、これらの範疇に入らない事例が生じてきた場合には、元の分類を見直さなければならない事態も発生してきます。しかしこのような規制の範疇に入らないような事例が生じてきたときには、そこに新しい発見が埋もれている場合が多いようです。いろいろな学問が古典理論と現代理論とに分かれてきているのは、このような例でしょう。

また体系付けの中には、もともと適切でない体系付けも存在します。そのような場合には新しく体系付けをしなおさなければなりません。このような場合の分かりやすい例としては天動説、地動説の話が良い のかもしれません。このような体系付け の変更の場合には、先の話ほど大きな新しい発見は生じないようです。しかし新しい発見が無ければ、このようなことは生じないわけでして、ここにも今まで人類が味わったことの無い未知の分野が存在していることとなります。

そこで我々が行わなければならないことは、常に体系を眺めそれが適切であるかどうかを監視し、漏れや抜けが無いかを注意深く眺めることです。そうすることによって、いったい何が本質であるか、新しい事実は何か、未知の事実は存在しないか等の再考を繰り返すことにより、新しい発見を見出せるのだと思います。

3.4 学問を身につけるには

学問を身につけると言うことは、単に記憶 するということではないようです。なぜならば記憶は、すぐにでも消えてしまうからです。それではどのようなことを指して、学問が身に付くというのでしょうか。ヘーゲルが言っているところの アウフヘーベン (Auf hoben : o はウムラウト) だと思います。日本語で言えば、悟りです。これは、経験した人にしか分かりません。どの様なときにアウフヘーベンになるかと言いますと、何かにぶつかって何の糸口が見いだせない状態が続きある日突然ぱっと見えてくるときです。孫悟空の話の中に、「悟空一人が師匠の言葉を悟り、夜中に師匠の部屋へ行くと、師匠から極意を授か

り、その日から雲に乗れるようになった」とあります。まさにそのような状態です。

大人が小学生の問題を見せられたときに説けない人は、いないと思います。しかし彼らが小学生のときは、解けなかったはずです。それは何でしょうか。まさにアウフヘーベンの軽い現象です。知識が向上したと言うよりも、知能が向上したのではないかと思います。つまり多くの知識を詰め込んだと言うことではなく、考える力が向上したと言うことです。

つまり学問を身につけると言うことは、単に知識人になるのではなく、考える力を身につけると言うことだと思います。勿論考える力を身につけるためには、知識が必要です。しかもその知識は、考える力を身につけるものでなくてはなりません。

そのためには何をすればよいか。一つははっきり言えることは、過去の歴史に耐えた書物を読むことでしょう。昔の人が、後世の人に是非読ませたいと残した書物ですから、この知識は、重要です。歴史を学ぶことも大切です。しかし歴史を学ぶと言っても、何年に某天皇が何をしたと言うような事実は、まあゴミみたいなものでしょう。つまり何の役にも立たないと言うことです。それよりもどの時代にどの様な天候で、そのために何が起こったとか、どの様な事件があってその事件発生の原因と結果がどの様なものであったとかが重要です。

現代にあっては、何が重要で何がくだらないことであるか見分ける必要があります。現代は情報社会で、情報が山のようにあります。しかし大部分の情報は、くだらないものです。それらの良し悪しを見分ける力が必要です。この問題については、別のところで考えることにします。

3.5 創造力とは

学問を進めるためには、創造力を伸ばさねばなりません。その創造力とはいったい何なのでしょう。思うに、創造力とは一つの問いが与えられたとき、いかに多くの問いに対する可能性を与える事ではないかと思います。その可能性とは、決して今まで存在しなかったようなことではなく、問われた人物が今までに経験した内の中にあると思われまます。経験したこともない、今まで誰も思いつかなかったことを突然思い浮かべることは、決してないと思います。良く宗教学者や魔術師は、その様な未知の世界を思いつくことが出来るように言われることがあります。その様なことは決して起こらないでしょう。また過去の大学者は、ある日突然新しい発見をしたかのように言われることがあります。それらの人のそのときの状況を考えると決してその様なひらめきがあったようには見えません。

例えばアインシュタインの相対性理論は、アインシュタインがある日突然ひらめいたように言われることがあります。彼が生きていた時代においては、様々な相対理論でしか説明が付かない現象が数多く発見されていました。遠くの恒星がニュートンの法則から導かれた結果と異なる観測結果を与えていましたし、高速におけるローレンツ短縮も発見されていました。当時の人々は、これらの現象を説明するために様々な仮説を提案していたのですが、その中でアインシュタインが「光の速度は一定である」と提案し、それらの現象を全て説明したことが彼の偉大な功績として今日に伝えられているのです。もしアインシュタインが提案しなくても、時間が掛かったかもしれませんが、誰かが同じ提案をしたことでしょう。

その他の全ての研究も同様であると思われます。何か不思議な現象があり、その現象がこの時代の全ての理論で説明が付かないとき、そこに新しい理論が潜んでいると思われます。そしてその新しい理論を見いだすことの出来る人は、その時代に関係する理論全てに精通し、その問題をあきらめずに追求している人であると思います。そしてその人は、一つの問いに対して他の人よりより多くの可能性を提示できる人でしょう。その様な人こそ創造力豊かな人と呼べるのではないのでしょうか。

その創造力を高めるためには、知識を整理し組み立て、常に矛盾の無い様に学問を組み立てておく必要があります。常日頃その様な努力を行うことにより、より創造力豊かになってくるのではないのでしょうか。このことは、別に特別な頭脳を持った人と言うことではありません。誰でも持っている能力であると思います。つまり創造力を伸ばすと言うことは、誰にでも出来る能力なのではないのでしょうか。

その創造力の中には、宗教家や魔術師が言っているような全くの未知の世界は存在していません。未知の世界が現れると言っているのは、ただ単に勘違いなのでしょう。聖書やコーラン、仏典や日本神道の古事記や日本書紀が述べているような世界は、どの様な人でも簡単に想像することが可能です。その様な真偽を計りきれないような空想の内容は、創造力とはとても言えません。そんな簡単に思いつくような内容ではなく、きちんと裏付けのある事柄を理路整然と思いつくことが創造力だと思います。

第 4 章

電気の簡単な歴史

電気の歴史年表を簡単にまとめてみました。

BC900 年

鉄を引き付ける磁石が知られていた。磁石（agnecia の石）についての二つの伝説があります。羊飼いの少年マグメシアのが最初に磁石を見つけた見つけた。磁石の産地ギリシャのマグネシアからきました

BC600 年

ターレス Thales 摩擦電気についての記述があるギリシアでは琥珀(ギリシャ語でエレクトロン)と毛皮を摺りあわせると、摩擦電気が発生することが知られていました。

BC240 年

「呂氏春秋」に、「慈石召鉄」の記述があります。中国の本「呂氏春秋」に、「慈石召鉄」と書かれています。中国の河北省南端近くに磁県（ツーシエン）ここは昔良質の慈石を産出したことから慈州と呼ばれていました。

713 年

日本では「続日本紀」の和銅 6 年（713 年）に「近江より慈石を献ず」とあるのが最初です。

1100 年

方位磁石の記述がある中国で羅針盤が使用されていました。

1600 年

ギルバート W.Gilbert 「磁気について」を著わしました。地球が巨大な天然磁石であるとし、コンパスが南北を指すことを説明、電気の流れは琥珀を布でこすることによって発生することを発見しました。

4.1 1700 年

1729 年 Stephen Gray による電気の伝導についての発見。

1745 年 Georg Von Kleist は、電気が制御可能であることを発見しました。これはかの有名な Leyden 瓶の実験の観測から導き出された結果です。

1746 年 マッシュエンブレーケ P.van Masschenbroeke が静電気を蓄えるライデン瓶を発明したと発表したが、既に 3 か月前に kleist によって発明されていました。電気の実験用の電源として広く活用されました。また、彼の友人が感電して死亡し、最初の感電死亡事故となりました。

- 1752年 フランクリン B.Franklin 雷が電気現象であることを確認雷雨の中で糸にライデン瓶をつけて風をあげ、ライデン瓶を持ち帰って検査したところ帯電しており、雷が電気であることを証明しました。琥珀と毛皮の現象を毛皮は電気が過剰な「プラス」の電気、琥珀は電気が失われた「マイナス」の電気としました。
- 1773年 キャペンディッシュ H.Cavendish 電気力が距離の逆二乗則に比例することを発見電流の測定器が無く、自身の体に電気を流ししびれ具合で電気の強さを測定しました。
- 1780年 ガルバニー L.Galvani 蛙の筋肉による電気実験。当時は蛙の筋肉が電気を発生していると考えられていました。
- 1785年 クーロン C.A.deCoulomb 電気磁気のクーロンの法則を発見。精密なねじり天秤を発明し、電気力を正確に測定しました。

4.2 1800年

- 1800年 ボルタ Volta 銅と亜鉛を塩水に浸した電池が作られました。ニコルソンとカーライル W.Nicholson and A.Carlisle 水の電気分解
- 1808年 ハンプリー・デービ Humphrey Davy アーク灯の公開実験に成功 講会堂の地下室の全面に 2000 個の電池を設置し、それをアーク灯に接続して、アーク灯の公開実験に成功しました。これが電気を使用した人工の光による照明の始まりでした。
- 1820年 エルステッド H.C.Oersted 電流による磁力を発見し電流と磁気の相互作用を突き止めたました。その数週間後 Marie Ampere がワイヤに流れる電流があたかも磁石のような働きをすることを発見しました。
シュバイガーとボグゲンドルフが、電流計を発明。アラゴはコイルによって、鉄心が磁化されることを発見。
ビオとサバル J.B.Biot and F.Savart が、電流の磁気作用に関するビオ・サバルの法則を確立。
- 1821年 ゼーベックがゼーベック効果を発見
- 1827年 Joseph Henry が、一連の電磁気に関する実験を始め、電気誘導の発見を行い、世界で最初のモーターの製作をしました。同じ年に Georg Simon Ohm が、電流と電圧の関係を発見しました。彼の名前を取って、オームの法則と呼ばれました。しかし近似式に過ぎないことなどにより、近年ではオームの法則とは呼ばれず、電圧・電流の関係式と呼ばれています。
- 1829年 ヘンリー Joseph Henry 電磁石の発見 導線で囲まれたコイルの中に大きな電磁力が発生することを発見した
- 1831年 Michael Faraday が電磁誘導の発見をしました。
ペルチエ がペルチエ効果を発見 2 種類の金属の両端を接続し電流を流すと 二つの接点で熱の吸収と発生が生じます。
- 1832年 ヘンリーが、コイルの自己誘導についての実験報告をしました。
- 1833年 ファラデー M.Faraday 電気分解の法則ファラデーの法則は電気分解の作用は電気の一定量に対し常に一定
- 1834年 ファラデーが、自己誘導現象を発見した。

レンツが、「誘導電流は導線がその運動と逆向きに磁気力を受けるような向きに生じる」という、レンツの法則を発表。

トーマス・ダベンポート Thomas Davenport が電動機を發明 直流電動機 (electromagnetic engine) を發明しました。

1837 年 クック William Fothergill Cooke とホイートストン Charles Wheatstone が実用になる電信機を發明 5 針式電信機を發明し最初の電信会社を興しました。

1838 年 モールス Samuel Morse モールス符号の發明彼の電信機でニューヨークで 10 個の言葉を送る実証試験を行い、ドットとダッシュの組み合わせによる符号は、後に世界中で使用されるモールス符号でした。

1840 年 ジュール J.P.Joule 電流の熱作用を発見 発生熱量は電流の 2 乗と抵抗に比例します。

1842 年 W. トムソン (ケルビン卿) は、静電気理論と熱伝導理論との間の形式的類似を指摘しました。

ノイマンが、レンツの法則とオームの法則とを結合させて電磁誘導の数学的法則を作り上げました。

1845 年 ファラデー M.Faraday ファラデー効果を発見反磁性を発見 ガラス管を磁場の中に置き光を通すと偏光面が回転する磁気と光の相互作用を突き止めました。

1846 年 ファラデーは、光が力線の振動ではないかと言いました。

1847 年 W. トムソンは、電磁気理論と弾性体理論の間の対応を示しました。

1853 年 W. トムソンが、ライデン瓶の放電が振動的であることを示し、その周期を与えました。

1855 年 マクスウエルが、「ファラデーの力線について」を発表。

1857 年 フェッダーセンが、回転鏡を用いて火花放電の写真を撮影し、電気振動を実験的に確かめました。

1860 年 マクスウエル J.C.Maxwell が電場、磁場の考え方を導入し電磁誘導を場の理論として理論化しました。

キルヒホッフ Chirchhoh キルヒホッフの法則、電気回路の計算方法を作りました。

1861 年 マクスウエル J.C.Maxwell 変位電流の考え方を導入し電荷の変動によって生じる電流を理論的に定義しました。

1865 年 マクスウエル J.C.Maxwell Maxwell の法則を発表電磁波の予想、電気と磁気に関する基本方程式を解くと電場 (電気が作用する空間) と磁場 (磁気的作用する空間) に関する波動方程式となり、これが電磁波の存在を示していた。その速度を計算すると光の速度に一致しました。

1869 年 グラム Zenobe Theophile Gramme が直流発電機のダイナモ方式による実用的なグラム発電機 (Gramme dynamo) を發明しました。

1874 年 ジョージ ストニー George Stoney が電子の命名、電子をエレクトロン (electron) と名付けました。

1876 年 ベル Alexander Graham Bell が電話の發明をし、電気で会話を伝送する電話を發明しました。

1878 年 スワン Joseph Swan が炭素フィラメント電灯を發明 炭素フィラメントによる電灯の展示をしました。2~3ヶ月遅れてアメリカのエジソン Thomas Edison が同様な發明をしました。

- 1882年 エジソン Thomas Edison が最初の発電所を作りました。ニューヨーク市で最初の発電所を作り街燈を点灯させ、一般需要家へ電気を供給する事業の基礎ができました。
- 1880年代 テスラ Nikola Tesla が交流モータと交流発電システムを発明、ネオン灯や蛍光灯を開発 1893年シカゴ世界博覧会で 10万個の電灯を燈しました。その後交流方式が世界中の電力システムに採用されました。トランスによって一般家庭で使用する交流の電気を得ました。
- 1884年 ポインティングとヘビサイドは、独立に電磁場におけるエネルギーの流れに関する法則を発見し、ポインティング・ベクトルが導入されました。
- 1888年 ヘルツ H.Hertz が電波の発生 放電によって電磁波を発生させ、離れた場所のコイルの両端を狭くしておくことと火花が発生して電磁波が伝わったことが確認でき、これは Maxwell の式が正しいことを実験的に証明されたのです。
- 1893年 スタインメッツ Charles Proteus Steinmetz が交流理論を出版。交流電気の特性を数学的に表現することに成功し、交流理論 (Theory and Calculation of Alternating Current Phenomena) を出版しました。
- 1895年 マルコーニによる無線通信機の発明。
- 1897年 J. J. トムソンによる電子の確認。
- 1899年 マルコニー Guglielmo Marconi が無線電信に成功し、ドーバー海峡横断の無線電信に成功しました。

4.3 1900年

- 1901年 マルコニー Guglielmo Marconi が大西洋横断無線電信に成功、大西洋横断無線電信に成功しました。
- 1904年 フレミングが二極真空管を発明
- 1905年 エジソンがアルカリ二次電池を発明
- 1906年 アメリカのダンウッドィイが SiC 検波器を発明アメリカのピッカードが Si を用いた点接触検波器を発明
- 1907年 アメリカのド・フォレストが三極真空管を発明
- 1910年 フランスのクロードがネオン灯を発明アメリカ GE のクーリッジによるタングステン電球の発明
- 1913年 GE のラングミュアがガス入りタングステン白熱電球を発明
- 1915年 アメリカのウエスティングハウス社のハートレーが真空管式発振器を発明
- 1917年 フランスのフェリーが消極剤で空気を用いる空気電池を発明
- 1919年 アメリカのアームストロングがスーパーヘテロダイン受信方式を発明
- 1921年 アメリカのハルがマグネトロンを発明
- 1927年 van der Pol による、発振器の研究。
- 1930年代 PLL 回路が考案されました。
- 1933年 アメリカのアームストロングが FM 変調方式を発明アメリカのつウォルキンがテレビ用撮像管アイコノスコープを発明
- 1938年 ソビエト連邦の Berstein による、自由発振器での雑音理論確立。アメリカ GE

のジョージ・インマンが蛍光灯を発明アメリカのカールソンが静電式のコピーを発明し、後ゼロックスが量産化

1939 年 アメリカ GE のハートとトーカがクライストロンを発明

1942 年 アメリカのルーベンが水銀電池を発明

1944 年 ドイツのシュルツがキセノン・アーク灯を発明。イギリスのコンフナーが進行波管を発明

1947 年 ベル研のウォルター・ブラッテン Walter Brattain、ジョン・バディーン John Bardeen ウィリアム・ショックレー、William Bradford Shockley がトランジスタを発明 ブラッテン、バーディーンは 1947 年 12 月 23 日点接触型トランジスタの最初のデモンストレーションに成功し、ショックレは遅れること数週でサンドイッチ型トランジスタを作っています。1948 年 6 月 30 日 ATT ベル研究所のブラッテン、バーディーン、ショックレによりその発明が報告されています。

1954 年 Tellegen が、ideal amplifier の概念を発表

1958 年 J.S.Kilby による集積回路の発明

1964 年 Carlin が nullor の概念を発表

1968 年 B.Gilbert が、ギルバート回路を発表

1971 年 Widlar が、バンド・ギャップ回路を発表

1974 年 R.H.Dennard によるスケーリング則の発表

1975 年 Gilbert によるトランスリニア論文の発表

1978 年 黒川による発振器の全ての現象の解析

1998 年 Hajimiri によるパルスによる発振器の雑音解析

1827 年 Joseph Henry が、一連の電磁気に関する実験を始め、電気誘導の発見を行い、世界で最初のモーターの製作をしました。同じ年に Georg Simon Ohm が、電流と電圧の関係を発見しました。彼の名前は、オームの法則と呼ばれました。しかし近似式に過ぎないことなどにより、近年ではオームの法則とは呼ばれず、電圧・電流の関係式と呼ばれています。

1831 年 Michael Faraday が電磁誘導の発見をしました。

1832 年 ヘンリーが、コイルの自己誘導についての実験報告をしました。

1833 年 電気分解に関するファラデーの法則の発見。

1834 年 ファラデーが、自己誘導現象を発見しました。

レンツが、「誘導電流は導線がその運動と逆向きに磁気力を受けるような向きに生じる」という、レンツの法則を発表。

1840 年 電流の熱作用に関する、ジュールの法則。

1842 年 W. トムソン (ケルビン卿) は、静電気理論と熱伝導理論との間の形式的類似を指摘しました。

1845 年 ファラデー効果 (磁場の中での偏曲面の回転) や反磁性の発見。

ノイマンが、レンツの法則とオームの法則とを結合させて電磁誘導の数学的法則を作り上げました。

1846 年 ファラデーは、光が力線の振動ではないかと言いました。

1847 年 W. トムソンは、電磁気理論と弾性体理論の間の対応を示しました。

1853 年 W. トムソンが、ライデン瓶の放電が振動的であることを示し、その周期を与

えました。

- 1855年 マクスウエルが、「ファラデーの力線について」を発表。
- 1857年 フェッターセンが、回転鏡を用いて火花放電の写真を撮影し、電気振動を実験的に確かめました。
- 1862年 マクスウエルが、「物理的力線について」を発表。
- 1864年 マクスウエルが、「電磁場の動力的理論」を発表。
- 1873年 マクスウエルが、「電気磁気理論」を発表。
- 1884年 ポインティングとヘビサイドは、独立に電磁場におけるエネルギーの流れに関する法則を発見し、ポインティング・ベクトルが導入されました。
- 1888年 ヘルツによる電磁波の発見。
- 1895年 マルコーニによる無線通信機の発明。
- 1897年 J. J. トムソンによる電子の確認。
- 1927年 van der Pol による、発振器の研究。
- 1930年代 PLL 回路が考案された
- 1938年 ソビエト連邦の Berstein による、自由発振器での雑音理論確立。
- 1947年 ベル研が、点接触型ゲルマニウム・トランジスタを発表
- 1954年 Tellegen が、ideal amplifier の概念を発表
- 1958年 J.S.Kilby による集積回路の発明
- 1964年 Carlin が nullor の概念を発表
- 1968年 B.Gilbert が、ギルバート回路を発表
- 1971年 Widlar が、バンド・ギャップ回路を発表
- 1974年 R.H.Dennard によるスケーリング則の発表

4.3.1 古代の電気研究者タレス

電気について知識がなかったころにも、電気を発生させる魚類の電気ショックに気づいていた人々がいました。紀元前 2750 年ごろの古代エジプトの文献にそういった魚を「ナイル川の雷神」とする記述があり、全ての魚の守護神だと記しています。そういった魚類についての記述は、千年以上後の古代ギリシア、古代ローマ、イスラムの学者らの文献にもあります。大プリニウスやスクリボニウス・ラルグスといった古代の著作家は、デンキナマズやシビレエイによる感電の例をいくつか記しており、それらの電気ショックが導体を伝わることを知っていました。痛風や頭痛などの患者をそういった電気を発する魚に触れさせるという治療が行われたこともあります。雷や他の自然界の電気が全て同じものだという発見は、中世イスラムという可能性もあり、15 世紀のアラビア語辞書で雷を意味する raad という言葉がシビレエイも表すとされています。

4.3.2 バグダッド電池

古代の地中海周辺地域では、琥珀の棒を猫の毛皮でこすると羽根のような軽い物を引き付けるという性質が知られていました。紀元前 600 年ごろミレトスのタレスは一連の静電気についての記述を残していますが、彼は琥珀をこすって生じる力は磁力だと信じており、磁鉄鉱のような鉱物がこすらなくても発生する力と同じものだと考えた。タレスがそ

それを磁力だと考えたことは間違っていたが、後に電気と磁気には密接な関連があることが判明しています。古代ギリシア人は、琥珀のボタンが髪の毛のような小さい物を引きつけることや、十分に長い間琥珀をこすれば火花をとばせることも知っていました。イラクで1936年に発見された、紀元前250年頃のものとしてされる、バグダッド電池なるものはガルバニ電池に似ています。バグダッド電池はパルティア人が電気めっきを知っていた証拠とする説もありますが、これを単に金属棒に巻物を巻いて取め地中に埋めた壺（つまり電池ではない）とする説もあります。

4.4 近世の話

4.4.1 ライデン瓶、Boerhaave 博物館

イタリアの物理学者カルダーノは、『De Subtilitate』（1550年）のなかで、電気による力と磁力とをおそらくは初めて区別しました。1600年にイギリスの科学者ウィリアム・ギルバートは、『De Magnete』のなかでカルダーノの業績について詳細に述べ、ギリシア語単語「琥珀」elektron からラテン語単語 electricus を作り出した。electricity という英単語の最初の使用は、トーマス・ブラウンの1646年の著作『Pseudodoxia Epidemica』の中にあるとされます。

ギルバートに続いて、1660年にゲーリケは静電発電機を発明しました。ロバート・ボイルは1675年に、電気による牽引と反発は真空中で作用し得ると述べました。スティーヴン・グレイは1729年に、物質を導体と絶縁体とに分類しました。デュ・フェは、のちに positive（陽）、negative（陰）と称ばれることになる、電気の2つの型を最初に同定しました。大量の電気エネルギーの蓄電器の一種であるライデン瓶は、1745年ライデン大学で、ミュッセンブルークによって発明されました。ワトソン (William Watson) はライデン瓶で実験し、1747年に静電気の放電は電流に等しいことを発見しました。平賀源内は、18世紀半ばにエレキテルを発達させました。

4.4.2 ベンジャミン・フランクリン

18世紀中ごろ、ベンジャミン・フランクリンは私財を投じて電気の研究を行い、1752年6月雷を伴う嵐のなか風を揚げるという実験を行いました。この実験で雷が電気であることを示し、それに基づいて避雷針を発明しました。フランクリンは陽電気および陰電気の発明の確立者と見なされることが多いようです。

4.4.3 まとめ

このように19世紀前半に電気の研究は大いに進展しましたが、19世紀後半には電気工学が急速に発展しました。ニコラ・テスラは交流を応用した電気機器（交流発電機ほか）を発し、後の電気の発電、送配電に大きな影響を与えました。また、蛍光灯や無線機の発明も行いました。トーマス・エジソンは蓄音機、電球などを発明。イェドリック・アーニョシュはダイナモの原理を確立。ジョージ・ウェスティングハウスはテスラの交流電動機の権利を取得し、交流発電・送電システムの確立に寄与しました。ヴェルナー・フォン・ジーメンスも電気産業の発展に貢献。アレクサンダー・グラハム・ベルは電話を発明。電

気は科学的興味の対象から第二次産業革命の推進力となり、日常生活に欠かせないものへと変貌していきました。

4.5 物理学における電気

電子や陽子などの素粒子固有の性質に由来する古代より、摩擦した琥珀（こはく）に物が吸い寄せられるなどの電気現象が知られており、物質にはこのような性質を持つものを持たないものがあるということがわかっていました。

近代になって物理学が発展すると、これらの現象（電気）は、定量化することができ、また保存されるということがわかりました。電気の現象を研究する物理学の分野は電磁気学と呼ばれています。電気が多量にあると思われる場合や逆に少量しかない場合に応じて、物が吸い寄せられるなどの電気現象にその程度の相違が観察されたり、雷の火花の大きさの程度により、電気にも水量と同様にその大きさがあるとして、電気の大きさの多少を示す量として電気の量、即ち「電気量」というものが考えられています。これに対して「電荷」とは「電気量」の多少を特に問わずに電気が存在しさえすれば足りる時に「電荷」があるなどといい、「電気量」とは少し、視点が異なり、電荷量とは言わないことが多いようです。

電気は正と負の二種類があります。正と正または負と負に帯電した物体同士は反発し合い、正と負に帯電した物体同士は引き合う。その引力あるいは斥力の強さはクーロンの法則により計算することができます。また、これにより「電気量」の単位を決めることもできます。

電荷とは、ある種の素粒子が持つ性質であり、物理学において自然界の四つの根源的な基本相互作用の一つである電磁気力の元となります。電荷は原子内に元々あり、よく知られる担体としては電子と陽子があります。また電荷は保存量であり、孤立系内の電荷量は系内でどんな変化が起きても変化しません。孤立系内では電荷は物体から物体へ転送され、その転送は直接的な接触の場合もあるし、金属の導線などの伝導体を伝わって行われることもあります。静電気とは電荷が物体に（不均衡に）存在する状態であり、通常異なった素材をこすり合わせることで電荷が一方からもう一方に転送されて生じます。

4.5.1 箔検電器

箔検電器に電荷を蓄えると、金属箔が電荷によって反発して開きます。電荷が存在すると電磁気力が発生する。電荷が互いに力を及ぼしあう現象は古くから知られていましたが、その原理は古代には分かっていませんでした。ガラス棒を布でこすって帯電（電荷を帯びること）させ、それを紐でつるした軽いボールに触れさせると、ボールが帯電する。同様のボールを同じようにガラス棒で帯電させると、2つのボールは互いに反発しあいます。しかし一方をガラス棒で帯電させ、もう一方を琥珀棒で帯電させると、2つのボールは互いに引き付け合います。このような現象を研究したのが18世紀後半のシャルル・ド・クーロンで、彼は電荷には二種類の異なる形態があると結論付けました。すなわち、同じ種類の電荷で帯電したものは反発しあい、異なる種類の電荷で帯電したものは引き付け合います。

この力は荷電粒子自身にも働くため、電荷は物体表面に互いに距離をとるように一様に

分布する傾向があります。この電磁気力の強さはクーロンの法則で定式化されており、互いの電荷の積に比例し、距離の2乗に反比例します。電磁気力は強い相互作用に次いで強い力だが、強い相互作用とは異なりあらゆる距離に働く。ずっと弱い重力相互作用と比較すると、二つの電子が電磁気力で反発しあう力はそれらが重力で引き付け合う力の1042倍である。

電子と陽子の電荷は極性が逆であり、物体全体の電荷は正の場合と負の場合がありうる。一般に電子の電荷を負、陽子の電荷を正としまる。この習慣はベンジャミン・フランクリンの業績に由来する。電荷量は記号 Q で表され、その単位はクーロンです。電子はどれも同じ電荷量を持ち、その値は約 1.6022×10^{19} クーロンです。陽子は同じ大きさの極性が逆の電荷量を持つので 1.6022×10^{19} クーロンとなります。電荷は物質だけでなく反物質にもあり、それぞれに対応する反粒子は大きさが等しく極性が逆の電荷量を持ちます。

電荷量を測定する手段はいくつかあります。検電器は最初の電荷測定機器ですが、今では授業での実験などでしか使われません。今では電子式のエレクトロメータがよく使われています。

4.5.2 電流

電荷を持った粒子の移動によって、電流が発生し、その強さはアンペアを単位として計られます。どんな荷電粒子（電荷担体）でも移動することで電流を形成できるが、電子が最も一般的です。

歴史的な慣習により、電流の流れる向きは正の電荷の流れる向きとされており、電源の正極から負極に流れるとされます。負の電荷を持つ電子は電荷担体としては最も一般的ですが、電気回路での電流の流れる向きと電子の移動する向きは反対です。しかし状況によっては電流の向きと荷電粒子の移動する向きが一致する場合もありますし、荷電粒子が両方向に同時に移動することもあります。様々な状況で電流の流れる方向を便宜的に定めるために、このような規定があります。

4.5.3 電弧

電弧は目に見える電流の一種です。物質を電流が流れる過程を電気伝導と呼び、その性質は流れる荷電粒子と物質の性質によって様々です。金属の場合は電子が流れ、電気分解においてはイオン（電荷を帯びた原子）が液体中を流れます。粒子自体の移動速度は極めて遅く、せいぜい毎秒数ミリメートルだが、それによって形成される電場は光速に近い速度で伝播します。そのため、電気信号は導線上で極めて高速に伝送されます。

電流はいくつかの目に見える現象を引き起こし、歴史的にはそれらが電流の存在を確認する手段でもありました。水に電流を流すと分解されるという現象は1800年にウィリアム・ニコルソンとアンソニー・カーライルが発見しました。これがいわゆる電気分解です。そこからさらに研究が進み、1833年にマイケル・ファラデーが電気分解の法則を解明しました。電気抵抗のある物質を電流が流れるとき、局所的な発熱があります。これを研究したのがジェームズ・プレスコット・ジュールで、1840年に数学的に定式化したジュールの法則を導き出しました。電流に関する最も重要な発見をしたのはハンス・クリ

スティアン・エルステッドで、1820年に講義の準備をしているときに導線に電流を流したときに、近くにあった方位磁針が振れることに気づきました。これが電気と磁気の基本的作用の発見であり、そこから電磁気学が発展することになりました。

工学や実用的観点では、電流を直流 (DC) と交流 (AC) に分類することができます。これは電流が時間と共に変化するかしらないかを示した用語です。直流は電池などが発する電流であり、常に一方向に流れる電流であります。交流は電流の流れる向きが定期的に逆転する場合を指します。交流の電流の強さの時間変化は正弦波を描くことが多いようです。したがって交流が流れる導体内では電荷（電子）が一方向に進むことはなく、短い距離を行ったり来たりすることになります。交流の電流の強さをある程度以上の時間で平均するとゼロになりますが、エネルギーはある方向に運搬され、次に反対方向に運搬される。交流には定常的な直流では見られない特性があり、インダクタンスや静電容量に影響を受けます。そういった特性は電源を入れた直後など回路の過渡現象が主題となる場合に重要となります。

4.5.4 静電気学

電場の概念は、マイケル・ファラデーによって導入されました。電場は電荷によってその周囲の空間に形成され、その電場内に存在する他の電荷に力を及ぼします。二つの電荷の電場の振る舞いは、ちょうど二つの質量の重力場のそれと似ており、広がりは無制限ですが互いに及ぼしあう力は距離の2乗に反比例する。ただし、電場と重力場には大きな違いが一つあります。重力は常に引き付け合う力ですが、電場は引き付け合う場合と反発しあう場合があります。惑星のような巨大な物体は全体としてほとんど電荷を帯びていないため、遠距離の電場は通常ゼロです。そのため宇宙規模の距離では本来弱いはずの重力が支配的になります。

4.5.5 電気力線

電場は空間の位置によって変化し、ある位置に正の単位電荷量を静止させて置いたとき、その電荷が受ける力の強さがその位置の電場と定義されます。この概念上の電荷を試験電荷と呼び、自身の電場が影響を及ぼさないようほとんどいかに小さく、しかも磁場を生じないために決して動かないものとします。電場は定義上から力であり、力はベクトル量である。つまり電場自身もベクトル量であり、大きさと方向があります。明らかに電場はベクトル場です。

静止した電荷が形成する電場を研究する分野が静電気学です。電場は空間の各点における方向に沿って描いた想像上の曲線で視覚化できます。この概念を導入したのはファラデーで、これを「電気力線」と呼び、今も時折見かけます。正の点電荷をその電場内で動かそうとした場合、点電荷が通る経路は電気力線に沿ったものになります。ただしこれは物質的存在とは無関係の想像上の概念であり、電気力線の間も含めて空間全体に電場は存在します。静止した電荷から発する電気力線にはいくつかの特性があります。まず電気力線は正の電荷を始点とし、負の電荷を終点とします。次に、良導体がある場合は常に直角に入っていきます。さらに電気力線同士が交差することはありません。

中空の導体では電荷は常にその外側の表面に分布します。従ってその内部のどの位置で

も電場はゼロとなります。これがファラデーケージの動作原理であり、金属殻で囲まれた内部は外界の電場から隔離されます。

静電気学の知識は高電圧装置の設計において重要です。電場を満たしている媒体には必ず耐えられる電場の強度（電界強度）の限界があります。電界強度がその限界を超えると絶縁破壊がおき、帯電した部分の間に電弧によるフラッシュオーバーが生じます。例えば空気の場合、電極の間が狭いなら電界強度が 30 [kV] 毎センチメートルを越えると電弧が生じます。電極間の距離が大きい場合は限界がさらに低くなり、1 [kV] 毎センチメートルでも電弧を生じることがあります。雷はこの現象が自然界で発生したもので、上昇気流によって地面と隔てられて電荷を蓄えた雲が電場を生じ、その強度が空気の限界を超えたときに発生します。大きな雷雲の電位は 100 [MV] にもなり、その放電エネルギーは最大で 250 [kWh] ほどになります。

電界強度は近くに導体があると大きく影響され、特に尖った導体の先端部分に電気力線が集中します。この原理を応用したのが避雷針で、その尖った先端が周辺で発生する雷を引き寄せ、建物を守ることにあります。

4.5.6 電位

電位の概念は電場の概念と密接な関係があります。電場内に小さな電荷を置こうとすると力を受け、その力に逆らって電荷をその場所に置くことは仕事となります。ある位置の電位とは、単位試験電荷を無限遠からその位置までゆっくり運ぶのに要するエネルギーと定義されます。一般にその単位はボルトであり、1 ボルトとは無限遠から 1 クーロンの電荷をその位置に運んでくるのが 1 ジュールの仕事となる位置の電位です。この電位の定義は公式なものですがあまり実用的ではありません。より実用的な定義として電位差すなわち電圧があります。こちらは単位電荷を 2 地点間で移動させるのに要するエネルギーと定義される。電場は「保存性」という特殊な性質があり、試験電荷の移動に際して移動経路と移動に必要なエネルギーは無関係である。2 地点間の任意の経路で同じエネルギーを要するので、電位差は一意に定まる。ボルトはむしろ電位差の単位として認識されており、電圧は日常的によく使われます。

実用においては、電位の比較・参照の際の基準を定義した方が便利です。定義上は無限遠がそれにあたりますが、より実用的には地球自体がそのどこをとっても同じ電位だと仮定することで基準点となる。この基準点をアースまたは接地と呼びます。地球は正及び負の電荷の無限の源泉とみなすことができ、そのため電気的には帯電していないし、帯電させることもできないと見なせます。

電位はスカラー量であり、方向はなく大きさだけの量です。これは重力場における高さと同様です。ある高さで物体を離すと重力を発生している重力源に向かって落ちていきます。同様に電荷をある電位に置くと電場の電気力線に沿って「落ちて」いきます。地図に同じ高さの地点を結んだ等高線が描かれるように、電場においても同じ電位の地点を結んだ等電位線を描くことができます。等電位線は電気力線とは直角に交わります。また、電気伝導体の表面は電位が等しいため、電気伝導体の表面とは平行になります。仮に伝導体表面に電位差があってもその電位差をなくすように電荷が移動して等電位になります。

電場は正式には単位電荷に及ぼされる力と定義されていますが、電位の概念を使えばもっと実用的で等価な定義が可能です。すなわち電場とは電位の局所的勾配です。通常ボ

ルト毎メートルで表され、電位の勾配がもっともきつい方向（つまり等電位線が最も密になっている方向）が電場の方向となります。

4.6 電磁気学

1821年、エルステッドは電流の流れる導線の周囲に磁場が存在することを発見し、電気と磁気に直接的な関係があることがわかりました。さらにその相互作用は当時自然界に存在することがわかっていた重力や静電気力とも異なるようでした。方位磁針にかかる力は単に電流の流れる導線との間の引力や斥力といったものではなく、それとは直角な方向の力である。エルステッドはこれを「電氣的衝突は回転するように働く」とやや不明瞭に表現した。この力は電流の向きにも依存し、電流を逆向きに流すと力の向きも反対になります。

エルステッドはその発見を完全には解明しなかったが、その現象が相互的であることは述べています。すなわち電流が磁石に力を及ぼすと同時に、磁場が電流に力を及ぼすということです。この現象をさらに研究したのがアンドレ＝マリ・アンペールで、二つの平行な導線にそれぞれ電流を流すと相互に力を及ぼすことを発見しました。同じ方向に電流を流すと二つの導線が引き付けあい、逆方向に電流を流すと反発しあいます。この相互作用はそれぞれの電流によって生じる磁場同士が介在して起きるもので、アンペアという単位の設定にもこの現象が使われています。

4.6.1 電動機

電動機は電磁気学の重要な現象を利用しています。電流が磁場を通ると電流および磁場の向きに対して直角の力を受けます。この磁場と電流の関係は極めて重要であり、この現象からマイケル・ファラデーが1821年に電動機を発明しました。ファラデーの単極電動機は永久磁石が水銀のプールの中央につき立てられた状態になっています。その上から導線が垂らされていて先端が水銀に浸っています。導線に電流を流すと接線方向に力が働き、導線が磁石の周囲を回るように動きます。

1831年、ファラデーは導線を磁場を横切るように移動させるとその両端に電位差が生じることを発見しました。これが電磁誘導であり、さらなる研究によってファラデーの電磁誘導の法則と呼ばれる法則を見出した。すなわち回路に乗じる電位差は、回路を貫く磁束の変化の割合に比例するという法則である。この発見を応用し、ファラデーは銅の円盤を回転させる機械エネルギーを電気エネルギーに変換する世界初の発電機を1831年に発明しました。このファラデーの円盤は原始的なもので実用可能なレベルではありませんでしたが、磁気を使って発電できる可能性を示しました。

ファラデーとアンペールの業績により、時間と共に変化する磁場が電場を生み出し、時間と共に変化する電場が磁場を生み出すことが示されました。つまり電場または磁場が時間と共に変化するれば、もう一方の場が必然的に誘導されます。このような現象は波動の性質を持っており、一般に電磁波と呼ばれます。電磁波については1864年にジェームズ・クラーク・マクスウェルが理論的に解析した。マクスウェルは電場、磁場、電荷、電流の関係を明確に示す一連の方程式を導出しました。また彼は電磁波が光速で伝播することを証明し、光も電磁放射の一種であることを示しました。マクスウェルの方程式は光、場、

電荷を統合し、理論物理学における重要な進歩となりました。

4.7 電気回路

基本的な電気回路。左側の電圧源 V が回路に電流 I を流す。それによって抵抗器 R に電気エネルギーを供給し、電流は電圧源に戻ります。

光や動力を得たり、有用な計算をさせるために、電気素子を電気伝導体で繋いだものを電気回路という。電気回路は抵抗器、インダクタ、コンデンサ、スイッチ、変圧器、その他の電子部品などから成ります。電子回路には半導体などの能動素子が使われており、非線形な挙動を示すため、それを表すには複素解析が必要であります。最も単純な電気回路部品は受動素子でかつ線形性を示すもので、一時的にエネルギーを蓄えられるが電力源は含まず、入力に対して線形に反応します。

4.7.1 抵抗

抵抗器は最も単純な受動素子です。名前が示す通りそれを通る電流に対して電気抵抗を示し、エネルギーの一部を熱に変換します。電気抵抗は導体内を電荷が移動する結果生じます。例えば金属では主に電子同士やイオン同士の衝突によって電気抵抗が生じる。電気工学の電圧と電流の関係をしめすオームの法則によれば、抵抗器を流れる電流はその両端の電位差に比例します。多くの物質の電気抵抗値は、狭い範囲の温度や電流値に対してほぼ一定です。抵抗値の単位オームはゲオルク・オームに因んで命名されたもので、ギリシア文字 Ω で表します。1 Ω の抵抗器に 1 ボルトの電位差を印加すると 1 アンペアの電流が流れます

4.7.2 コンデンサ

コンデンサは電荷を蓄える機能を持つ素子で、蓄えた電荷によって生じた電場にエネルギーを蓄えます。概念的には薄い絶縁層を二枚の導体の板で挟んだ形状で、静電容量を増すために体積に対して表面積を増やすべく、実際には金属薄膜をコイル状に巻いています。静電容量の単位ファラドはマイケル・ファラデーに因んで命名されたもので、F で表します。1 ファラドのコンデンサに 1 クーロンの電荷を蓄えると 1 ボルトの電位差が生じます。コンデンサを電圧源に接続すると、最初は電流が流れて電荷が蓄積されます。しかし、電荷が蓄えられていくと電流は時間と共に減少し、最終的に全く流れなくなります。従ってコンデンサでは定常電流（直流）が流れることはなく、むしろそれを阻止する性質があります。

4.7.3 コイル

コイルは一般に導線の巻線であり、そこに流れる電流によって生じた磁場にエネルギーを蓄える素子です。電流が変化するとその磁場も変化し、誘導起電力が生じます。その誘導起電力は電流の時間変化に比例し、その比例定数をインダクタンスと呼びます。インダクタンスの単位ヘンリーはジョセフ・ヘンリーに因んだもので、H で表します。1 ヘンリーのコイルに 1 秒間に 1 アンペアの割合で変化する電流を流すと、1 ボルトの誘導起電力

力が生じる。コイルはある意味でコンデンサとは逆の作用をし、定常電流は自由に流れるが、電流の急激な変化は阻止しようとしています。

4.8 発電と送電

前述の通り、電気エネルギーはさまざまな形態のエネルギーへの変換が容易であり、伝送も比較的簡単ですので、現代ではさまざまな分野で必要不可欠のものとなっています。非電気エネルギーを電気に変換することを発電と呼びます。

タレスの琥珀棒の実験は、電気エネルギー生産の最初期の研究でした。その摩擦帯電現象は軽い物なら引き寄せることができ、火花を発生させることもあります。発電方法としては極めて非効率です。史上初の実用的な電力源は18世紀に発明されたボルタ電池です。ボルタ電池から始まった電池はエネルギーを化学的に蓄え、そこから必要に応じて電気エネルギーを引き出して使うことができます。電池は様々な用途に使える一般的な電力源ですが、蓄えているエネルギー量は有限であり、完全に放電すると再充電するか廃棄するしかありません。電気エネルギーへの大きな需要に応えるためには、継続的に発電し、電線を通してそれを送電する必要があります。

電力は主に水蒸気で駆動される発電機で発電され、水蒸気を発生させるための熱源としては化石燃料の燃焼や核分裂反応の発生する熱が使われています。あるいは水流や風の持つ運動エネルギーを利用して発電機を駆動する場合もあります。蒸気タービンは1884年にチャールズ・アルジャーノン・パーソンズが発明し、何らかの熱源で蒸気タービンを回して発電することで今では全世界の80%の電力を得ています。そういった発電機は1831年のファラデーの円盤とは似ても似つかないものだが、磁場を横切る形で移動する伝導体の両端に電位差が生じるというファラデーの電磁誘導の法則に従って発電しています。19世紀末に変圧器が発明され、高電圧低電流でより効率的に電力を送ることが可能になりました。送電が効率化されたことで1つの大きな発電所で発電して広い地域に電力を供給できるようになり、規模の経済の効果が発揮されるようになります。

4.9 風力発電

風力発電は世界各国で重要性が増しつつあります。国家規模の電力需要を賄えるほど電気エネルギーを蓄えるのは容易ではないため、電力網には常に必要とされるだけの電気エネルギーを供給し続ける必要があります。そのためには常に電力需要を注意深く予測し、発電所間で常に連携する必要があります。ある程度の発電能力は、急激な電力需要増や何らかの障害への対策としてとっておく必要があります。

国が近代化し経済発展すると共に、電力需要は急激に増大する。アメリカ合衆国では20世紀の最初の30年間、毎年12%電力需要が増加し、最近では発展の著しいインドや中国が似たような増加傾向を示しています。歴史的に見て、電力需要の成長率は他のエネルギー形態のそれよりも急激でした。

環境問題への懸念から、風力発電や水力発電といった再生可能エネルギーに注目が集まりつつあります。様々な発電技法の環境への影響が議論される中で、これらは相対的にクリーンだとされています。

4.10 仕様

電球はジュール熱によってフィラメントを発光させます。電気はエネルギーの形態としては極めて柔軟であり、その用途は極めて幅広いものがあります。1870年代に実用的な電球が発明され、照明が電力の用途として最初に一般に普及した。照明に電気を使うことは新たな危険性を伴っていましたが、同時にガス灯などの火をそのまま使う従来の技法に付きまっていた火災の危険性を大きく低減させることになりました。電力網は電気照明のためにまず大都市圏から急激に整備され始めました。

電球が利用しているジュール熱現象は、より直接的に電気ストーブでも利用されています。電気エネルギーをジュール熱に変換して利用することは制御が容易で便利ですが、元々の発電で熱エネルギーを電気エネルギーに変換していることを考えると大きな無駄ともいえます。デンマークなどの多くの国々で、新たに建設する建物で電気を熱源として利用することを制限または禁止する法律が成立しています。しかしながら電気は冷却や空調のエネルギー源としてよく使われていて、その分野の需要増が電力需要全体を押し上げています。

電気は電気通信にも使われている。中でも電信は1837年、チャールズ・ホイットストーンとウィリアム・フォザギル・クックが最初に商業化しました。1860年代には大陸間の電信網、さらには大西洋横断電信ケーブルができ、電気によって数分で世界中に通信可能となりました。光ファイバー技術も通信の一部を担うようになりましたが、やはり通信の大部分は電気が担っています。

電磁気学的現象を目に見える形で使っている例として電動機があり、クリーンで効率的な動力源となっています。ウインチなど据え置き型では電力供給が容易だが、電動輸送機器のような電動機自体が移動する用途では、電池を搭載して電力を供給するか、集電装置のような機構で電力を供給する必要があり、移動距離や移動範囲が制限されます。

20世紀最大の発明の一つであるトランジスタは、現代のあらゆる電子回路の基本素子です。最近の集積回路には、数センチ平方メートルの中に数十億個の微細なトランジスタが含まれています。

4.11 日常用語における電気

日常的に電気という場合、下記のように様々な意味で用いられます。電荷または電流（例:「電気が流れる」）電流を流す力（電圧、起電力と同義）エネルギーの一種（電力または電力量と同義）電球、または電気を使用した照明器具の俗称（例:「電気をつける」）電気屋 - 家電製品を販売する店（電器店）。電気そのものを販売しているのは電力会社ですが、一般的にそれを指して言うことはほぼありません。ただし、電気に携わる研究者ないし技術者が自らを「電気屋」と呼称する事はあり得ます。商用電源（電力会社が販売する電力）の俗称

4.12 感電

人間の身体に電圧がかかると細胞に電流が流れ、比例関係にあるわけではありませんが、電圧が高いほど流れる電流も大きくなります。知覚されるしきい値は供給周波数や電流の流れる経路によって異なるが、知覚されやすい周波数でいたい 0.1 mA から 1 [mA] です。ただし条件によっては $1 \text{ [}\mu\text{ A]}$ であっても電気振動を知覚する場合があります。電流が十分強ければ筋肉が収縮し、心臓の筋肉が細動し、熱傷を生じます。電気伝導体が帯電しているかどうかは一見しただけではわからないため、電気は一般に危険なものとされています。感電による苦痛は強烈な場合もあるため、電気は拷問の手法にも採用されてきました。感電によって死に至ることもあります。死刑の手段として感電を使う電気椅子もありますが、最近ではそういった死刑手段は使われなくなる傾向にあります。逆に人工的な電気エネルギーで生体電気現象の復帰を促す治療方法として電氣的除細動がある。

4.13 自然界における電気現象

4.13.1 デンキウナギ *Electrophorus electricus*

電気は人類の発明品ではなく、自然界にも様々な形で見られ、その代表例が放電現象の雷です。放電現象には他にセントエルモの火もあります。触覚や摩擦による静電気や化学結合といった巨視的レベルでよく見られる相互作用は、原子スケールでの電場間の相互作用に起因しています。地磁気は地球の核を流れる電流で生まれた天然のダイナモによって生じていると考えられています（ダイナモ理論）。石英や砂糖のような結晶は、圧力を加えられると電位差を生じます。これを圧電効果と呼び、1880年にピエール・キュリーとジャック・キュリーが発見しました。この効果は可逆的で、圧電性のある物質に電圧を印加すると、その形状が微妙に変化します。

4.13.2 サメ

サメ（とくにシュモクザメ）などの生物は電場の変化を知覚し反応します。これを電気受容感覚と呼ぶ。捕食や防御のために自ら電気を発生させる生物もあり、それを生物発電と呼びます。例えばデンキウナギ目のデンキウナギは筋肉細胞が変化した「発電板」を持ち、高電圧を発生することで獲物を探し麻痺させます。全ての動物は細胞膜に沿って活動電位と呼ばれる電圧パルスが発生させて情報を伝え、神経細胞による神経系によって筋肉まで情報伝達します。感電はこのシステムを刺激し、筋肉を収縮させます。活動電位は特定の植物や動物においてその活動を調整する役目を果たしています。心電図や筋電図はそういった神経系の電位差を測定して図示するもので、脳波は脳内の電気活動を間接的に測定して図示するものです。

4.14 文化と電気

4.14.1 ラボで実験をするニコラ・テスラ

19世紀から20世紀初めにかけて、産業が発達していた西洋においても一般大衆にとって電気は日常生活の一部ではありませんでした。当時の大衆文化では電気を不思議な魔法のような力として描くことが多く、生きものを殺したり、死者を蘇らせたり、自然の法則に反する力を発揮するものとして描かれていました。そのような見方は1771年、ルイージ・ガルヴァーニが動物電気を応用して死んだカエルの脚をけ痙攣させる実験を行ったことに端を発しています。そして、明らかに死んだ人間が電気の刺激で息を吹き返したという話がガルヴァーニの研究のすぐ後に医学誌に報告されました。『フランケンシュタイン』(1819)を書いたメアリー・シェリーもそれらの話を知っていましたが、彼女は怪物を生き返らせた方法について特に固有名詞を挙げていません。電気を使った怪物の復活は後のホラー映画の定番となりました。

第二次産業革命の生命線として電気が徐々に大衆にもなじみのあるものになっていくと、肯定的に捉えられることが多くなっていきました。ラドヤード・キップリングは1907年の詩 *Sons of Martha* で、電気に関わる技師について "finger death at their gloves' end as they piece and repiece the living wires" (手袋の端で死に触れ、生きたワイヤーを繕う) と記しています。ジュール・ヴェルヌの作品や《トム・スイフト》ものなどの冒険小説では、電気を動力源とする乗り物が重要な役割を演じました。トーマス・エジソン、チャールズ・スタインメッツ、ニコラ・テスラといった科学者も含めて、実在か架空かを問わず電気に精通した人は一般に大衆からは魔法使いのような力を持っているとみなされました。

20世紀後半には電気は物珍しいものから日常生活に不可欠なものへと変貌し、なんらかの災害が起きたことを示すことの多い「停電」のときだけ注意を惹くようになりました。停電がおきないよう電力網を維持している作業員たちはジミー・ウェップの楽曲 "Wichita Lineman" (1968) で無名のヒーローとして歌われています。

第 5 章

電気理論の分類

電気全体を分類することは非常に難しく、未だに完全な形の分類方法は見つかっていません。極端な言い方をすると人知を越えた課題だと思えます。

電気分類はその体系によって、電気の世界をどのように理解するかあるいは理解できるかという観点において非常に重要です。

今考えられている分類について、いくつか述べておきます。

5.1 アナログとデジタル

ここではアナログとデジタルの差についてまとめておきます。

5.1.1 アナログとデジタルの違い

アナログは信号波形の上から下まで使いますが、二値論理のデジタルの場合には一番上と一番下だけを使います。昔は二値以外の三値などを使いましたが、今は二値論理に集約されました。

二値論理の場合最高値と最低値だけが必要なのでシミュレーションなどもアナログの複雑なプログラムと異なり非常に簡単なプログラムとなります。確かにデジタルでは最高値と最低値が重要で、波形が通常のパルス波形が用いられています。信号が高速になるとパルスが遅れてくることになり、どの程度遅れるかという遅延時間も重要になってきます。またパルスのオーバーシュートやアンダーシュートも高速になるほど重要になってきます。

5.1.2 計算機

計算機も初期段階ではアナログ計算機とデジタル計算機とがありました。アナログ計算機とはオペアンプつまり演算増幅器を用いた計算機のことです。今では殆ど使われなくなっていますが、一部計測器などで使われています。デジタル計算機も最初は多値論理でしたが、今は二値論理になっています。

計算機の発展は凄まじいものがあります。これについては様々な解説書が出版されていますので、それらの本を御覧ください。ハードウェアやソフトウェアの変遷も毎年のように変化しています。

5.1.3 回路から見たアナログとデジタル

電気理論としてアナログとデジタルに分かれています。デジタル回路技術者と言われる電気回路技術者が居るかという、デジタルを扱っている技術者は電気の知識よりも数学者というか、二進法の論理技術者あるいはデジタルを扱えるプログラマといったほうが当たっていると思います。なぜならデジタル回路を設計もしくは解析するための知識は電気の知識ではなく、二進法やプログラムのアルゴリズムを知っておくほうが重要だからです。

デジタル回路に不具合が起こったとき電気の知識が必要になりますが、その知識を持っているのはアナログ技術者なので、電気技術者としてはアナログ技術者しかいません。日本は1990年頃から研究所でも企業でもデジタルに重点が置かれるようになり、アナログの方は軽視されるようになってきました。しかし欧米ではアナログはデジタルと同じように重要視され、その結果日本のアナログ技術は1990年ぐらいからほとんど進歩していません。この現象は日本にとって由々しき問題だと思えます。

5.1.4 スペクトラム拡散方式

スペクトラム拡散方式は1941年女優のHedy Lamarrによって米国特許2,292,387として登録されました。Lamarrは年老いた武器商人の見せかけの妻として活躍していた人です。

後色々改良が加えられましたが、基本は任意のパルス列によって音声を変調し、そのの高周波で変調し電波として飛ばしています。

特許は米軍に無償提供され、最初は米軍の無線通信用として、のちに衛星通信として用いられました。特許が切れた後民間で携帯用として大普及をしました。大普及した理由は主に、次のような理由からです。

- パルス列を色々変えることにより、無限に近い変調波が得られる
- 雑音に埋もれるほど微弱な電波でも変復調が可能
- 混信がほとんど無く盗聴に強い

このようなことから世界中のすべての人が、混信もなく携帯を使っています。また微弱な電波でも通信が可能であるため、ビルの影や地下でも通信が可能になります。

5.2 機能による分類

この分類は、増幅器、発振器、変復調気などに分類する、過去において良く用いられてきた分類方法です。この分類方法は今でも使われていますが、この分類方法で全てが説明できるわけではありませんし、いろいろな矛盾も含まれています。

5.2.1 受動素子だけの電気回路の場合

電源、R、L、C、M、等の素子、それらの組み合わせである等価器、フィルタ等に分類されます。

回路合成においては抵抗だけの単品による解析と合成、次に二素子による回路の解析と合成、さらに三素子による回路の解析と合成という分類も行われています。

5.2.2 能動素子を含んだ電子回路の場合

機能分類のところで述べましたように、増幅器、帰還回路、発振器、変復調器、フィルタ等の機能によって分類しますが、これら各々の機能毎に膨大な研究があり、この分類だけでは全てを把握することは出来ません。またこれらの分類間で、お互いに密接に関連し合っており、かなり重なる部分があります。

この分類が不十分なところとして一つの例をあげますと、エミッタ側（MOSの場合はソース）に抵抗のみを含んだ増幅器を考えます。この回路は単純に増幅器として考えられるばかりでなく、エミッタの抵抗に生じる電圧は入力側にも出力側にも関係していることからわかりますように、抵抗が帰還電圧となっています。つまり単に増幅器と言うばかりでなく、帰還増幅器にもなっていることがわかります。つまりこの回路は増幅器に分類されるのか帰還増幅器に分類されるのかはっきりしないこととなります。

5.3 信号の位相の数による分類

取り扱う複数の信号のあいだの位相に基づいて分類できます。ここでは正弦波について考えます。

単相回路 正弦波信号が一つの信号だけの回路

多相回路 位相がずれた複数の正弦波を考える回路

5.3.1 単相回路

単相回路の代表的なものは、家庭用の電源です。電源コンセントの穴は2個ありますが、電気が来ているのは片方だけでもう一方は地面につながっており、電気は来ていません。

日本での電圧の実効値は100ボルト200ボルトの二種類があります。エネルギーが同じであれば、200ボルトにすると電流が半分ですみますので、電線の太さを半分にしても電流密度が同じになるため電線の節約にもなります。

5.3.2 多相回路

多相交流の代表としては、三相交流があります。この信号は一般家庭にも供給されていますが、工場などに供給されています。

三相交流は120度位相がずれた三個の正弦波で供給されており、三つの交流を加え合わせると電圧がゼロとなる特徴があります。

三相交流も実行電圧が100ボルトと200ボルトが提供されています。100ボルトはあまり用いられていません。

5.4 極の数による分類

Guillmin 他の学者によって提案されました。0次、1次、2次、3次・・・の極を持つ回路に分類。具体的には0次として、Rのみを含む回路。1次として、RCまたはRLのみを含む回路。2次の回路として、LCのみ、あるいは損失があるRLCを含む回路等の分類です。

5.5 線形・非線形による分類

Leon Chua による分類です。抵抗器自体は、線形回路として扱われますが、その抵抗の概念を拡張して負性抵抗自体も同じ範疇として扱います。トランジスタ自体も見方によっては抵抗として扱われています。

この分類方法は非常に興味深いのですが、分類すること自体が難しく定着しそうになさそうです。

5.6 機能回路を組み合わせる分類

電源、負荷等の基本機能の上に何らかの動作を行う機能分類があり（例えば増幅器、発振器、変復調器など）さらにその上の機能としてPLL、フィルタが存在し、それらを組み合わせると無線機、TV、VTRが存在するという分類です。

このような分類はデジタルにおけるセルと同様にアナログセルと呼ばれています。うまく分類できればアナログセルだけの集積回路が出来るようになるのですが、各社試みはしたのですが結果的にはうまくいきませんでした。

5.7 電圧モード・電流モード

回路を考える場合電圧で考えるか、電流で考えるかによって分類する方法です。人類にとって電流よりも電圧で考えるほうが理解しやすいようです。よって電圧で回路を考える方法が先に発達し、近年になって電流によって回路を考える方法が発達しました。資料[20][21]

5.7.1 電圧モード

完全に電圧だけで動作する回路は存在しませんので、厳密に分類することは難しいのですが、その例としてオペアンプなどに用いられる能動負荷があります。能動負荷とは抵抗やコイルなどの受動素子を増幅器の負荷として使うのではなくトランジスタを負荷として用いる回路です。負荷がバイポーラのコレクタあるいはMOSのドレインとなっている場合、電圧で考えてしまうと無限大に近い振幅となってしまいますが電流で考えることにより有限の値で計算できるようになります。実際の回路は帰還が掛かっているので無限大に近い電圧とはならないのですが、電圧でこの値を考えることは難しいため、電流を用いて考えるということです。

電圧モードの特徴としては、利得と帯域幅を掛けたいわゆるGB積は一定となります。

つまり利得を下げると帯域が大きくなります。逆に帯域を狭くすると利得が上昇します。

5.7.2 電流モード

電流モードの回路はトランスリニアと言われ Gilbert 原理 [20] と呼ばれる原理に基づいて解析設計されます。[21] この Gilbert の原理のような原理に基づいて解析設計しないと回路を考えるのは難しくなります。

トランスリニアの主な特徴は、次のようなものです。

- 入出力は線形で、回路の中は非線形で動作
- 1 [V] 以下のような低電圧で動作可能
- GB 積が一定ではなく、高利得で広帯域の回路が実現可能

5.8 素子の変化による分類

回路の分類とは多少異なりますが、素子の変化による分類ということもあります。素子の進化ではなく変化と述べたのは、素子そのものは真空管から半導体へと変化していますが、真空管は今でも使われており用途によって古い時代に発明されたものも今でも使われているからです。例えば真空管は今でも音響機器もありますが、身近なものとしては電子レンジに使われている真空管は今でも大量に生産されています。そのような様々な素子についてここでは述べています。

5.8.1 真空管

能動素子として初めて発明されたのが真空管でした。これはアインシュタインのノーベル賞受賞にもなった金属を熱すると金属からの電子が放出されるという現象に基づく発明です。

真空管は構造上大きな体積が必要であるため、どうしても高い周波数を扱うことが難しくなります。真空管の小型化が追求されましたが数百 MHz ぐらいまでの周波数しか扱えません。よって音声機器などでは大きな振幅では高周波数が通過しませんので、どうしても低音しか増幅できず、その結果柔らかい音になってしまいます。それがまた良いという視聴者が居るようです。

この真空管の発明の中で、非常に有名な高信頼管という発明があります。これは第二次大戦においてアメリカ軍が発明した真空管です。この真空管を大砲の弾の先端に電波を発生する装置の部品として用いられました。大砲の弾は、それまである高度に達したら自動的に爆発するように作られていましたが、高信頼管を使うことにより飛行機が近づいたら自動的に爆発するように改良されました。こうすることにより人間の感を頼りに闇雲に撃っていた大砲が、あまり考えなくても飛行機の撃墜が出来るようになったのです。日本軍の飛行機にとって大打撃を与えることとなりました。

マグネトロン（電磁管）

レーダーや電子レンジで使われています。これは確かに真空管に分類されるのですが、先に述べた電子の移動を使う真空管とは原理的に異なります。この真空管は熱放出

された電子に磁場を掛け、電子を折り曲げることによって生じる電磁波を利用しています。折り曲げると加速度が発生しますので、それによって電磁波が発生することになります。

この電磁波はかなり高い周波数を発生させることが可能です。電子レンジの場合 $2.4 [GHz]$ を使っています。この周波数は水の分子と共鳴を起こすことができます。電子レンジが加熱できるのは、この原理を用いて水の分子を激しく振動させ、その結果高温になります。

5.8.2 バイポーラ・トランジスタ

バイポーラ・トランジスタはベース電流によってコレクタ電流を制御しています。

高電圧用

高電圧用バイポーラ・トランジスタは電界の集中を避けるような構造とすることによって実現可能です。一般的な形状としてはメサ型と呼ばれる台形の形状にすることによってある程度実現可能です。

特殊なものとしてはサイリスタがあります。これは PNPN 構造となっているので、小信号で用いられている NPN や PNP 構造とは異なりますが電車などにサイリスタ・チョッパとして用いられています。これは電車のモータに流す電流を徐々に変化させ、電車の発車における速度を徐々にしかも滑らかに上げることができます。

大電流用

大電流を実現するには、電流密度を下げる必要があります。電流密度は電流を面積で割った値ですので、電流密度を下げるには面積を増やす必要があります。ただ単純に面積を増やすと半導体内部の不均一のためと電流同士は反発力がありますので、いくつかの部分に分けて構成する必要があります。例えば一個のトランジスタを十個のトランジスタで構成するなどの工夫が行われます。それでも十個のトランジスタが全て同じ構造にはなりませんので、エミッタ側に小さい抵抗を挿入することによって電流のばらつきを無くす工夫が行われます。

電流が集中するとその部分が周囲より高温となり結晶が破壊されます。また電流同士が反発するのは同じ電荷の粒子が流れていますので、お互いに反発することになります。

5.8.3 MOS

MOS の場合もバイポーラ・トランジスタと同じようなことが起きるので、大電圧や大電流に対する対策も同じです。

バイポーラのベースと異なり MOS のゲートは漏れ電流以外の電流の入出力はありませんのでかなり大きな値の高抵抗を示します。このことはゲートのところで高い誘電による電圧上昇が起きることを意味しています。その結果低めの値を持つ何らかの方法で抵抗値を下げておかない場合には、異常発振が起きやすい回路となってしまいます。

更にゲートの厚みは結構薄いためゲートの厚み方向に大きな電圧が印加されやすく、静電破壊を起こしやすくなることに注意する必要があります。

ここではバイポーラ・トランジスタで述べた内容では無く、MOS の二乗特性と指数特性とを次に簡単に述べておきます。

高電圧用

高電圧用 MOS と言っているのは二乗特性を利用した MOS 回路のことです。日本では MOS といえばこの二乗特性しか殆ど知られていません。

バイポーラ・トランジスタの場合資料 [3] のように、トランジション周波数を使われている周波数で割った値が 100 以上の場合、簡略化モデルを用いることができますが、MOS の場合も全く同様に簡略化モデル [3] を使うことが可能です。

低電圧用

低電圧用 MOS とは指数関数特性を持った MOS を用いた回路のことです。この特性は日本では殆ど知られていませんが 1 [V] 以下のような低電圧の状態では指数関数特性となります。この特性は欧米では 1970 年の頃にはよく知られておりアナログ回路が MOS アナログになってからは、殆どの商品が低電圧用の MOS 回路となっています。

低電圧で指数関数が現れてもバイポーラで使われた簡略モデルを構成することは可能です。

第 6 章

電気基礎の疑問

ここでは、一般的に知られ事実と思われている電気知識が、実は意外にも事実と異なっている事柄について述べています。

6.1 電気の世界

このことは以前にも述べましたが、電気の世界では電圧や電流も存在しない領域があります。この事実を説明するためには電磁気学の基本式であるマックスウエルの方程式から導く必要がありますが、ここでは簡単に概要だけについて述べておきます。

それは電圧や電流が定義できるのはマックスウエルから導かれる三つの波 TEM 波、TE 波、TM 波の中で TEM 波と呼ばれる波だけが電圧や電流を定義できます。残りの TE 波、TM 波では電圧や電流の定義はできません。これら二つの波はエネルギーや電界、磁界によって取り扱う必要があります。

電圧や電流が存在しない事例として身近なのは電波でしょう。電波は電圧や電流は存在しなく、その代わり電界と磁界が交互に現れながら進行します。

この著書では TE 波や TM 波については扱いません。TEM 波のみについて取り扱います。TE 波や TM 波については、市販のマイクロ波の本などを御覧ください。

6.1.1 集中定数素子

TEM 波はさらに集中定数と分布定数とに分けることが出来ます。集中定数は幾何学的に表現すると大きさが無い点として表現できます。それに対して分布定数は集中定数の点が多く集まったものとして表現できます。

別の表現をすると、集中定数では一方から入った信号は同時刻に他方から抜け出し、分布定数は有限の時刻で抜け出すと表現することが出来ます。

証明は省略しますが、これらのことを式で表現すると次のようになります。[3]

$$\frac{\omega l}{c} \ll 1 \quad (6.1)$$

式の中の定数は、次の意味があります。

l : 物質の長さ

ω : 角周波数

c : 真空中の光の速度、物質の中では値が変わります

集中定数素子は、よく知られている素子として抵抗、容量、コイル、電源があります。これらの名称は実際に使われている素子と同じ名前になっていますが、電気理論での素子と実際の素子は全く別物です。現実の実際に使われている素子は、一方の端子から入った信号は必ず有限の時間の後他方の端子から出力されます。つまり実際に存在している素子は必ず分布定数なのです。このことは回路を考える人にとって非常に重要なことです。回路を考える人は回路理論上の集中定数素子を使って、どのようにして実際の素子を使い回路を表現するかということになります。

6.2 電圧について

詳細は電磁気学の本を参照していただきたいのですが、ある点から別の点までの電界の線積分は電位差と定義されています。

6.2.1 電圧とは

電圧自体の意味は、力学と比較しますと、単位電荷当たりの位置エネルギーに相当します。単位は、電気特有の単位を用いボルト [V] です。

ただし物理の場合と同様に、絶対的基準は存在しなく基準点は任意の点を考えてかまいません。何も指定しなければ通常地球を基準とします。回路の場合は地球よりもたくさんの回路素子が集まっている点を考えるのが普通です。例えば電源を使っている場合マイナス側です。音楽を扱う場合にステレオにするため二つの電源を使っている場合には、二つの電源の接続点を基準点とすることが多いようです。

基準点の電圧は、取り扱いを簡単にするために通常 0 [V] と決めるのが普通です。

6.2.2 電圧の種類

電圧は電界の線積分だと言いますが、電気理論において電圧は二種類あります。一つは枝電圧 (branch voltage)、もう一つは端子電圧 (node voltage) です。

枝電圧と端子電圧とは電気理論において独立した概念として扱われますが、枝電圧が決まると端子電圧も決まります。逆に端子電圧が決まれば枝電圧も決まります。

回路の方程式を求めるとき、枝電圧だけを用いて記述することが可能です。また端子電圧だけを用いて記述することも可能です。枝電圧だけの式の中に端子電圧を含ませる必要はありません。逆に端子電圧だけの式の中に枝電圧を含ませる必要もありません。

独立した枝電圧の数と独立した端子電圧の数は通常異なります。その結果どちらを選ぶかということにより必要な方程式の数が異なってきます。必要な方程式の数が異なるということは一見矛盾が含まれているように感じるかもしれませんが、矛盾は生じません。この点については回路理論の専門書を御覧ください。[17]

6.3 電流とは

ある面を単位時間当たりには通過する電子もしくはイオンの量のことを電流と読んでいます。単位は、アンペア [A] です。さらにその電流が通過する面積で割った値つまり単位面積当たりの電流のことを、電流密度と呼んでいます。

電流や電流密度はともに重要な言葉ですのでしっかりと区別しておく必要があります。

6.3.1 電流の種類

電気で扱う電流には、二種類あります。一つは枝電流 (branch current)、もう一つは閉路電流 (loop current) あるいは二次元回路*1の場合網目電流 (mesh current) と呼ばれることがあります。

回路の方程式を求めるとき、電圧の場合と同様に枝電流だけを用いて記述することが可能です。また閉路電流だけを用いて記述することも可能です。枝電流だけの式の中に閉路電流を含ませる必要はありません。逆に閉路電流だけの式の中に枝電流を含ませる必要もありません。

独立した枝電流の数と独立した閉路電流の数は通常異なります。その結果どちらを選ぶかということにより必要な方程式の数が異なってきます。電圧の場合と同様に一見矛盾が含まれているように感じるかもしれませんが、矛盾は生じません。この点については回路理論の専門書を御覧ください。[17]

電圧は二種類、電流も二種類存在することを述べましたが、回路の問題を解くために方程式として、これら四つのうち一つを選んで方程式を作れば回路の問題を解くための方程式として十分です。

6.4 電圧と電流の関係

先程の電圧・電流の意味から分かりますように、電圧と電流の間には特に関係は無く全く別物です。オームの法則を電圧と電流の関係式と考えている人が日本では多いのですが、まずはじめにオームの法則は、物性の法則であって電気の法則ではありません。ましてや法則とも呼べないものです。電圧と電流は一般的に非線形であり、比例する関係は特殊な場合だけです。欧米ではオームの法則とは呼ばずに、電圧と電流の関係式と呼んでいます。

一般的に電圧と電流は非線形となります。非常に幅の狭い電圧（もしくは電流）を考えると電流（もしくは電圧とは）近似的に線形とみなすことが出来ます。線形であるとみなせる回路においては回路解析や合成は非常に簡単に扱うことが出来るようになります。このことから回路を線形として扱うことがよく行われますが、非線形を積極的に用いている発振器やトランスリニアの場合はそれらの回路形式に対応した取り扱いをする必要があります。

6.5 電気におけるエネルギー

電気回路の基本はエネルギーの形を変化させたり、エネルギーを大きくしたり小さくすることです。よく勘違いされることは、回路の目的がエネルギーではなく電圧や電流を大きくすることと思っている人が多いことです。このことは完全に勘違いです。例えばスピーカを駆動する回路では、スピーカの抵抗が小さい値であるため電圧をかなり小さくする必要があります。しかし電流はスピーカを駆動するためには大きな電流が必要です。つ

*1 二次元の平面だけを用いて回路が画ける回路のことです。

まり電圧と電流をかけ合わせた電力つまりエネルギーは十分大きな値を必要としています。つまりスピーカを駆動する前の増幅器は電圧だけまたは電流だけを大きくするのではなく、電力を大きくしていく必要があるのです。

それに対してマイクロ波ではエネルギーで設計や解析が行われていますが、周波数が低いところでは電圧や電流で設計や解析が行われているので、電圧や電流を変形することが電気回路の設計や解析ではないだろうかと思っている方が多いのだと思います。

周波数が低い領域でマイクロ波回路のように最大エネルギーが得られるようにエネルギーを用いて回路設計をしますと、ほぼ確実に異常発振が起こります。

最大エネルギーでの設計ではなく、小さめのエネルギーで設計すればと思われるかもしれませんが、どの程度のエネルギーを選ぶべきかを定める手段がありません。つまりエネルギーではなく、電圧や電流を用いて設計せざるを得ません。それでも場合によっては異常発振が起こることがあります。

この異常発振は通常高い周波数で発生します。周波数が高ければ高いほど、寄生素子の影響が大きくなるためです。つまり高い周波数において位相の回転が大きくなり、正帰還が現れてくるからです。この位相の回転は信号振幅つまり信号の絶対値にも現れてきます。低周波の方から平坦に高周波の方まで伸びている振幅が、異常発振が起きやすくなるところで盛り上がっています。このような振幅の盛り上がりを低下させることによって異常発振を防ぐことが出来ます。

6.6 電源って何

エネルギーを直接供給する電源は存在しません。電圧や電流を供給する電源しか実現できません。

電源とは電力(単位時間当たりのエネルギー)を供給する装置です。電圧だけしか供給できなく電流をほとんど供給できない電圧源は電源とは言えません。また電流だけしか供給無く電圧を供給できない電流源は電源とは言えません。よって電気理論での電圧源は、電圧が一定で無限の電流を供給できる電圧源を定義しています。同様に電流源は一定の電流で無限の電圧を供給できる電流源を定義しています。

6.6.1 乾電池は電圧源それとも

乾電池は、電圧源を使っても電流源を使っても表現することが出来ます。このことから乾電池は電圧源でもなければ電流源でもありません。ただ少々エネルギーを消費した後も電圧の値はあまり変化しないという性質を持っているので、電圧源とみなすことが多いのだと思います。

電圧源に似たような装置あるいは電流源に似たような装置を実現することは可能です。電圧源に似たような装置の方は比較的簡単に実現することが可能です。乾電池や車のバッテリーがそのような例です。電圧源に対して電流源の方は、回路的に構成する場合が多く実現することが少し面倒になります。このことも人間にとって電圧よりも電流を基本に難しくしている一つの原因でしょう。

第7章

電気理論の基礎的思考

この章では今まで述べてきました電気に関する知識が、日本ではまるで百科事典のような進化をしている理由について考えたいと思います。

百科事典のような進化というのは理路整然と理論の漏れが少ない状態で進化していないことを意味しています。つまり本で例えると、章・節・段落・本文で構成されているとすれば、章と節だけで終わっているような進化の仕方をしている感じです。

これが一体どういう意味なのか具体的に例をあげて、少し詳しく話をしていきます。

7.1 東洋と西洋

東洋と西洋とを比較するにあたって代表的な人物として、東洋では孔子、西洋ではソクラテスがあげられると思います。

孔子には論語をはじめ多くの著作がありますが、それらに共通して言えることは一見真理であるように見える数々の言葉をじっくりと考えると多数の条件が必要だったり、真理とは異なる場合が多数存在しています。

どの様な例でも構いませんが、例えば「友遠方より来る、愉しからずや」はある特殊な例にしか適用できないこと、あるいは逆のことも存在することは、説明するまでもなく明確だと思います。

また別の言葉で「子曰く、君子はその言の、その行に過るを恥ず」この意味は「君子は自分の言うことが、行為以上になることを恥じる」ということのようにですが、世の中そんなに単純に判別できるとは思えません。また君子にしても何を持って君子であるとか、君子と言える人が居るのかさえ明確ではありません。

この様に深く考えなければあたかも真理と感ずることも無く、よくよく考えると真理とは思えないことばかりです。西洋でソクラテスを代表者として取り上げたのは彼の研究姿勢にあります。ソクラテスは生涯「正義とは何か」を追求しました。本人は著作がないのですが、彼の弟子であるプラトンによってその思想が残されています。そしてソクラテスは世界で最初に「正義」の意味を見出した人物であると言われています。

以上の説明から想像できますように東洋はなんとなく真理らしいということに対して、西洋は追求をやめようとせず、真理に到達するまで追い求める、という点が全く異なります。

この体質は今でも続いており、あらゆる面にその影響が出ているように思われます。もっと具体的に、次に説明していきます。

7.2 日本の教育

明治依頼日本は諸外国に追いつき追い越すため、あらゆる知識の習得に務めました。しかしその習得方法は知識が膨大であるだけに表面的な内容に限定せざるを得なかったように思います。たうまり知識の由来まで追求するには個人的に時間がなすぎからです。

具体的例として早急に知識を取り入れるために、未だにより実践的な内容に限定し、基礎部分がほとんど無視されている分野もあります。例えば日本では QC(Quality Controll) とか CA (Cuality Analysis) の本や雑誌は多数出版されていますが、それらの基礎学問でもある信頼性工学の本や雑誌はほとんど出版されていません。

信頼性工学はナチスドイツによる V2 ロケットの信頼性を計算するために考案された学問ですが、その日本語版は昔の通産省職員の塩見という人によって書かれましたが、同じ意味の言葉がページが離れると別の記号が用いられたり、意味不明の内容が多いのですが、市販されている信頼性工学は未だにこの本しかありません。

欧米では学会でも一つの分野として今も研究が続いています。信頼性工学の一つの応用例として、何千もの電球あるいは蛍光灯が使われている建物を考えてみます。最初に証明を点灯すると、ある時間経過後にほぼ同時にすべての照明等が使えなくなりますが、使えなくなった証明を次々と取り替えていくにつれ交換する照明灯の数は平均化されていきます。つまり交換する時間間隔が同一に近づくのです。この現象はまさに信頼性工学によって証明することが可能なのです。勿論ロケットのような複雑なシステムの信頼度も計算可能です。この様に信頼性工学は非常に重要な学問で、QC や QA はその応用の一部に過ぎません。

未だに日本で紹介されていない知識も存在します。例えばトランスリニアとか入力インピーダンスゼロで出力インピーダンス無限大のオペアンプなどの回路とか指数関数で動作する MOSFET 理論などです。これらの技術は欧米では当たり前のように商品化されていますが、日本ではほとんど知られていません。

7.2.1 教科書や市販本

欧米の先進的な知識を取り入れるため、明治初期から多数の訳本が出版されました。専門的な知識を日本語訳することに対しても、まず当てはまる日本語が存在しない場合が多く日本語の奇妙な言い回しになる場合もあったようです。また英語も直訳が多いため、日本語になっていない訳本もかなりあるようです。これらのことは電気に関することばかりでなく、あらゆる分野で見られます。

例えば「イーノックアーデン」という小説がありますが、その訳本は読んでも理解できず、結局原本を読んで初めて理解できるという状態です。同じようなことが電気の専門書にも多数見られます。

日本では出版社自体が文章よりも絵や図を重要視する傾向があることと販売部数を多くしようという傾向が強いため、専門書が出版されにくいという欠陥があります。欧米の場合新しく発明された理論をたとえ販売部数が少なくても出版してくれる出版社が昔から伝統的に存在するようです。

また日本では専門家ではない人が執筆することが多いのも特徴かもしれません。電気に

についてはアマチュア無線の関係からか素人に近い人が出版することも多いようです。例えばパソコンに関する本の場合、その内容が例えば回路シミュレーションなどの場合、本をプログラム・エンジニアが執筆することが多いのですが、出来上がった本は電気理論から外れた内容となっています。

日本の本の特徴として、ある課題に対する説明が不十分で抜けが多いようです。そのため一つのテーマについての本のページ数が少なく殆どの本はせいぜい 300 ページ程度となっています。同じテーマでの欧米の専門書は多くの場合 500 ページ以上あるのが普通です。

7.3 日本の商品開発

50 年ほど前はそれほどではありませんでしたが、今は商品の品質も向上し日本製は世界から称賛されるほど品質が良くなっています。これはひとえに日本人の生真面目さと、安い給与により商品の価格が低く抑えられた結果だと思えます。その結果当時アメリカのゼニスやヨーロッパのフィリップスなどが世界のシェアをかなり占めていたにも関わらず、徐々に日本製が世界的にもシェアを向上させてきました。

ただテレビにしてもビデオやそのほかの製品であっても日本独自に発明された製品はほとんど無く最初の発明は欧米ばかりです。これは製品にとどまらず、計測器も最初は HP やローデシュバルツなどの計測器が主に用いられています。今ではかなりの計測器が日本製となっていますが、最先端の計測器は今でも欧米製です。IC であっても最先端の製造技術や製造するためのソフトウェアは欧米から購入しています。

しかし日本製の商品が世界を席巻しているのはやはり日本人の勤勉さと労働賃金の安さおよび高学歴の人材が生産現場に配属されている、この三つが大きいと思えます。逆に欧米での生産現場はこの三つが全く反対になっています。

7.3.1 東アジアの商品開発

日本の賃金が上昇するにつれ、生産拠点が韓国へ移動し、その後中国それから東南アジアへと移動しています。韓国へ移動した時代は日本から全てのあらゆる製造工程での手厚い教育支援と資金援助および日本から韓国への技術および経営に関する人の派遣が行われています。

今でも韓国企業は韓国政府から手厚い資金援助を受けており、かなり低い原価コストで商品の製造をすることができます。その分安い価格で輸出が可能となっています。

中国の場合、中国で生産する外国企業は製造に必要な製品技術が無償で中国企業に開示しなければなりません。要するに開発費ゼロということですので、中国企業の製品は格段に安い商品を世界に供給できることになります。これが近年中国が急激に経済大国となった大きな理由です。

東南アジアは今からのいわゆる発展途上国ばかりですから、これからの動向を注視していく必要があります。特にインドは人口も多くソフトウェアの開発力に関しては今でもトップクラスです。今後大きく発展してくるものと思われます。

7.3.2 欧米の商品開発

欧米の商品開発は、今も昔も変化していないように思われます。今もオリジナルの製品開発は続いています。しかし今のアメリカは「アメリカファースト」とい奇妙な思想のため移民の排斥などにより急速に開発能力が低下しているように思えます。アメリカの研究および製品開発力が移民によるものだとすることを忘れていてのではないのでしょうか。

第 8 章

回路について

8.1 アナログの体系

一つ一つの機能で見ますとアナログというのも比較的デジタルのように体系が取れているように思えます。ここで機能と言っているのは、例えば増幅器の中の帰還増幅器、チョッパ増幅器等の機能です。つまり増幅器というと幾つもの種類があり、それらを全て例え増幅器という一括りであっても体系付けることは難しいのですが、その中の帰還増幅器という括りの中では、比較的体系付けることは易しいという意味です。

しかし例えば帰還増幅器一つ取り上げて過去の様々な研究成果について、ほとんど日本に紹介されていないのが実状であるように思えます。日本で紹介されている内容は実際の理論の内ほんのわずかな部分だけです。多くのアナログ技術者は、それらの内容をほとんど理解しない状態で回路設計を行っているようです。例えば Bode が書いた帰還増幅器の本を読んだ人はおそらく日本にはほとんどいないのではないかと思います。昔に書かれた内容と言うことで、日本では見向きもされていないようです。そこには帰還増幅器の限界についても記述されており、当然回路設計者としては知っておかねばならない内容だと思うのですが。この様な現象は日本人の特質なのでしょう。

アナログの体系がこのように機能という概念で括ることが出来、それより大きい括りでは体系付けることが難しいということは、別にこのこと自体が真実であるというつもりはありません。むしろまだ未知の分野があり、そのことが障害となって大きな括りが得られないのではないかという気がしてならないからです。なぜそのように思うかと言いますと、帰還増幅器という 1 つの機能を考えても、未だに新しい研究発表がなされているからです。このことは帰還増幅器自体全てが完成の域に入っていないということを意味しており、残りの未知の分野によっては体系が大きく変化する可能性を秘めていることを意味しています。

では機能という点から、お互いに無関係かといえ、これもむしろ密接に関係していると言うべきであることは明確なことです。帰還増幅器、チョッパ増幅器と言う様にも増幅器という単語が共通に使われているわけですから。しかし増幅器という括りにしてしまうと、例えば発振器をどのように取り扱うべきかと問題が発生してしまうことです。つまり発振器は、帰還増幅器そのものではないかということです。では発振器も増幅器の一部だと考えるならば、変調器や復調器はチョッパ増幅器の変形だということにもなりかねず、増幅器はアナログ回路と同じ範疇だということになり、結局分類出来ないと言うことにもなってしまうそうです。

そのようなわけで増幅器という括りには、歴史的な観点と動作機能という観点から安易にアナログの一つの分類わけのように考えられてはいますが、あまり適切な分類わけではないような気がします。むしろ帰還増幅器、チョッパ増幅器のような分けの方が好ましいのではないのでしょうか。

8.2 デジタルの体系

デジタル回路の体系は、アナログ回路に比較してすっきりしている感じがします。その理由は、数学および論理学によって組み立てられている部分が多いせいのように思えます。ただ扱う数学がブール代数あるいは整数論であるため、人間にとって理解することが難しいようです。

アナログの場合も同じことですが、情報理論や変調理論が入ってくると、その分だけ取り扱いが難しくなってきます。勿論アナログの場合の方が、デジタルよりも複雑になります。

デジタルとアナログとが混在した状態、例えば PLL、ADC、DAC となると話はもっと複雑になってしまいます。これらの回路は、シミュレーションが非情に難しい回路です。その大きな理由は、極端に離れた周波数を同時に扱わなければならないからです。

デジタルの研究は、未だ始まったばかりです。研究が進むにつれデジタルの世界はもっと広がってくるのでしょうか。メモリは既にテラバイトの世界に入りつつあります。記憶領域が拡大し、処理時間が短くなるにつれ新しい世界がどんどん開けていくのでしょうか。記憶量の増大は、世の中の全ての知識を蓄積でき、そこから簡単に検索できる世界がやってくるでしょうし、処理速度の時間短縮は、アナログ世界の実時間処理を可能とします。これらは画期的な新しいデジタルの世界をもたらします。これらの革新によって、どの様な世界が広がっていくのでしょうか。

8.3 電気について

電気の理論は、特に昔勉強することが嫌だった。その理由は、アマチュア無線の人々の生活というか、何と云えばよいのだろうか、あまりにも人間くさく感じたことが一つ。もう一つは、大学で勉強したときの回路理論と電子回路の教科書が良く理解できず、何十回となく読み返しても少しも頭に残らず、悩んだことが大きい。その結果電気というのは、あまりにも混沌としてつかみ所が無く、場当たりのに発達した学問だという印象しか得られなかったためでした。しかし電気電子回路の理論は、決してそのような場当たりの学問ではなく、きちんと理路整然とした世界であることが分かりました。このことを教えてくれたのが、諸外国の本です。日本の本と読み比べてみると、大きな違いが存在しています。諸外国の本は、その他の学問も同様ですが、理路整然とした説明がなされています。それに対して日本の本は、まるで百科事典を読んでいるような印象を与えます。大きな違いは、日本の本の場合説明が飛んでいると言うことです。途中の説明が無く、問題に対してすぐに結論が書いてあると言う特徴を持っています。しかも必ず答えが合っていると言うことがないので、どれが本当でどれが嘘であるか見分けにくいところがあります。

その典型的な例が、電気ではオームの法則でしょう。日本の本では、未だにオームの法則を電気の重要な法則であると書いています。オームの法則は、法則と呼べないほどの内

容でありしかも電気の法則ではないにも関わらずこのように扱っていることは、全く納得がいきません。オームの法則は、物性理論の近似式に過ぎません。よって法則と呼ぶにはふさわしくありません。電気の中では、必要のないものであって、あるとかえって混乱を生じてしまいます。電気では、電圧と電流とは、別々の独立した概念として扱わねばなりません。

8.3.1 電気理論の進歩

電気理論は、もし学問に完成と言うことがあるとしたら、一体何処まで進んでいるのでしょうか。この質問に対する解答は、全く経験と勘に頼らざるを得ない気がします。私の経験と勘から、かなりいい加減ですけど、完成までの10パーセントぐらいのところを進んでいるような気がします。この数値は全く当てに出来ない数値です。

Translinear が始まったのが、1979年ですからそんなに古い話ではありません。しかしこの理論で全てが終わったわけではないと思います。次に出てくる理論とは、一体なんなのでしょうか。そのようなことが分かったら、何も苦労はありません。しかし常に最先端をにらんでいる人には、そのことがおぼろげながら見えるはずですが。今どのような状態にあるか、何が求められているかということから次の新しい事実が浮かんでくるのだと思います。

8.3.2 今の状況

このことを正確につかむことも、このように複雑な時代となると難しくなっています。デジタル・テレビが当たり前となり、携帯電話、個人のパソコン、インターネットの発達これらの製品を支えている技術とは、何でしょうか。思いつくままに述べてみます。ただし電気に関係するところだけ。

半導体技術 SiGeによるバイポーラ・トランジスタの発明は、安い無害な材料で、既存の技術が使える画期的な技術です。GaAsのように高価で有害な材料とは違う点に大きな特徴があります。

情報理論 現在のIT産業を基礎から支えている技術で、これなくしてはITを語ることは出来ません。

新しい回路理論 ECLやTranslinear回路の発明により今日のデジタル回路を支える基礎理論となっています。

計算機の発達 計算機自体が複合製品であるので、ここに並べることは適切ではないかもしれませんが、その他の学問を急速に発展させた一つの道具として重要な役割を担っています。

8.4 電気素子

電気素子の話をする前に電気の体系について述べておく必要があります。電気を説明する基礎理論は、MAXWELL理論ですが、この方程式を解くと三つの波が出てきます。TEM波とTE波とTM波です。このうち電圧と電流が定義できるのは、TEM波だけです。しかもこのTEM波は、分布定数と集中定数とに分かれます。分布定数素子としてあ

げられるものは、導波管、サーキュレータなどがあります。集中定数としてあげられる素子には、三つあり、抵抗・容量・コイルがあり、現時点でこれ以外の素子は見つかっていません。

これらの素子は、次の物性を表現する三つの式に各々対応しています。

$$\mathbf{J} = \gamma \mathbf{E} \quad (8.1)$$

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E} \quad (8.2)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (8.3)$$

8.4.1 独立電源

その他に電源として、電圧源と電流源が考えられています。電力源というのは、通常使われません。電圧源および電流源には各々直流電源と交流電源とが考えられています。図で表現しますと次のような関係となります。

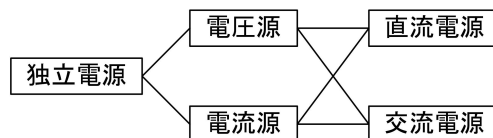


図 8.1 独立電源

電圧源や電流源の直流抵抗は任意の値を取りますが、インピーダンスの場合には、電圧源はゼロ、電流源は無量大と考えられています。これら電源全体を独立電源と呼んでいます。

電圧源の並列接続は、存在することが出来ません。また同様に電流源の直列接続は存在しません。電圧源を並列に接続した場合、全体の電圧が決まらないからです。また電流源を直列に接続した場合、流れる電流が決まらないためです。このことは、小中学校で良く行われている、電池の並列接続や直列接続と勘違いされますので注意が必要です。

8.4.2 従属電源

その他の特殊な電源として従属電源と呼ばれている電源が考案されています。その従属電源として、次の三つが考えられています。

電圧制御電圧源 入力電圧に応じた電圧源が出力として現れる

電圧制御電流源 入力電圧に応じた電流源が出力として現れる

電流制御電圧源 入力電流に応じた電圧源が出力として現れる

電流制御電流源 入力電流に応じた電流源が出力として現れる

これらの電源は、現在非常に特殊な存在と考えられており、トランジスタの内部状態を表す場合などに使われています。

8.5 回路の問題

回路の問題は、一つの回路が与えられたとき、その回路の解釈の仕方は様々な形で与えられます。その点が、回路以外の学問とは非常に異なっている特徴ではないかと思われまます。回路以外の学問でも同様な現象は見られますので、回路の問題独特の現象ではないような気がします。例えば力学において、自然界をニュートン方程式から説明する立場やラグランジアンのような最短経路を取るある関数を考える立場、それからハミルトン関数のように波動的な関数を考えるなど自然界をどの様に解釈するかということによって新しい理論が展開されています。

電気の場合について考えると、例えば次のような回路を考えた場合

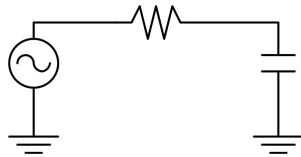


図 8.2 RC 回路

この回路は低域通過回路と考えられますが、一方同じ回路が位相回転回路と解釈される場合もあります。またある場合には、積分器と考えられます。別の解釈をすれば、電圧遅延回路と見なすこともできます。これらの解釈の違いは、その回路の特性を表す周波数領域の特性や時間領域の特性をどの様に解釈するかという判断基準の相違によって現れています。

低域通過回路と解釈しているのは、周波数領域における曲線全体の特徴を利用しています。

位相回転回路と解釈しているのは、周波数領域の利得が低下している点で位相が回転していることを利用しています。

積分器と解釈しているのは、この回路の伝達関数の分母に複素関数 s が含まれていることによります。

電圧遅延回路と解釈しているのは、容量に蓄積される電荷が指数関数に従って変化することを利用しています。

このように一つの回路でも様々な解釈が可能であり、回路技術者は常に様々な立場から回路を見つめることが大事です。

8.6 解への路

一つの問題に対して、解法は一つと考えがちです。合成の問題は、同じ目標に対して幾通りもの解決方法が存在することは、良く言われることです。しかし解析の問題に対しては、それほど声高に幾つもの解決方法が存在するとは言われません。しかしこれは間違った主張です。このことは、次の問題を考えると良く理解できます。

8.6.1 問題例

次の回路図を考えます。問題は、抵抗 R_0 に流れる電流を求めよという内容です。その解答例を述べます。

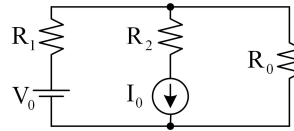


図 8.3 問題

重ね合わせの原理

重ね合わせの原理を用いるために、まず電流源を殺した回路を考えますと、次のようになります。

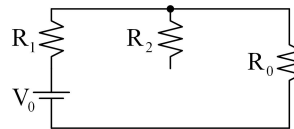


図 8.4 電流源を殺した回路

この回路から、抵抗 R_0 に流れる電流は、

$$I_1 = \frac{V_0}{R_1 + R_0} \quad (8.4)$$

と求められます。次に電圧源を殺した回路を考えると、次の回路図が得られます。

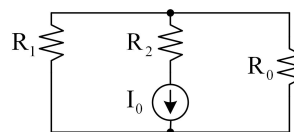


図 8.5 電圧源を殺した回路

この回路図から、抵抗 R_0 に流れる電流は、

$$I_2 = -\frac{R_1}{R_1 + R_0} I_0 \quad (8.5)$$

と求められます。(8.4) 式と (8.5) 式とから、抵抗 R_0 に流れる全電流は、次のように与えられます。

$$\begin{aligned} I_3 &= I_1 + I_2 \\ &= \frac{V_0}{R_1 + R_0} - \frac{R_1}{R_1 + R_0} I_0 \\ &= \frac{V_0 - R_1 I_0}{R_1 + R_0} \end{aligned} \quad (8.6)$$

テブナンの定理

この条件での問題を考えるために、次のような回路を考えます。

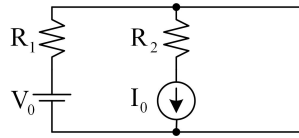


図 8.6 テブナンの定理による解法

テブナンの定理では、この回路を電圧源とそれに直列な抵抗とによって表さねばなりません。まず初めに電圧の値を求めてみます。電圧は、図 8.6 において端子に現れる電圧によって与えられます。この値は、まず電流源を殺したときに現れる電圧、この場合電流源は開放状態ですので、 V_0 と与えられます。次に電圧源を殺した場合、つまり短絡状態のときに生じる電圧 $-R_1 I_0$ が求められます。よって二つの電源によって求められる電圧の値は、 $V_0 - R_1 I_0$ となります。次にテブナンの定理による抵抗を求めなければなりません。これは二つの電源を殺したときに現れる抵抗ですので、 R_1 と与えられます。求めた電源と抵抗を使って回路を描くと、次の図のように与えられます。

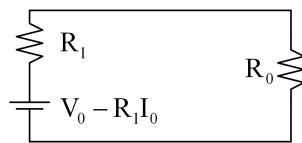


図 8.7 テブナンの回路を用いた回路図

この回路図から、抵抗 R_0 に流れる電流は、次のように求められます。

$$I_4 = \frac{V_0 + R_1 I_0}{R_1 + R_0} \quad (8.7)$$

ノートンの定理

ノートンの定理を用いるために、次のような回路を考えます。

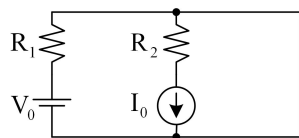


図 8.8 ノートンの定理による解法

この回路で、ノートンの定理による回路を求めますが、テブナンの定理と同様に、まず電流源を殺した回路を考えます。そのとき電圧源によって流れる電流は、 V_0/R_1 と与えられます。次に電圧源を殺し、電流源による電流を考えますと、全ての電流は短絡回路に

流れますので、 $-I_0$ と与えられます。以上から二つの電流が生きているときに流れる電流は、 $V_0/R_0 - I_0$ と与えられることになります。次に求めるのは、電源を殺したときに短絡端子より左に見える抵抗で求められますので、 R_1 と与えられることになります。これらの値を用いて、ノートンの定理を用いた回路図は、次の図のように与えられます。

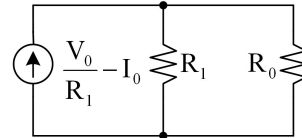


図 8.9 ノートンの定理を用いた回路図

この図から、求める電流は次のようになります。

$$\begin{aligned} I_5 &= \frac{R_1}{R_1 + R_0} \left(\frac{V_0}{R_1} - I_0 \right) \\ &= \frac{V_0 - R_1 I_0}{R_1 + R_0} \end{aligned} \quad (8.8)$$

キルヒホッフの電圧則

キルヒホッフの電圧則を使うために、次の回路のように閉路電流を定めます。

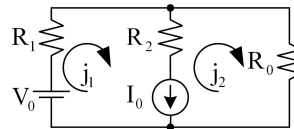


図 8.10 閉路電流を示す図

回路方程式を考えるに当たって、超網目を考えます。二つの閉路電流は、共に電流源を含んでいますので、一番外側の閉路を考え、更に定電流に対して超網目の電流を考えますと、次の式が得られます。

$$-V_0 + R_1 j_1 + R_0 j_2 = 0 \quad (8.9)$$

$$j_1 - j_2 = I_0 \quad (8.10)$$

この二つの式から、閉路電流は、次のように求められます。

$$j_1 = \frac{V_0 + R_0 I_0}{R_1 + R_0} \quad (8.11)$$

$$j_2 = \frac{V_0 - R_0 I_0}{R_1 + R_0} \quad (8.12)$$

求める電流は、 $I_6 = j_2$ となります。

キルヒホッフの電流則

キルヒホッフの電流則を用いるために、次のように端子電圧を定めます。

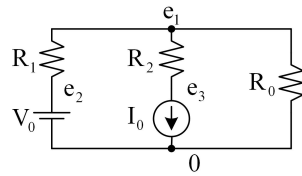


図 8.11 端子電圧を示す図

この図を用いてキルヒホッフの電流則を適用しますが、回路の中に電圧源があるので、超接点の概念を用います。

$$0 = \frac{e_2 - e_1}{R_1} + \frac{e_3 - e_1}{R_2} + \frac{0 - e_1}{R_0} \quad (8.13)$$

$$0 = \frac{e_1 - e_3}{R_2} - I_0 \quad (8.14)$$

$$V_0 = e_2 - 0 \quad (8.15)$$

これらの方程式を解くと、次の結果が得られます。

$$e_1 = -\frac{R_1 R_0}{R_1 + R_0} I_0 + \frac{R_0}{R_1 + R_0} V_0 \quad (8.16)$$

$$e_2 = V_0 \quad (8.17)$$

$$e_3 = -\frac{R_1 R_0 + R_1 R_2 + R_2 R_0}{R_1 + R_0} I_0 + \frac{R_0}{R_1 + R_0} V_0 \quad (8.18)$$

(8.16) 式から、求める電流が次のように得られます。

$$I_7 = \frac{V_0 + R_1 I_0}{R_1 + R_0} \quad (8.19)$$

以上の結果を見比べてみますと、いずれの方法も同じ電流が得られていることが分かります。このように一つの回路でも色々な解法があることが分かります。

8.7 エネルギーについて

集中定数回路においてエネルギーに関する重要な定理としてテレゲンの定理という定理があります。テレゲンの定理とは、次のように述べられています。

k 番目の枝電圧と枝電流を各々 V_k および I_k とすると

$$\sum V_k I_k = 0$$

が成立する。ただし全ての枝について加算する。

この定理は、回路の中に電圧源や電流源が含まれていても問題なく成立します。

この定理は、集中定数であれば回路は外部に対して何の影響も与えないことを示しています。

逆に回路が外部に対して放射などの影響を与えるためには、集中定数という制限をなくす必要があることを意味しています。

8.7.1 抵抗について

電圧源と抵抗とが、並列に接続されている場合を考えてみます。このとき電圧源の電力は、電流の向きが逆であるので、次のように与えられます。

$$p_V = -vi$$

これに対して、抵抗の電力は、次のようになります。

$$p_R = vi$$

これらの式から、電圧源は、 p_V の電力を供給し、それに対して抵抗は、 p_R の電力を消費することになります。これら二つの電力は、厳密に同じ値となり外部に何ら電力を供給しません。抵抗の電力は、熱エネルギーとなって拡散していくことになります。そのエネルギーは、電圧源によって絶え間なく供給されることになります。

このことは、電源が電流源の場合についても同様に考えられます。

抵抗における電力は、伝導率が均一であれば、次のように与えられます。

$$\begin{aligned} p_R &= vi \\ &= i^2 R \\ &= \frac{v^2}{R} \end{aligned}$$

抵抗の電力消費

電圧源あるいは電流源が、次の式で与えられるとします。

$$\begin{aligned} v &= V_{DC} + V_0 \exp(j\omega t) \\ i &= I_{DC} + I_0 \exp(j\omega t) \end{aligned}$$

このとき抵抗における電力は、次のように与えられます。

$$\begin{aligned} p_R &= \frac{V_{DC}^2 + 2V_{DC}V_0 \exp(j\omega t) + V_0^2 \exp(j2\omega t)}{R} \\ &= I_{DC}^2 + 2I_{DC}I_0 \exp(j\omega t) + I_0^2 \exp(j2\omega t) \end{aligned}$$

この式の時間平均を取ると、次の式となります。

$$\begin{aligned} \overline{p_R} &= \frac{V_{DC}^2}{R} \\ &= I_{DC}^2 \end{aligned}$$

抵抗の場合、平均値を取ると電源の直流成分だけが残ることになります。

8.7.2 容量について

容量に蓄積される電荷が時間的に変動している場合、容量に流れる電流は、誘電率が一定で時不変の場合、次のように与えられます。

$$i = C \frac{dv}{dt}$$

この式から容量の電力は、次のように与えられます。

$$\begin{aligned} p_C &= v \cdot C \frac{dv}{dt} \\ &= \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} C v^2 \right) \end{aligned}$$

この式から、電力掛ける時間つまり容量のエネルギーは、誘電率が一定で時不変の場合、次のようになります。

$$E_C = \frac{1}{2} C v^2$$

容量の電力消費

容量の場合の電力について考えます。

$$\begin{aligned} \overline{p_C} &= \frac{1}{2} \frac{d}{dt} [V_{DC}^2 + 2V_{DC}V_0 \exp(j\omega t) + V_0^2 \exp(j2\omega t)] \\ &= \frac{1}{2} C [2j\omega \exp(j\omega t) + 2j\omega V_0^2 \exp(j2\omega t)] \\ &= 0 \end{aligned}$$

容量の場合、電力の平均値はゼロとなります。つまり容量では、電力消費は起こらないことを意味しています。

8.7.3 コイルについて

コイルに生じる電束が時間的に変動している場合、コイルの生じる電圧は、透磁率が一定で時不変の場合、次のように与えられます。

$$v = L \frac{di}{dt}$$

この式からコイルの電力は、次のように与えられます。

$$\begin{aligned} p_L &= i \cdot L \frac{di}{dt} \\ &= \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} L i^2 \right) \end{aligned}$$

この式から、電力掛ける時間つまりコイルのエネルギーは、透磁率が一定で時不変の場合、次のようになります。

$$E_L = \frac{1}{2} L i^2$$

コイルの電力消費

コイルの場合の電力について考えます。

$$\begin{aligned} \overline{p_L} &= \frac{d}{dt} \left[\frac{1}{2} L (I_{DC}^2 + 2I_{DC}I_0 \exp(j\omega t) + I_0^2 \exp(2j\omega t)) \right] \\ &= \left[\frac{1}{2} L (2I_{DC}I_0 \exp(j\omega t) + I_0^2 \exp(2j\omega t)) \right] \\ &= 0 \end{aligned}$$

コイルの場合、電力の平均値はゼロとなります。つまりコイルでは容量と同様に、電力消費は起こらないことを意味しています。

第 9 章

信頼性の簡単な説明

信頼性に関して日本ではあまり重要視されていません。重要な学問であることには間違いはないのですが、信頼性よりも QA とか QC のほうが重要視され、本屋においてもこれらの本が多数並べられています。

信頼性工学についての日本の本は普通産省におられた塩見さんという方の本があるだけです。しかしこの本はいろいろな言葉を表現する記号がページごとに異なっていたり、途中で別の話になっていたりと非常に読みづらい本となっています。この理由は想像するに海外の多数の論文を 1 冊の本にまとめたような感があります。結局読んでもよく理解できない本となってしまっています。

信頼性工学は第二次大戦においてナチスドイツが V2 ロケットの開発にあたって、ロケットの信頼性を研究し始めたことから始まります。最初に信頼性工学の基本的な事柄を簡単にまとめておきます。次に実際の信頼性試験についての基本的な理論について、さらに信頼性試験の具体例について述べていきます。

9.1 信頼性工学基礎

製品やあらゆる生命も同様ですが、最初は初期不良と呼ばれている不良が多く発生します。ある程度時間が経過すると故障の発生が少ない偶発不良と呼ばれる状態が続き、最後に寿命不良と呼ばれる不良が多く発生するという経過をたどります。不良の数を縦軸に、時間を横軸にとってグラフを描くと西洋の風呂を真ん中から切った形によく似ていますので、バスタブ曲線と呼ばれています。

9.1.1 信頼度・不信頼度

故障は偶発に左右されることが多いため、信頼性は確率の考えに従って記述されます。そのためには信頼度・不信頼度の定義が必要です。対象となる製品のうち故障となった製品の数を製品の全数で割った値を不信頼度とします。またその時点で正常に動作している数を全数で割った値を信頼度と定義します。このことから分かりますように信頼度と不信頼度を足し合わせると必ず 1 になります。この事実を用いて確率（正確には確率過程）を適用していけば様々な現象の説明ができるようになります。

直列・並列

電気の直列と並列によく似ているのですが、製品を直列につないだ場合あるいは並列につないだ場合の全体の信頼度不信頼度を求めることが出来ます。

直列につないだ場合の信頼とは、各々の製品の信頼度を掛け合わせることで全体の信頼度が得られ、並列につないだ場合の不信頼度は各々の製品の不信頼度を掛け合わせることで全体の不信頼度が得られます。電気の場合は抵抗の足し算やコンダクタンスの足し算で表現されましたので、その演算が掛け算になった形式となっています。

信頼度と不審ライトの足し算は必ず1でしたので直列での不信頼度や並列での信頼度は簡単に求められることとなります。

面白い例

具体的な証明は信頼性工学の本を読んでいただきますが、信頼性工学の面白い例として、ある大きな建物の蛍光灯について考えますと、次のような面白い性質が信頼性工学で証明できます。大きな建物が出来たとき、そこに新しい蛍光灯を何千本と使ったとします。最初のうち蛍光灯は一斉に故障し始めますが、年月が経つうち故障が時間に対して平坦化されるようになってきます。この様な現象を信頼性工学で証明できます。日本では信頼性工学の本はないのですが、英文では多数発行されていますのでそちらをご覧ください。

9.2 信頼性試験

何らかの製品を世に送り出す場合、その製品がどのくらい時間正常な状態で使えるかを保証する必要があります。要するに製品の寿命を出荷前に知る必要があるということです。その寿命を調べる方法が信頼性試験と呼ばれる方法です。

9.2.1 寿命試験の基礎

手法の基本的考え方は、過酷な状況に製品を置き急激に老化させることによって、製品の寿命を推測するという事です。この信頼性試験の基礎となっている自然法則として、次の二つのモデル式があります。

- アレニウス・モデル
- アイリング・モデル

この二つのモデルの詳細は信頼性工学の本を見ていただきたいのですが、簡単な説明を次に述べておきます。

アレニウス・モデル

製品の劣化が主に温度によって進行する場合について適用されるモデルです。主なパラメータは活性化エネルギーと絶対温度です。活性化エネルギーは故障メカニズムによって異なりますが、いろいろな場合について求められています。このアレニウスモデルによって、半導体などの寿命が求められています。

アイリング・モデル

アイリング・モデルは温度以外に電圧電流や機械的なストレスがある場合について適用されるモデルです。このモデルについても詳細は信頼性工学の本を参集してください。

9.2.2 寿命試験の種類

寿命試験は上記の基礎理論によって裏付けられています。ここでは半導体を中心に述べることにしますが、半導体の場合の基礎理論としては主にアレニウス・モデルが中心となります。

最初の寿命試験は非常に簡単な試験法のみでした。例えば低温状態に長時間置くとか、高温状態に長時間置く、高湿度の状態に長時間放置するあるいは TST(thermal shock Test) と呼ばれる高温と低温な間を行き来させるなどの試験方法です。

現実の半導体は電源が印加されているときには高温（民生用では 125 度、産業用では 150 度）となりますが電源が切れているときには常温（半導体で発情 25 度を考えます）となっています。このことだけを見ると、先程出てきた TST の状態と思われがちなのですが、実は電圧が印加されているときは半導体を保護している樹脂に含まれている水分が樹脂以外の外気に放出され、電源が切れると逆に外部の水分が半導体樹脂に戻ってくるようになります。つまり樹脂で覆われた半導体は、電源を入れる切るを繰り返すと、まるで半導体が息をしているかのように水分を吐いたり吸ったりしていることになります。この現象は TST ではシミュレーション出来ないことになります。その結果高温低温以外に高湿度を組み合わせる必要があります。このように現実の世界を実現するために寿命試験はより厳しい試験方法へと今も変化しています。その結果アイリング・モデルも取り入れていかねばなりません。

9.2.3 破壊試験

温度や湿度以外にも半導体の寿命を縮める様々な要因があります。次のような原因が考えられます。

- 放射線
- 静電気
- 衝撃

放射線

放射線は半導体に対して深刻な影響を与えます。電荷を持った放射線の場合影響はより深刻で、特にデジタルの場合このイオンに依ってビットエラーを生じます。昔半導体の保護をしている樹脂にアルファ粒子を発生する放射線源が含まれていたことがあり、大問題となった経緯があります。その他地球上には宇宙線が常に降り注いでいますので、注意が必要です。ましてや宇宙空間ではさまざまな放射線が飛び交っていますので、より慎重に対策を講じる必要があります。

静電気

すべての導電性のない物質は自己容量のために電荷を蓄積しますので、半導体に対して放電することがあります。半導体に静電気に対して耐性を持たせないと、放電によって静電破壊を起こし半導体の機能が失われてしまいます。

静電破壊は電荷が保存され、放電によって引き起こされるばかりではありません。例えば昔のブラウン管テレビのようにテレビの電源をつけたときなどブラウン化のフィラメントから飛び出した電荷が飛び散って半導体と衝突し、静電破壊を起こすこともあります。

静電破壊を防ぐには半導体内部の電荷が瞬時たりとも電荷集中を起こさないようにすること、もう一つは電界の集中を防ぎ半導体結晶の破壊を防ぐことが必要です。つまり電流密度の低下と電圧の低下です。

この静電破壊に対する対策は様々な方法がありますが、半導体のプロセスの進歩に従って対策方法も様々な方法が考案されています。静電破壊に対する試験方法としてはある値の容量に電荷を蓄積させその電荷を一気に半導体に印加することに依って半導体が破壊されるかどうか判断される場合が多いようです。

衝撃

半導体も実際に回路の組み立てられる前に、製造場所から回路組立の場所まで移動する必要がありますし、また実装された後も様々な衝撃を受けることがあります。そのため落下試験とか振動試験などの衝撃試験が行われます。

その他半導体のフレームが何回の折り曲げまで耐えられるかということも必要になる場合があります。

衝撃試験で有名な例として高信頼管の開発があります。高信頼管とは第二次大戦のときに砲弾の先端の信管に搭載された真空管のことです。真空管を搭載してそこから電波を出し、飛行機によって跳ね返ってきた電波を検知し、飛行機に近づいたとき砲弾を爆発させることが目的です。その様な機能を持った砲弾を発射すれば飛行機を狙って砲弾を打ち上げることも無く飛行機を破壊することが可能になります。この様な真空管は、砲弾を打ち上げた瞬間に過大な衝撃を受けることになります。半導体ではなく真空管で実現するためには、様々な工夫を真空管に適用しなければなりません。高信頼管が完成することにより制空権は大きく変化しました。

第 10 章

その他

電気以外の私の感想などについてまとめています。

私の感想なので、自分でも間違っていることが多くて、書き連ねていくこと自体、我ながら呆れている次第です。

この程度だと思って読み勧めてもらうことが一番良いと思います。自分で書いていても掴みどころがなく、正直呆れています。

10.1 その他の科学について

今までの人生で感じたことを書き連ねているだけです。なにか根拠が会って理論的に書いているのではないことお考えながら呼んでください。

10.2 芸術について

ここでは芸術と呼ばれることについて、自分なりの考えを述べていきたいと思っています。

まず芸術と呼ばれている全ては、人間特有つまり人間だけが理解できる事象だと思います。

犬や牛馬やその他の獣たちにとって、なんの感動も与えない雑音に過ぎないのかもしれませんが。まだ解明されていないだけで、これらの動物も人間と同様に感銘を受けているのかもしれませんが。

ただヒーリング音楽と呼ばれている音楽はこれらの心の心理に作用しているとの話もあちこちから聞かれます。

つまり獣たちは自然から与えられた本能が人間よりも強く、本能と知能との間に芸術が位置しているような気がします。

10.2.1 音楽

よくご存知のように音楽は人類始まった時点から次々に作られてきました。このことは間違いないことだと思いますが、言葉も話せない太古の昔から音楽があったかと問われると「サー？」と言わざるを得ません。

民族音楽として世界中から存在していますが、何故かした西洋古典音楽だけ特別にクラシック音楽と呼ばれています。その理由はよく知りません。西洋古典音楽と日本ではあま

り言わないようですし、しかも下記に述べるようにたった200年しか続いておらず、なにか特別に優れているわけでも無く、例えば日本の雅楽や詩吟、尺八などと同じように一部の人間しか興味がないのに何故か、日本では別扱いとなっているような気がします。日本国内で何人の人が興味を持っているので方ね、少ないと思います。西洋においても非常に少ない人しか興味を持たないようです。

西洋古典音楽は1700年ぐらいから1900年ぐらいまでのたった200年程度の歴史から有りませんし、その後新しい西洋古典音楽は完全に姿を変えています。

音楽は一人の著名作曲家で、再度繰り返し演奏されているのは数曲しか無く、その他は同じ内容が繰り返し愛する人に引き継がれているだけに過ぎません。

西洋古典音楽は言ってみれば陶磁器や仏像をありがたく見つめている一部の連中のみです。例えばラベルのボレルが有名ですが、ラベルのその他の曲は誰も見向きもしない事からも明らかです。

音階を見つけたのは、かのアリストテレスですが、西洋古典音楽には全音と半音しか使っていません。その他の音階は五線譜では表現できないので、様々に編曲されたり、言葉で表現しようとして言うようです。五線紙以外の別の表現を多数の国では扱っているようですが、何れが優れているのか分からないようです。中近東では半音の半音などが使われて東洋ではその流れを大切にしています。その点では西洋古典音楽は東洋あるいは南北アメリカなどよりも遅れている気がします。

民族音楽

世界中で太古の昔から歌い継がれている民族音楽は、長年の年月に耐えていますので、今でもその魅力は尽きることがないようです。宗教音楽は世界中で歌われていますが、イスラム教やヒンズー教の宗教音楽は、現地以外ではあまり知られていないようです。キリスト教ではバッハなどのせいか、アメリカでは黒人聖歌が有名になっているようです。

宗教音楽

古代においてはほとんどが多神教なので、それらの神を賛美した曲が多かったのでしょう。

東洋においても同様で、ヒンズー教の神々特に東南アジアから日本に至るまで仏陀信仰の曲が多いようです。仏陀はインドの釈迦族の王様なので、その部下文官は百羅漢など、武官は仁王像、その他仏陀に関係のない神々は多神教のヒンズー教から千手観音などが選ばれているようです。

イスラム教は同じ方向をぐるぐると回る踊りが有り、音楽もそれなりに発達したと思いますが、調査不足で良く分かりません。

漢詩・詩吟

ほとんどが中国から伝わってきたように思います。これについても詳しく調べたことがないのであまり分かりませんが、西洋古典音楽とはほとんど影響を受けること無く関係がない気がします。

中近東から東アジアにかけて、国によらず比較的よく似た曲が多い気がします。またアメリカインディアンの古い曲は、わずかですが東洋的のような気がします。

まとめ

ある目的を持った作品だけが大眾に受け入れられるように感じます。このことは東洋でも西洋でも同じだと思います。例えばモーツァルトも2, 3の有名な曲があるようですが、その他はそれに似たような曲ばかりです。そのことよりも全ての曲においてすでに古臭く、現代人からするとかび臭いと思います。

思いつきで作曲した西洋古典音楽なども含め、全ての音楽は一度だけは受け入れられても、すぐに忘れ去られているように感じます。例を挙げるとモーツァルトやベートーベン「トルコ行進曲」は空想で作曲されているので、現実離れた曲になっています。やはり実践を経て作曲された曲には程遠いものがあります。

一人の作曲家に対し、残るのはせいぜい1, 2曲だけで、その他の曲はいずれ誰も聞かなくなっているようです。それ以外の同じ作曲の曲は再度聞く気にはならないでしょう。持つ読も西洋古典音楽そのものが、かび臭くなっていますから、今後次第に忘れ去られていくのでしょうかね。

10.2.2 美術

これもまた人間独特の芸術でしょう。最も写実的なことに関してはほとんど過去の人が実現しています。よって進む可能性としては、過去のマネが主なテーマにならざるを得ません。この分野も古代から描かれていますので、今後さらに新しい美術を見出すことは難しくなることでしょう。新しい美術については音楽より生まれるのがより厳しいと思われるます。

デザインという分野がありますが、この分野は時代とともに変化し、つまり新しい科学分野の変化が原因となり、時代とともに繰り返しが主体ですので、必要性は未だに衰えません。

絵画および彫刻

絵画や彫刻も音楽と同様な感じがします。これもいわゆる獣には理解できないことで、人間独特でしょう。

少し異なるところがあってそれはファッションと言われている分野です。ファッションは数年ごとに繰り返しが起きながら、科学の発展とともに少しずつ変化しています。

それに対して絵画および彫刻は少しずつ変化している気がします。つまりファッションと異なり、昔の手法をそのまま用いても評価されないようです。ただファッションとの境があまり明確ではない気がします。

これらの分野は音楽同様に調査研究したわけではないので、これ以上述べてもまさに犬の遠吠えなのでしょう。

書道

これは東洋独特の分野なのでしょう。アルファベットにも様々な書式がありますが、書道を芸術として取り上げている国は東洋の少数の国だけだと思います。

それらの中で韓国ではハングルが主に用いられていますが、ハングルを使って芸術性をもたせることは難しいと思います。李王朝時代に漢字の代わりになるものとして考案され

ましたが、日本のひらがなやカタカナと異なり、文字を続けて流れるように記述することは出来ません。人口に作られた文字であるので、この点では大失敗だと思います。

10.3 未知のこと

第 11 章

主な文献の説明

ここでは私がこれまでに手に入れた本などの文献について簡単に内容などの説明をしておきます。これから電気理論を勉強される方に役に立つことと思います。

11.1 電気回路理論

電気回路理論だけを扱った本です。本の簡単な内容説明も記述してあります。

11.1.1 Guillemin-1

電気回路の古い本としては Guillemin の本「回路網基礎学」[8] がありますが、共に山田直平他の訳ですがかなり日本語訳がおそまつですので、理解することがかなり難しいと思います。本自体はかなり詳細にまとめられた本ですので、この本だけでも十分な知識が得られます。

11.1.2 Guillemin-2

Guillemin の「回路網合成」[9] は「回路網基礎学」に続く合成に関する名著です。この本も「回路網基礎学」と同様に山田直平の約で、あまり良い訳とは思えず、日本語が難解です。しかし内容自体はとても新鮮で、回路合成に関わる人にとって有益な本でしょう。

11.1.3 Ryder

Ryder による Networks lines and fields[15] は英文の本です。この本はマイクロ波の説明もあります。並列共振や直列共振の詳しい説明も含まれており、回路設計者に有益な本です。

11.1.4 Rohrer

SPICE シミュレーションの開発者の一人である、Rohrer による「回路理論」[17] は非常に厳密に独立変数の数の公式の証明や状態変数法などを取り扱っています。

11.1.5 現場の回路設計者のための 電気回路基礎

「現場の回路設計者のための 電気回路基礎」[4] は著者によって書かれた実際の現場に役に立つ電気回路の本で、アマゾンから電子書籍として発売されています。

著書の中にも書かれていますが、トランジスタの等価回路が発達したおかげで、電気回路の解析や合成は紙と鉛筆と電卓だけでほとんど実行されておりその方法が述べられています。また様々な電気の定理は使われなくなっており、定理を必要とする方はシミュレーションのアルゴリズムを考える研究者に限定されるようになっています。

11.2 能動素子

能動素子に関連した著作とその簡単な内容について述べています。

11.2.1 SPICE とデバイス・モデル

「SPICE とデバイス・モデル」[1] は 2005 年に著者によって書かれた半導体の物性から等価回路までについて書かれており、今でもこの本に相当する著作は、特に国内ではありません。

トランジスタばかりでなくダイオードについても説明しており化合物半導体についても記述しています。

11.2.2 SEEC-1

「Introduction Semiconductor Physics」[11] は米国半導体電子工学教育委員会によって編集され半導体物性から回路集まで全部で七巻あります。この第一巻目は半導体物性について書かれています。

11.2.3 SEEC-2

この著作は SEEC-1 を受けて半導体の等価回路について述べられています。等価回路と言ってもエバースモル・モデルやハイブリッドπモデルが中心です。

11.2.4 Getreu

バイポーラトランジスタについてアーリ・モデルからガンメル・プーン・モデルまで詳細に渡って説明した本 [42] です。モデルの開発経過の歴史も含め詳しく書かれていますのでモデルをく深く理解したい人にとっては重要な本です。

11.2.5 Ebers

エバース・モル・モデルの基本論文 [43] です。このモデルを詳しく知りたい方には必要な論文でしょう。

11.2.6 Early

モデルにおいて重要なアーリー効果について詳しく知りたい方には必要な論文 [44] です。

11.2.7 Tsvividis

MOS について高電圧から低電圧まで解説してある古典的名著 [45] です。

11.2.8 Cilingiroglu

バイポーラおよび MOS について簡潔にまとめられた本 [46] です。公式集としても活用できる良書です。

11.3 電子回路理論

電子回路理論を扱った本です。本の簡単な内容説明も記述してあります。

11.3.1 電子回路 III

川上正光の「電子回路 III」 [7] には発振器の高調波に関する Groszkowski の方法や様々な発振器それと変復調が記載されています。

真空管回路が基本ですが、MOS は真空管動作に近いので役に立つ著書だと思います。

11.3.2 SEEC-3

Angelo 他による「Elementary Circuit Properties of Transistors」 [13] はエバースモル・モデルやハイブリッド π モデルを用いた回路解析および合成をまとめた本です。

11.3.3 SEEC-4

Gray 他による「Characteristics and Limitations of Transistors」 [14] は SEEC-3 の続きで、回路の性能限界について述べた本です。

11.3.4 Chua

Chua と Desor による「Linear and Nonlinear Circuits」 [16] は全ての回路を線形から非線形の程度に分類しようとした新しい試みの本です。

従来の増幅器、発振器、変復調器などの分類は適切な分類方法とは言えません。このような新しい分類方法も有効かもしれません。

11.3.5 変復調器の特許

著者の変復調器の特許 [2] はダブルバランス回路に非常によく似ていますが、その回路と同様な動作をする回路です。

11.3.6 間違いが多い電気知識

著者によって発行した本 [3] です。この本は日本人が書いた本があまりにも間違いが多いため、その内容を訂正するために書いた本です。

内容的には電気回路から電子回路の設計方法まで説明してあり、きちんと理解すれば実際の回路設計が出来るようになります。

11.3.7 Linvill

Linvill の「トランジスタと能動素子」[10] はタイトルの通りトランジスタの説明と電気回路では回路では四端子網、電子回路では主に四端子を用いた説明が含まれています。既に全く使われていない四端子網理論ですが、マイクロ波に進む人には貴重な本でしょう。

11.3.8 Gilbert

Gilbert によるトランスリニアに関する本です。[20] トランスリニアの基本原理である Girubert の原理の説明です。

Gilbert の原理はバイポーラによる原理ですが、少し変形すれば MOS にも適用可能です。

11.3.9 Wiegerink

Wiegerink による MOS トランスリニアに関する本 [21] です。MOS トランスリニアを学ぶ方には必須の本でしょう。

11.3.10 Chirlian

Chirliann による「集積回路の解析と合成」[18] は集中定数ではなく分布定数回路を中心に記述されており、大規模回路の解析合成に役に立つ内容となっています。多少誤訳になっている箇所が見受けられます。

11.3.11 Gray

Gray と Meyer による「アナログ集積回路設計技術」[19] は回路設計者にとって必須の名著です。半導体物性から回路設計まで主に増幅器を中心に記載されています。

ただしこの本は交流回路の解析を主にハイブリッド π 等価回路を用いて行われており現在の現場における設計方法とは異なっています。現場の回路設計方法については資料 [3] を参照ください。

11.4 電磁気学

電磁気学の本は膨大な出版物がありますが代表的な本を紹介しておきます。

11.4.1 Sommerfeld

電磁気に関する古典的な名著 [33] です。Sommerfeld による理論物理学講座の中の 1 冊です。マックスウエル方程式から相対論まで取り扱っています。

11.4.2 Randau

ランダウとリフシッツによる理論物理学教程全 9 篇野中の 1 篇 [34] です。力学から相対論まで含む膨大なページ数を誇る世界的な名著です。

11.4.3 Purcell

バークレー物理学教程の中の一編 [35] です。この本は他の電磁気学とは多少異なり、磁気力が電気力に相対性理論を適用すれば導き出せるということを述べています。電気と磁気とは相対性理論が仲介していることがよくわかり、面白い内容だと思います。

11.4.4 Elliott

この本も Elliott による名著 [36] です。日本語訳はないのですが、電磁気を学ぶ方には必須の本です。

11.5 制御理論

制御理論は電気とは別の独立した学問ですが、電気理論を学ぶためには必須の学問です。特に帰還回路にとって基礎となる学問ですので必ず学んでおく必要があります。

11.5.1 Kuo

制御理論は、膨大な研究成果があり、出版されている本も膨大な数あります。その中で多少古い本ですが非常にうまく書かれている Kuo による「Automatic Control Systems」[22] が参考になります。

11.6 帰還回路

帰還回路は増幅器の一種ですが増幅器より解析や合成が難しく、解析や合成をする場合特別な工夫が必要になってきます。先に記述しました制御理論も必要になってきます。

11.6.1 Stout

Stout による「演算増幅器」[23] は演算増幅器のどちらかといえばハンドブックに近い本です。様々な回路が紹介してありますので、演算増幅器を積極的に使いたい方には必要な本と言えるでしょう。

演算増幅器は入力無限大のインピーダンス、出力ゼロのインピーダンス、増幅率無限大として定義されますが、実際にゼロとか無限大という値は実現不可能ですので、ゼロや無限大に近い値を実現した増幅器を演算増幅器と称しています。例えば増幅率として 60 [dB] 約 1,000 倍の増幅率もあれば無限大と言えるようです。

11.6.2 Rosenstark

Rosenstark による「フィードバック増幅器の理論と解析」[24] は帰還回路の解析方法、帰還回路の入出力インピーダンスの求め方など、帰還を簡単に解析する方法が記述されており、発振器の解析などに非常に実用的な本です。

11.6.3 Horrocks

Horrocks の「フィードバック回路とオペアンプ」[25] はフィードバックから見たオペアンプの解説となっております。初心者にとって読みやすい本でしょう。

11.6.4 Kurokawa

Kurokawa によるこの論文 [26] は世界で初めて発振器の詳細動作および雑音についての解析を行った資料です。この論文が発表される前には、実験結果から演繹した式が用いられていました。論文は正の抵抗と負の抵抗から出発し、数学的に展開して発振器の詳細動作や雑音の解析結果を求めています。発振器を研究する人にとって必読の論文です。

11.6.5 Hajimiri

Hajimiri によるこの本 [32] は発振器の雑音をインパルスと仮定して雑音の解析を行っている著作です。雑音をインパルスと何処まで近似できるかという疑問もありますが、結果は Kurokawa の論文と同様な結果が出てきますので、インパルスという仮定はかなり有効なのだと思います。

11.7 雑音

雑音だけについての本は他の分野に比べてかなり少ないと思います。雑音自体はかなり昔から研究されており、その性質は定性的にも定量的にもかなり明らかになっています。

しかし発振器における雑音は、Kurokawa[26] による論文が発表されるまで経験による Leeson モデル式 [32] が使われていました。

11.7.1 Ziel-1

Ziel の古典的名著 [30] なのですが、訳があまり良なくて読むのに苦労します。本自体は雑音の基本式の導出から真空管および半導体の雑音まで雑音に関する殆どのテーマについて書かれています。

11.7.2 Ziel-2

この本も世界的な名著 [31] ですが、この本も訳があまり良なくて、読みにくい本となっています。本自体は雑音の数学的な導出から雑音の測定や熱雑音や生成再結合による説明などかなり詳しく書かれています。

11.8 フィルタ

フィルタは古典フィルタから現代フィルタへと大きく変化しています。古典フィルタは今では全く使われていません。

古典フィルタとは回路の伝達関数から出発し、厳密な数学展開によってフィルタを求める方法です。

それに対して現代フィルタは理想的な伝達関数を近似の関数で求める方法です。

古典フィルタと現代フィルタとは、フィルタ特性として現代フィルタのほうがより急峻なフィルタ特性が得られます。

11.8.1 Williams

Williams による「電子フィルタ」[27] は古典フィルタの簡単な説明から始まり現代フィルタの具体的な例も含め解説されています。加藤他訳の日本語訳もあり、初心者には読みやすい内容となっています。

11.8.2 Valkenburug

Valkenburg による「Analog Filter Design」[28] は現代フィルタを中心に記述されています。演算増幅器の説明から出発し、各種フィルタ回路は演算増幅器を中心に記述されています。演算増幅器を使っていますので、利得自体が無限大であるため、有限の利得で生じる誤差がありません。その点ではやや現実離れしているのかもしれませんが、フィルタの特性がその分理解しやすいのかもしれません。

11.8.3 Chen

Chen の編集による「The Circuits and Filters handbook」[29] は 3,000 ページ近い本です。フィルタに関連した文献などほとんど網羅されています。

11.9 電気に関連した数学

電気に関連した数学としては複素関数論やラプラス変換およびフーリエ解析が重要な数学です。デジタルについては論理学が重要でしょう。また詳しく学ぶ必要はありませんがグラフ理論も重要です。

11.9.1 Papoulis-1

この本はフーリエ解析およびラプラス変換について理論的に述べている本 [37] で、日本語訳では唯一の本かもしれません。電気を学ぶ人にとって必須の本と言えるでしょう。

11.9.2 Papoulis-2

Papoulis による電気回路に関するシステム学 [38] です。z 変換の説明から始まり主にデジタル回路のシステムについて書かれています。デジタルの回路を扱う方には必須の本です。

11.9.3 Korner

Korner (o はウムラウトなので、ケルナーと呼びます) によって書かれた「フーリエ解析大全」[39] はフーリエ解析について詳細に書かれた本です。

11.9.4 Derric

複素数に関する本も多数出版されています。Derric によって書かれた「複素関数論とその応用」[40] は複素数を扱う電気設計者にとって複素数の基礎を身につけるために必要な本です。

11.9.5 Spiegel

電気その他の分野も含めた数学公式集 [41] です。一冊持っている手が来るに公式を探し出すことができます。

11.10 マイクロ波

マイクロ波に関する資料は膨大なものがありますが、ここでは 2,3 の資料について紹介しておきます。

11.10.1 Collin

マイクロ波についてほぼすべての分野について記載されている本 [47] です。集中定数を主に扱う方にはちょっと難しい本かもしれません。先に説明しました Ryder の本のほうが集中定数と分布定数を扱っており分かりやすいかもしれません。

11.11 論理学

論理学という学問の歴史は古く、ギリシャ時代から延々と続いており出版物は膨大な数に上ります。また様々な方向へ発展しており、電気回路を学ぶ上で分かりやすく入門的な本のみを紹介しておきます。

11.11.1 Toukou

古い出版物ですが、論理学の歴史から始まり、伝統的形式論理学、現代的形式論理学（記号論理学）までの説明が含まれています。デジタル回路を設計する人にとって基礎学問となる本です。

11.12 信頼性

全ての回路は様々な環境のもとで動作しますので使っている途中で故障しては致命傷となります。信頼性は電気理論と同様に重要な学問であり、回路設計者は十分な知識を持つておく必要があります。

日本では JIS や EIAJ として標準化も行われています。アメリカでは MIL 標準が使われています。

MIL が基本でそれを日本向けに修正したのが EIAJ それをさらに抜粋したのが JIS ということになります。

11.12.1 Shiomi

日本で最初に発行された通産省の塩見さんによる信頼性工学 [49] の本です。この本は同じ意味の項目が章によって様々に変化して読みづらく、内容もよく意味がわからないなど参考図書としては推奨できません。

11.12.2 Purcell

英文ですが Purcell によるこの信頼性工学 [35] は、信頼性工学の初歩から応用まで丁寧に記述されています。信頼性についての基本的なことが記述されているので、これから回路の信頼性を考える人には必須の本です。

11.13 シミュレーション

多数のシミュレーション・プログラムが開発されていますが、その主なプログラムを紹介しておきます。

11.13.1 SPICE

ソラリス（昔のユニックス）で動きます。UCB（カリフォルニア・バークレー大学）によって開発が始まり今の改良が続けられている回路シミュレーション・プログラムです。

上記大学のホームページから無料でダウンロードできます。世界中のデファクト・スタンダード（準標準）になっています。

11.13.2 PSPICE

ウィンドウズで動作しますがウィンドウズ自体が不安定なので、工場などの四六時中稼働しなければならない場合などには使われません。ケイデンス日本ではイノテックによって発売されている有料のプログラムです。機能限定の無料版もあります。

11.13.3 EMTP

電気学会で開発され、今も改良が続いているプログラムです。主に大電力用の電気回路に特化して開発されています。無料で使うことができます。

第 12 章

芸術について

12.1 芸術の変遷

芸術の変遷について、ほとんど芸術の発展がないアフリカを除いて西洋、東洋、東南アジア、南北アメリカに分けて述べていきます。

12.1.1 西洋の科学と芸術

芸術の進歩は今までの私の知識からすると、エジプト地方に始まり、次にギリシャへ移動しイタリア、スペイン、ドイツやオーストリア、ロシアからイギリスおよびアメリカへ移っていきました。

これらは政治の中心とほぼ一致しているような気がします。上記の中でフランスが入っていませんが、フランスは古代から現代に至るまで、政治的にも科学・芸術の世界においても全くと言って良いほどほとんど目立った功績は有りません。著名な政治家も芸術家も周囲の国出身で、単に避暑地に過ぎなかったようです。

あえて芸術と上げるならカンカン踊りなどの大衆音楽とマネーやモネーのような東洋芸術の模写ぐらいでしょう。古典音楽については全く駄目で、著名な作曲家や歌手などは一人も排出していません。

偉大な政治家のナポレオンはイタリア人です。ガリレオはイタリア人ですし、ピカソはスペイン人、モンサンミッシェルを建造したのはイタリア人ですが、干潮時に渡れるように遺跡を破壊したのはフランス人でした。高速鉄道もドイツです。要するの見るべきものも全く無いし、技術・芸術には無縁の国ですが気候だけは良く、ぶどう酒の名産地が各所に点在しています。要するに政治・科学・芸術に無縁の農業国です。

これらの原因はローマやドイツの長年の支配下に置かれていたので、科学・芸術が全く発達しなかったことと、気候が温暖であることにより避暑地に過ぎなかったこととローマ教皇の力が絶大であったのでフランスではなく成人中心がイタリアにあるローマだったことが原因のようです。

音楽の中心は、ドイツ、ウクライナ、オーストリア、ロシアなどの古典音楽が、1600年頃から民族音楽とは別に発達しましたが、1900年代にはほぼ姿を消し、現代音楽へと変遷しました。その後はイギリスや北アメリカのジャズを中心とする黒人に拠る現代音楽へと変化していきます。結果古典音楽は陶芸などの古美術愛好家のような人々によって細々と引き継がれています。

科学の中心

第二次世界大戦以前の科学技術の世界的中心はドイツで、全ての論文はドイツ語で書く必要がありました。ドイツが敗戦した後は技術者や科学者はほとんどすべてロシアやアメリカに移動し、論文も英語が主流となりました。

しかしドイツは日本のバブルと同様に、戦後米国に次ぐ世界第2位の経済大国となっています。その後日本に追い抜かれ次に中国に追い抜かれましたが、いまもって技術大国であることには変わりありません。

西洋での技術科学の中心はやはりドイツのようです。回転する車輪で世界で初めて500 [km.h] を出したのはドイツの高速鉄道です。中国の高速鉄道はドイツと日本の技術が使われ出来上がりましたが、完成してすぐに中国が「世界で初めて高速鉄道を走らせた」と世界に触れ回っています。最も回転するモータとリニアモータは、技術的に全く同じ原理です。JR が行っているリニアモータは、超伝導を用いて鉄道線路ではなく、磁気で浮上させて磁力でリニアモータを駆動しています。地上で時速 500 [km.h] 走行させることにどのような意味があるのか、人体への影響など今後色々課題が出るとは思いますが、科学は常に両刃の剣ですから、これからどのような問題が発生するのかは未知数です。

自動車もイタリアのランボルギーニ、ドイツのベンツ、イギリスのロールスロイスなどが有名です。

太陽光発電についても一番気になることはあまりにも効率が悪く、まだ研究段階の状態だと思います。むしろ環境破壊（耐久性がなく経年劣化に拠る大量ゴミ、土地の荒廃、重量が大きいため家屋の設計強度増強が必要など）課題が多い気がします。むしろドイツのように太陽熱利用や風力発電、地熱発電の普及の方を急ぐべきだと思いますが、どうなることやら。

12.1.2 エジプト

誰ということは有りませんが、一番大きな功績はやはりピラミッドやスフィンクスの建造でしょう。これらや神殿の建設技術は素晴らしいものがあります。それと金が結構豊富に取れたので、金の加工技術やパピルスの発明、洪水に拠る幾何学の発展が挙げられます。

ヒッタイトに拠る鉄器の使用も大きな功績でしょう。鉄器と行っても鉄鉱石からではなく、隕石から鉄器を製造したようです。

12.2 東洋の科学と芸術

12.3 東南アジアの科学と芸術

12.4 南北アメリカの科学と芸術

古来からの住人であるアメリカインディアンは、白人にほとんど虐殺されわずかに残っているようです。

中南米はポルトガルやスペインに滅ぼされほとんど痕跡すら残っていないようです。

付録 A

数学公式集

回路の問題を解くに当たって必要と思われる色々な数学の公式や定理を簡単に掲載しています。よって厳密性などはほとんど述べていません。厳密な証明など詳しいことについては、色々な専門書が発行されていますので、それらを参考にして下さい。

読みやすい専門書としてはスミルノフの「高等数学教程」、ちょっと難しいけれど厳密で有名なブルバキ^{*1}の「数学教程」、その他ファン・デル・ヴェルデンによる「現代代数学」、シュヴァルツによる「解析学」などがあります。その他参考文献の中にも述べていますので、参考にして下さい。

A.1 微分・積分

ここでは、微分・積分の簡単な説明と公式について説明します。

微分の定義

$f(x)$ が定義域内の点 x で次に示す極限値を持つとき、この関数は点 x で微分可能であるといえます。

$$f'(x) = \frac{df(x)}{dx} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{f(x + \Delta x) - f(x)}{\Delta x} \quad (\text{A.1})$$

微分の公式（代表的な関数について）

u, v を x の関数であるとしますと

$$\frac{df(u)}{dx} = \frac{df(u)}{du} \frac{du}{dx} \quad (\text{A.2})$$

$$\frac{d(uv)}{dx} = \frac{du}{dx} v + u \frac{dv}{dx} \quad (\text{A.3})$$

$$\frac{d}{dx} \left(\frac{u}{v} \right) = \frac{v \frac{du}{dx} - u \frac{dv}{dx}}{v^2} \quad (\text{A.4})$$

^{*1} ブルバキという名称は、フランスの数学者集団の名称となっています。

指数関数、対数関数の微分公式

$$\frac{d}{dx}(x^n) = nx^{n-1} \quad (\text{A.5})$$

$$\frac{d}{dx}(e^x) = e^x \quad (\text{A.6})$$

$$\frac{d}{dx}(a^x) = a^x \ln a \quad (\text{A.7})$$

$$\frac{d}{dx}(\ln x) = \frac{1}{x} \quad (\text{A.8})$$

三角関数の微分公式

$$\frac{d}{dx}(\sin x) = \cos x \quad (\text{A.9})$$

$$\frac{d}{dx}(\cos x) = -\sin x \quad (\text{A.10})$$

$$\frac{d}{dx}(\tan x) = \sec^2 x \quad (\text{A.11})$$

$$\frac{d}{dx}(\sec x) = \tan x \sec x \quad (\text{A.12})$$

$$\frac{d}{dx}(\csc x) = -\cot x \csc x \quad (\text{A.13})$$

$$\frac{d}{dx}(\cot x) = -\csc^2 x \quad (\text{A.14})$$

積分の定義

$F(x)$ の導関数が $f(x)$ であるとき、任意の定数 c と $F(x)$ との和を $f(x)$ の原始関数または不定積分といい、これを次のように表します。

$$\int f(x)dx = F(x) + c$$

基本的性質

$$\int af(x)dx = a \int f(x)dx \quad (\text{A.15})$$

$$\int [f(x) \pm g(x)] = \int f(x)dx \pm \int g(x)dx \quad (\text{A.16})$$

部分積分

$$\int f(x) \frac{dg(x)}{dx} dx = f(x)g(x) - \int \frac{df(x)}{dx} g(x) dx \quad (\text{A.17})$$

置換積分

$x = \phi(t)$ で $d\phi(t)/dt$ が存在すれば、

$$\int f(x)dx = \int f[\phi(t)] \frac{d\phi(t)}{dt} dt \quad (\text{A.18})$$

A.2 ベクトル解析

ベクトル場は、あらゆる自然現象を説明する上で非常に重要な場であり、その場を解析する便利な数学分野としてベクトル解析があります。ここにあげてある公式は、任意の座標系において適用が可能であるため、非常に汎用性を持った公式となっています。

内積（スカラー積）

2つのベクトルの間の角度を θ とすると、ベクトルの内積は、次のように定義されます。

$$\mathbf{a} \bullet \mathbf{b} = |\mathbf{a}| |\mathbf{b}| \cos \theta \quad (\text{A.19})$$

内積の定義から分かりますように、二つのベクトルが直行するとき、それらのベクトルの内積はゼロとなります。また逆に内積がゼロである場合、それら二つのベクトルは直行します。

内積について次の公式が成り立ちます。

$$\mathbf{a} \bullet \mathbf{b} = \mathbf{b} \bullet \mathbf{a} \quad (\text{A.20})$$

$$(p\mathbf{a} + q\mathbf{b}) \bullet \mathbf{c} = p\mathbf{a} \bullet \mathbf{c} + q\mathbf{b} \bullet \mathbf{c} \quad (\text{A.21})$$

$$|\mathbf{a} \bullet \mathbf{b}| \leq |\mathbf{a}| |\mathbf{b}| \quad (\text{シュワルツの不等式}) \quad (\text{A.22})$$

外積（ベクトル積）

二つのベクトルの間の角度を θ とすると、ベクトルの外積は次のように定義されます。

$$\mathbf{a} \times \mathbf{b} = |\mathbf{a}| |\mathbf{b}| \sin \theta \quad (\text{A.23})$$

外積の定義から、次の公式が得られます。

この定義式の中の角度 θ は向きを持っていますので、二つのベクトルの順番が入れ替わると符号が変わります。

$$\mathbf{a} \times \mathbf{b} = -\mathbf{b} \times \mathbf{a} \quad (\text{A.24})$$

$$k(\mathbf{a} \times \mathbf{b}) = (k\mathbf{a}) \times \mathbf{b} = \mathbf{a} \times (k\mathbf{b}) \quad (\text{A.25})$$

$$\mathbf{a} \times (\mathbf{b} + \mathbf{c}) = \mathbf{a} \times \mathbf{b} + \mathbf{a} \times \mathbf{c} \quad (\text{A.26})$$

$$|\mathbf{a} \times \mathbf{b}| = \sqrt{(\mathbf{a} \bullet \mathbf{a})(\mathbf{b} \bullet \mathbf{b}) - (\mathbf{a} \bullet \mathbf{b})^2} \quad (\text{A.27})$$

A.2.1 ベクトルの微分

ここではベクトル演算の中の微分について扱っています。

方向微係数

空間に点 P を選び、単位ベクトル \mathbf{b} によって方向を与えます。 C を P から \mathbf{b} の方向へ出る半直線とし、 Q を C 上の点とします。 P から Q までの距離は s とします。そのとき極限值

$$\frac{\partial f}{\partial s} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{f(Q) - f(P)}{s} \quad (\text{A.28})$$

が存在すれば、それを点 P における \mathbf{b} 方向の f の方向微係数と呼びます。

A.2.2 定義

次にベクトル解析で用いられる、微分に関して重要な定義を述べます。ここで

$$\nabla = \mathbf{i} \frac{\partial}{\partial x} + \mathbf{j} \frac{\partial}{\partial y} + \mathbf{k} \frac{\partial}{\partial z} \quad (\text{A.29})$$

\mathbf{i} 、 \mathbf{j} 、 \mathbf{k} は各々 x 、 y 、 z 方向の単位ベクトルです。

勾配

$$\begin{aligned} \text{grad } f &= \nabla f \\ &= \left(\frac{\partial}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial}{\partial y} \mathbf{j} + \frac{\partial}{\partial z} \mathbf{k} \right) f \end{aligned} \quad (\text{A.30})$$

発散

$$\begin{aligned} \text{div } \mathbf{v} &= \nabla \bullet \mathbf{v} \\ &= \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) f \end{aligned} \quad (\text{A.31})$$

回転

$$\begin{aligned} \text{rot } \mathbf{v} &= \nabla \times \mathbf{v} \\ &= \left(\frac{\partial v_z}{\partial y} - \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) \mathbf{i} + \left(\frac{\partial v_x}{\partial z} - \frac{\partial v_z}{\partial x} \right) \mathbf{j} + \left(\frac{\partial v_y}{\partial x} - \frac{\partial v_x}{\partial y} \right) \mathbf{k} \end{aligned} \quad (\text{A.32})$$

A.2.3 勾配についての公式

$$\nabla(fg) = f\nabla g + g\nabla f \quad (\text{A.33})$$

$$\nabla(f^n) = n f^{n-1} \nabla f \quad (\text{A.34})$$

$$\nabla \left(\frac{f}{g} \right) = \frac{1}{g^2} (g\nabla f - f\nabla g) \quad (\text{A.35})$$

$$\nabla^2(fg) = g\nabla^2 f + 2\nabla f \nabla g + f\nabla^2 g \quad (\text{A.36})$$

発散についての公式

$$\nabla \bullet (k\mathbf{v}) = k\nabla \bullet \mathbf{v} \quad (\text{A.37})$$

$$\nabla \bullet (\mathbf{u} \bullet \mathbf{v}) = \mathbf{u} \bullet (\nabla \bullet \mathbf{v}) + \mathbf{v} \bullet (\nabla \mathbf{u}) \quad (\text{A.38})$$

$$\nabla \bullet (\mathbf{u} \nabla \mathbf{v}) = \mathbf{u} \nabla^2 \mathbf{v} + \nabla \mathbf{u} \bullet \nabla \mathbf{v} \quad (\text{A.39})$$

回転および発散についての公式

$$\nabla \times (\mathbf{u} + \mathbf{v}) = \nabla \times \mathbf{u} + \nabla \times \mathbf{v} \quad (\text{A.40})$$

$$\nabla \times (\nabla f) = 0 \quad (\text{A.41})$$

$$\nabla \bullet (\mathbf{u} \times \mathbf{v}) = \mathbf{v} \bullet \nabla \mathbf{u} - \mathbf{u} \bullet \nabla \mathbf{v} \quad (\text{A.42})$$

$$\nabla \bullet (\nabla \times \mathbf{v}) = 0 \quad (\text{A.43})$$

$$\nabla \times (f\mathbf{v}) = \nabla f \times \mathbf{v} + f\nabla \times \mathbf{v} \quad (\text{A.44})$$

$$\nabla \bullet (g\nabla f \times f\nabla g) = 0 \quad (\text{A.45})$$

A.3 行列式

ここでは簡単に行列について、様々な公式などを述べておきます。

和の公式

$$c(\mathbf{A} + \mathbf{B}) = c\mathbf{A} + c\mathbf{B} \quad (\text{A.46})$$

$$(c + d)\mathbf{A} = c\mathbf{A} + d\mathbf{A} \quad (\text{A.47})$$

$$c(d\mathbf{A}) = (cd)\mathbf{A} \quad (\text{A.48})$$

$$1 \times \mathbf{A} = \mathbf{A} \quad (\text{A.49})$$

積の公式

$$k(\mathbf{AB}) = (k\mathbf{A})\mathbf{B} = \mathbf{A}(k\mathbf{B}) \quad (\text{A.50})$$

$$\mathbf{A}(\mathbf{BC}) = (\mathbf{AB})\mathbf{C} \quad (\text{A.51})$$

$$(\mathbf{A} + \mathbf{B})\mathbf{C} = \mathbf{AC} + \mathbf{BC} \quad (\text{A.52})$$

$$\mathbf{A}(\mathbf{B} + \mathbf{C}) = \mathbf{AB} + \mathbf{AC} \quad (\text{A.53})$$

転置の公式

$$(\mathbf{A} + \mathbf{B})^T = \mathbf{A}^T + \mathbf{B}^T \quad (\text{A.54})$$

$$(\mathbf{AB})^T = \mathbf{B}^T \mathbf{A}^T \quad (\text{A.55})$$

逆行列の公式

$$\mathbf{A}\mathbf{A}^{-1} = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{A} = \mathbf{I} \quad (\text{A.56})$$

$$(\mathbf{AB})^{-1} = \mathbf{B}^{-1}\mathbf{A}^{-1} \quad (\text{A.57})$$

$$|\mathbf{AB}| = |\mathbf{A}||\mathbf{B}| \quad (\text{A.58})$$

正則な $n \times n$ 型行列 $\mathbf{A} = [a_{ij}]$ の逆行列は、次のように与えられます。

$$\mathbf{A}^{-1} = \frac{1}{|\mathbf{A}|} \begin{vmatrix} A_{11} & A_{21} & \cdots & A_{n1} \\ A_{12} & A_{22} & \cdots & A_{n2} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ A_{1n} & A_{2n} & \cdots & A_{nn} \end{vmatrix} \quad (\text{A.59})$$

ただし A_{ij} は余因子です。(行と列の並び方に注意)

A.4 三角関数

三角関数の基本的な定理などについて扱っています。

加法定理

$$\sin(A \pm B) = \sin A \cos B \pm \cos A \sin B \quad (\text{A.60})$$

$$\cos(A \pm B) = \cos A \cos B \mp \sin A \sin B \quad (\text{A.61})$$

$$\tan(A \pm B) = \frac{\tan A \pm \tan B}{1 \mp \tan A \tan B} \quad (\text{A.62})$$

$$\sin A \pm \sin B = 2 \sin \frac{A \pm B}{2} \cos \frac{A \mp B}{2} \quad (\text{A.63})$$

$$\cos A + \cos B = 2 \cos \frac{A+B}{2} \cos \frac{A-B}{2} \quad (\text{A.64})$$

$$\cos A - \cos B = -2 \sin \frac{A+B}{2} \sin \frac{A-B}{2} \quad (\text{A.65})$$

$$\sin A \sin B = \frac{\cos(A-B) - \cos(A+B)}{2} \quad (\text{A.66})$$

$$\cos A \cos B = \frac{\cos(A-B) + \cos(A+B)}{2} \quad (\text{A.67})$$

$$\sin A \cos B = \frac{\sin(A+B) + \sin(A-B)}{2} \quad (\text{A.68})$$

$$\cos A \sin B = \frac{\sin(A+B) - \sin(A-B)}{2} \quad (\text{A.69})$$

$$(\text{A.70})$$

2 倍の公式

$$\sin 2A = 2 \sin A \cos A \quad (\text{A.71})$$

$$\cos 2A = \cos^2 A - \sin^2 A \quad (\text{A.72})$$

$$\tan 2A = \frac{2 \tan A}{1 - \tan^2 A} \quad (\text{A.73})$$

A.5 複素関数

複素関数は特に回路理論においては重要な概念です。

可換法則

$$\begin{aligned}z_1 + z_2 &= z_2 + z_1 \\z_1 z_2 &= z_2 z_1\end{aligned}\tag{A.74}$$

結合法則

$$\begin{aligned}(z_1 + z_2) + z_3 &= z_2 + (z_1 + z_3) \\(z_1 z_2) z_3 &= z_2 (z_1 z_3)\end{aligned}\tag{A.75}$$

分配法則

$$z_1(z_2 + z_3) = z_1 z_2 + z_1 z_3\tag{A.76}$$

その他

$$\begin{aligned}0 + z &= z + 0 = z \\z + (-z) &= (-z) + z = 0 \\z \times 1 &= z\end{aligned}\tag{A.77}$$

複素共役

$$\begin{aligned}\overline{z_1 + z_2} &= \overline{z_1} + \overline{z_2} \\ \overline{z_1 \times z_2} &= \overline{z_1} \times \overline{z_2} \\ \overline{\begin{pmatrix} z_1 \\ z_2 \end{pmatrix}} &= \begin{pmatrix} \overline{z_1} \\ \overline{z_2} \end{pmatrix}\end{aligned}\tag{A.78}$$

絶対値

$$\begin{aligned}|z_1 \times z_2| &= |z_1| \times |z_2| \\ \left| \frac{z_1}{z_2} \right| &= \frac{|z_1|}{|z_2|}\end{aligned}\tag{A.79}$$

ド・モアブルの公式

$$(\cos \theta + j \sin \theta)^n = \cos(n\theta) + j \sin(n\theta) \quad (\text{A.80})$$

コーシー・リーマンの方程式

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial v}{\partial y} \quad (\text{A.81})$$

$$\frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{\partial v}{\partial x}$$

コーシーの積分定理

有界な単連結領域 D で $f(z)$ が解析関数であるなら、 D 内の全ての単純閉曲線 C に対して

$$\int_C f(z) dz = 0 \quad (\text{A.82})$$

コーシーの積分公式

$f(z)$ が単連結領域 D で解析関数であるとして、 D 内の任意の点 z_0 と、 z_0 を囲む D 内の任意の単純閉路 C に対して、積分路を反時計周りに取りますと

$$\int_C \frac{f(z)}{z - z_0} dz = 2\pi j f(z_0) \quad (\text{A.83})$$

モレラの定理

単連結領域 D で $f(z)$ が連続で、かつ D 内の全ての閉路 C に対して、

$$\int_C f(z) dz = 0$$

が成り立つと、 $f(z)$ は単連結領域 D で解析的です。

リウビルの定理

有限複素平面内の全ての点に対して、 $f(z)$ が解析的でその絶対値が有界なら、 $f(z)$ は定数です。

A.6 双曲線関数

A.6.1 実数関数の双曲線関数

定義

 x を実数として

$$\sinh x = \frac{e^x - e^{-x}}{2} \quad (\text{A.84})$$

$$\cosh x = \frac{e^x + e^{-x}}{2} \quad (\text{A.85})$$

$$\tanh x = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}} \quad (\text{A.86})$$

基礎公式

$$\sinh(-x) = -\sinh(x) \quad (\text{A.87})$$

$$\cosh(-x) = \cosh(x) \quad (\text{A.88})$$

$$\tanh(-x) = -\tanh(x) \quad (\text{A.89})$$

$$\sinh(x \pm y) = \sinh x \cosh y \pm \cosh x \sinh y \quad (\text{A.90})$$

$$\cosh(x \pm y) = \cosh x \cosh y \pm \sinh x \sinh y \quad (\text{A.91})$$

$$\tanh(x \pm y) = \frac{\tanh x \pm \tanh y}{1 \pm \tanh x \tanh y} \quad (\text{A.92})$$

$$\sinh x + \sinh y = 2 \sinh \frac{x+y}{2} \cosh \frac{x-y}{2} \quad (\text{A.93})$$

$$\sinh x - \sinh y = 2 \sinh \frac{x-y}{2} \cosh \frac{x+y}{2} \quad (\text{A.94})$$

$$\cosh x + \cosh y = 2 \cosh \frac{x+y}{2} \cosh \frac{x-y}{2} \quad (\text{A.95})$$

$$\cosh x - \cosh y = 2 \sinh \frac{x+y}{2} \sinh \frac{x-y}{2} \quad (\text{A.96})$$

$$\tanh x + \tanh y = \frac{\sinh(x+y)}{\cosh x \cosh y} \quad (\text{A.97})$$

$$\tanh x - \tanh y = \frac{\sinh(x-y)}{\cosh x \cosh y} \quad (\text{A.98})$$

$$\sinh x + \cosh x = \frac{1 + \tanh(x/2)}{1 - \tanh(x/2)} \quad (\text{A.99})$$

$$(\sinh x + \cosh x)^n = \sinh(nx) + \cosh(nx) \quad (\text{A.100})$$

A.6.2 複素関数の双曲線関数

定義

z を複素数として、

$$\sinh z = \frac{e^z - e^{-z}}{2} \quad (\text{A.101})$$

$$\cosh z = \frac{e^z + e^{-z}}{2} \quad (\text{A.102})$$

$$\tanh z = \frac{e^z - e^{-z}}{e^z + e^{-z}} \quad (\text{A.103})$$

基礎公式

$$\tanh z = \frac{\sinh z}{\cosh z} \quad (\text{A.104})$$

$$\coth z = \frac{\cosh z}{\sinh z} \quad (\text{A.105})$$

$$\operatorname{sech} z = \frac{1}{\cosh z} \quad (\text{A.106})$$

$$\operatorname{csch} z = \frac{1}{\sinh z} \quad (\text{A.107})$$

$$\sinh z = -j \sin(jz) \quad (\text{A.108})$$

$$\cosh z = \cos(jz) \quad (\text{A.109})$$

$$\tanh z = -j \tan(jz) \quad (\text{A.110})$$

実数との関係

x, y を実数として、

$$\begin{aligned} \sinh(x \pm jy) &= \sinh x \cos y \pm j \cosh x \sin y \\ &= \sin x \cosh y \pm j \cos x \sinh y \end{aligned} \quad (\text{A.111})$$

$$\begin{aligned} \cosh(x \pm jy) &= \cosh x \cos y \pm j \sinh x \sin y \\ &= \cos x \cosh y \mp j \sin x \sinh y \end{aligned} \quad (\text{A.112})$$

$$\sinh x = -j \sin(jx) \quad (\text{A.113})$$

$$\cosh(x) = \cos(jx) \quad (\text{A.114})$$

$$\tanh x = -j \tan(jx) \quad (\text{A.115})$$

$$\sinh(jx) = -j \sin x \quad (\text{A.116})$$

$$\cosh(jx) = \cos x \quad (\text{A.117})$$

$$\tanh(jx) = j \tan x \quad (\text{A.118})$$

n を整数として、

$$\sinh(x + jn\pi) = (-1)^n \sinh x \quad (\text{A.119})$$

$$\cosh(x + jn\pi) = (-1)^n \cosh x \quad (\text{A.120})$$

$$\sinh \left[j \frac{(2n+1)\pi}{2} \right] = j \sin \left[\frac{(2n+1)\pi}{2} \right] \quad (\text{A.121})$$

$$\cosh \left[j \frac{(2n+1)\pi}{2} \right] = 0 \quad (\text{A.122})$$

$$\sinh \left(j \frac{\pi}{2} \pm x \right) = j \cosh x \quad (\text{A.123})$$

$$\cosh \left(j \frac{\pi}{2} \pm x \right) = \pm j \sinh x \quad (\text{A.124})$$

A.7 フーリエ解析

フーリエ解析も回路には必須の数学です。

A.7.1 フーリエ級数

任意の周期関数は、次に示すようにフーリエ級数の形に展開することが出来ます。

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=-\infty}^{\infty} \left(a_k \cos \frac{2k\pi}{T} t + b_k \sin \frac{2k\pi}{T} t \right) \quad (\text{A.125})$$

ただし $k = 1, 2, 3, \dots$

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) dt \quad (\text{A.126})$$

$$a_k = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \cos \frac{2k\pi t}{T} dt \quad (\text{A.127})$$

$$b_k = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \sin \frac{2k\pi t}{T} dt \quad (\text{A.128})$$

代表的な関数のフーリエ級数を載せておきます。

周期 2π の方形波

$$f(x) = \begin{cases} -k & -\pi < x < 0 \\ +k & 0 < x < \pi \end{cases} \quad (\text{A.129})$$

$$F(x) = \frac{4k}{\pi} \left(\sin x + \frac{1}{3} \sin 3x + \frac{1}{5} \sin 5x + \dots \right) \quad (\text{A.130})$$

任意周期の方形波

$$f(x) = \begin{cases} 0 & -2 < x < -1 \\ k & -1 < x < +1 \text{ のとき } T = 4 \\ 0 & 1 < x < 2 \end{cases} \quad (\text{A.131})$$

$$F(x) = \frac{k}{2} + \frac{2k}{\pi} \left(\cos \frac{\pi}{2} x - \frac{1}{3} \cos \frac{3\pi}{2} x + \frac{1}{5} \cos \frac{5\pi}{2} x - \dots \right) \quad (\text{A.132})$$

三角波

$$f(x) = \begin{cases} \frac{2k}{l}x & 0 < x < \frac{l}{2} \\ \frac{2k}{l}(l-x) & \frac{l}{2} < x < l \end{cases} \quad (\text{A.133})$$

$$F(x) = \frac{8k}{\pi^2} \left(\frac{1}{l^2} \sin \frac{\pi}{l}x - \frac{1}{3^2} \sin \frac{3\pi}{l}x + \frac{1}{5^2} \sin \frac{5\pi}{l}x + \dots \right) \quad (\text{A.134})$$

A.7.2 フーリエ積分

非周期関数の場合にはフーリエ級数の方法を無限周期へ一般化して、フーリエ積分として取り扱うことができます。

$$f(x) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} [A(w) \cos wx + B(w) \sin wx] dw \quad (\text{A.135})$$

$$A(w) = \int_{-\infty}^{\infty} f(v) \cos wv dv \quad (\text{A.136})$$

$$B(w) = \int_{-\infty}^{\infty} f(v) \sin wv dv \quad (\text{A.137})$$

次にフーリエ積分の複素形式を記述しておきます。

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt \quad (\text{A.138})$$

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (\text{A.139})$$

A.8 ラプラス変換

ラプラス変換は周波数特などを暑っ買うときや、特にフィルタにおいてはなくてはならない数学分野です。

定義

(片側) ラプラス変換は次のように定義されます。

$$F(s) = \int_0^{\infty} f(t) e^{-st} dt \quad (\text{A.140})$$

$$f(t) = \int_0^{\infty} F(s) e^{st} ds \quad (\text{A.141})$$

線形性

$$\mathcal{L}[af(t) + ng(t)] = a\mathcal{L}[f(t)] + b\mathcal{L}[g(t)] \quad (\text{A.142})$$

微分

$$\mathcal{L}(f^n) = s^n \mathcal{L}[f(t)] - s^{n-1} f(0) - s^{n-2} f'(0) - s^{n-3} f''(0) - \dots - f^{n-1}(0) \quad (\text{A.143})$$

積分

$$\mathcal{L} \left[\int_0^t f(\tau) d\tau \right] = \frac{1}{s} \mathcal{L} [f(t)] \quad (\text{A.144})$$

移動定理

$$\mathcal{L} [e^{at} f(t)] = F(s-a) \quad (\text{A.145})$$

畳み込み

$$h(t) = (f * g)(t) = \int_0^t f(\tau) g(t-\tau) d\tau \quad (\text{A.146})$$

可換法則

$$f * g = g * f \quad (\text{A.147})$$

分配法則

$$f * (g_1 + g_2) = f * g_1 + f * g_2 \quad (\text{A.148})$$

結合法則

$$(f * g) * v = f * (g * v) \quad (\text{A.149})$$

参考文献

- [1] 新原盛太郎, 「SPICE とデバイス・モデル」, CQ 出版, 2005.
- [2] shinbara, Amplitude Modulation, U.S. Patent No, 4-547-752, 特公昭 58-171105, 1995.
- [3] 新原盛太郎, 「間違いが多い電気知識」, 東京図書出版, 2018.
- [4] 新原盛太郎, 「現場の回路設計者のための 電気回路基礎」, アマゾン電子ブック, 2019.
- [5] 新原盛太郎, 「アナログ回路設計法」, アマゾンペーパーバック, 2022.
- [6] 新原盛太郎, 「設計のための電気」, アマゾンペーパーバック, 2022.
- [7] 川上正光, 電子回路 III, 共立全書, 昭和 30 年 5 月.
- [8] Ernst A. Guillemin, 山田直平他訳「回路網基礎学」, 無線従事者教育協会, 昭和 34 年 4 月.
- [9] Ernst A. Guillemin, 山田直平他訳, 「回路網合成」, 近代科学社, 昭和 37 年 10 月.
- [10] J. G. Linvill, J. F. Gibbons, 菅野卓男他訳, 「トランジスタと能動回路網」, コロナ社, 昭和 43 年 10 月.
- [11] A. C. Smith, R. B. Adler and R. L. Longini, Introduction to Semiconductor Physics, vol. 1, John Wiley and Sons, Inc., 1964.
- [12] A. R. Boothroyd, P. E. Gray, D. DeWitt and J. F. Gibbons, Physics Electronics and Circuit Models of Transistors, vol. 2, John Wiley and Sons, Inc., 1964.
- [13] E. J. Angelo, P. E. Gray, C. L. Seale, A. R. Boothroyd and D. O. Pederson, Elementary Circuit Properties of Transistors, vol. 3, John Wiley and Sons, Inc., 1964.
- [14] P. E. Gray, R. D. Thornton, D. DeWitt and E. R. Chenette, Characteristics and Limitations of Transistors, vol. 4, John Wiley and Sons, Inc., 1964.
- [15] John D. Ryder, Networks lines and fields, Prentice-Hall, 1955.
- [16] L. O. Chua, C. A. Desor and E. S. Khu, Linear and Nonlinear Circuits, McGraw-Hill, 1978.
- [17] Ronald A. Rohrer, 回路理論 斎藤他訳, McGraw-Hill, 1971.
- [18] Paul M. Chirlian, 篠崎訳, 集積回路網の解析と合成, 学献社, 1970 年 11 月.
- [19] P. R. Gray and R. G. Meyer, 永田他訳, アナログ集積回路設計技術, 1990 年 10 月.
- [20] B. Gilbert, Translinear circuits: a proposed classification, Electron. Lett., vol. 11, pp. 14-16, 1975, and, Errata, ibid, p. 136.
- [21] Remco J. Wiegink, Analysis and Synthesis of MOS translinear circuits, Kluwer Academic Publishers, 1993.
- [22] Benjamin C. Kuo, Automatic Control Systems, Maruzen Asia Edition, 1967.
- [23] David F. Stout, 加藤他訳, 演算増幅器, マグロウヒル, 昭和 58 年 6 月.
- [24] Sol Rosenstark, 奥沢訳, フィードバック増幅器の理論と解析, 現代工学社, 1987 年 2 月.

- [25] David H. Horrocks, 岩本訳, フィードバック回路とオペアンプ, 啓学出版, 1987 年 1 月.
- [26] K.Kurokawa, Some basic characteristics of broad bands negative resistance oscillator circuit, Bell Syst. Tech. J, vol.48, 1937-1955, 1978.
- [27] A. B. Williams, 加藤他訳, 電子フィルタ, 1981 年.
- [28] M. E. Van Valkenburg, Analog Filter Design, Holt-Sanders International Editions, 1982.
- [29] Wai-Kai Chen, The Circuits and Filters handbook, IEEE press, 1995.
- [30] Aldert van der Ziel, 滝他訳, 雑音, 近代科学社, 昭和 32 年 6 月.
- [31] Aldert van der Ziel, 平野訳, 雑音, 東京電機大学出版局, 昭和 48 年 1 月.
- [32] A.Hajimiri and T.H.Lee, A General Theory of Phase Noise in Electrical Oscillators, IEEE Solid-State Circuits, Vol.33, No.2, 1998.
- [33] Arnold Sommerfeld, 伊藤訳, 電磁気学, 講談社, 1969 年 4 月.
- [34] エリ デ ランダウ and イエ エム リフシツ, 広重他訳, 電磁気学, 東京図書, 1957 年 7 月.
- [35] Edward M. Purcell. 飯田訳, 電磁気学, 丸善, 1989 年 3 月.
- [36] Robert S. Elliott, Electromagnetics, IEEE Press, 1992.
- [37] Athanasios Papoulis, 平岡他訳, 応用フーリエ積分, オーム社, 1967 年 3 月.
- [38] Athanasios Papoulis, 雨宮他訳, 最新電気回路システム学, CBS 出版, 1983 年 9 月.
- [39] T. W. Korner, 高橋訳, フーリエ解析大全, 朝倉書店, 1996 年 8 月.
- [40] William R. Deric, 大槻訳, 複素関数論とその応用, 講談社, 昭和 48 年 2 月.
- [41] Murray R. Spiegel, 氏家訳, 数学公式・数表ハンドブック, マグロウヒル, 平成 7 年 3 月.
- [42] I. E. Getreu, Modeling the Bipolar Transistor, Amsterdam Elsevier, 1978.
- [43] J. J. Ebers and J. L. Moll, Large-signal behavior of junction transistors, Proc. IRE, 42, 1761-1772, Dec. 1954.
- [44] J. M. Early, Effects of space-charge layer widening in junction transistors, Proc. IRE, 40, 1401-1406, Nov. 1952.
- [45] Yannis Tsividis, The MOS Transistor, McGraw-Hill, 1987.
- [46] Ugur Cilingiroglu, Systematic Analysis of Bipolar and MOS Transistors, Artech House, 1993.
- [47] Robert Collin, マイクロ波工学, 石井他訳, 近代科学社, 昭和 44 年 12 月.
- [48] 東光寛英, 論理学入門, 関書院新社, 昭和 39 年 9 月.
- [49] 塩見弘, 信頼性工学入門, 丸善, 1972 年.
- [50] Igor Bazovsky, Reliability Theory and Practice, Maruzen Asia Edition, 昭和 38 年 10 月.

索引

- RC 回路, 5
 アインシュタイン, 18
 アウフヘーベン, 17
 アナログ, 2
 アマゾン, 3
 アリストテレス, 16

 位相回転器, 6

 英雄, 11
 MBA, 13
 エレクトロン, 21

 応答, 6
 近江, 21
 オームの法則, 1, 22, 25
 臆病者, 13
 お殿様, 10
 音楽, 5, 16

 絵画, 16
 解析, 2, 5
 概念, 2
 回路形成, 5
 学問, 15, 17
 餓死者, 9
 考え続ける, 4
 官軍, 10
 関係式, 1
 関数論, 2
 勧善懲悪, 11
 簡略モデル, 3

 記憶, 17
 基金, 10
 紀元前, 9
 基盤, 3
 行政法, 14
 ギリシャ, 21
 ギリシャ哲学者, 16
 キリスト, 7
 ギルバート, 21
 近似式, 1

 空理空論, 1
 蜘蛛, 13
 Kleist, 21
 Gray, 21

 経験のまとめ, 4
 芸術, 3
 継承, 16
 毛皮, 21
 現実, 2, 15
 現代, 18
 現代理論, 17

 コイル, 2
 孔子, 4

 恒星, 18
 合成, 2, 5
 剛体, 2
 コーラン, 19
 極意, 18
 心構え, 1
 古事記, 19
 古代, 16
 古典理論, 17
 琥珀, 21
 個別, 3

 雑音, 4
 悟り, 17

 磁界, 21
 思考能力, 9
 思考力, 9, 13
 磁石, 21
 磁州, 21
 磁石招鉄, 21
 自然界, 1, 4, 6, 16
 自然界の分類, 5
 自然科学, 5
 躰, 14
 質点, 2
 島組, 16
 清水の次郎長, 10
 社会科学, 5
 社会貢献, 10
 宗教, 5
 宗教家, 19
 宗教学者, 6, 18
 集積回路, 3
 集積回路^ん, 4
 周波数領域, 6
 情熱, 1, 15
 商法, 14
 情報, 2, 18
 情報社会, 9
 諸子百家, 6, 16
 人為的, 13
 人災, 9
 人道, 10
 信頼性, 3
 真理, 6, 10
 人類, 15

 性格, 11
 正義, 11
 政権, 11
 聖書, 19
 西洋, 12, 16
 整理, 19
 整理整頓, 17
 セクシャル・ハラスメント, 14
 設計法, 3

 創造力, 18, 19

- 相対性理論, 18
- 相対論, 15
- 続日本紀, 21
- ソクラテス, 16
- ソクラテスの弁明, 9
- 孫悟空, 17
- 存在, 6

- ターレス, 21
- 大学, 12
- 体系づけ, 17
- 大衆, 12, 13
- 大将, 10
- 武田信玄, 10
- 楽しさのため, 4
- 弾性体, 2

- 地位, 10
- 遅延回路, 6
- 知識, 19
- 知識人, 18
- 地動説, 17
- 中国, 21
- 著作権法, 14

- 低域通過フィルタ, 5
- 抵抗, 2
- デジタル, 2
- 哲学, 12
- 哲学者, 9
- デバイス, 2
- 電圧, 1
- 電気回路, 2, 5
- 電気の分類, 39
- 電気の歴史, 21
- 電気屋, 1
- 電子回路, 2
- 電子回路設計, 1
- 天動説, 17
- 天然磁石, 21
- 店舗の基金, 9
- 電流, 1

- 東洋, 16
- 東洋と西洋, 16
- 特殊相対性理論, 3
- 特許法, 14

- 中山報恩会, 4
- 泣き上戸, 11
- 納得, 13
- 南北, 21

- 二宮尊徳, 9
- 日本書紀, 19
- 日本人, 13
- 日本神道, 19
- ニュートンの法則, 18
- ニュートン方程式, 15
- ニュートン力学, 15
- 認識, 12, 17

- 場福郡, 11
- 発振器, 4
- バラツキ, 3
- 犯罪, 13
- 範疇, 17
- 半導体, 2

- 光の速度, 18

- 卑怯者, 13
- 微小信号, 1
- 非線形, 4
- 微分積分, 2
- 白虎隊, 11
- 評価, 5
- ひらめき, 18
- 比例, 1
- ヒンズー教, 4

- フーリエ解析, 2
- フェロー, 13
- 仏陀, 4
- 仏典, 19
- 物理, 2
- 物理法則, 1
- 歩留まり, 3
- プラトン, 16
- 焚書坑儒, 16
- 分類, 5

- ペア性, 3
- ヘーゲル, 17
- ベテラン, 3

- 方位磁石, 21
- 法律, 12
- 墨子, 12
- 本質, 15, 17

- マイクロ波, 2
- マグネシア, 21
- 摩擦電気, 21
- 魔術師, 18, 19
- 間違いの修正, 3
- マナー, 14

- 未知, 15, 17
- 三つ子の魂, 11
- 民法, 14

- 無関心, 12
- 無気力, 12
- 矛盾, 2

- 免許皆伝, 16

- モデル, 2
- モハメッド, 7

- やくざ, 10

- 要因, 15
- 容量, 2
- 四端子網, 2

- Leyden 瓶, 21
- 羅針盤, 21
- ラプラス変換, 2

- 力学, 2
- 理想, 2
- 流体, 2
- 良品率, 4
- 理路整然, 19
- 倫理, 13, 14

- 歴史, 10, 18

- ローレンツ短縮, 18

呂氏春秋, 21
論語, 12
論理学, 5

和銅, 21
笑い上戸, 11

著者紹介

新原 盛太郎 (しんばら せいたろう)

1948年8月	山口県徳山市に生まれる (本籍は博多区須崎)
1972年3月	九州大学工学部卒業
同年4月	東京大学工学部 青木研究室
1973年4月	東京芝浦電気入社
1989年10月	CADENCE社 (USA) に1年間駐在
1990年4月	東芝半導体事業部
2008年4月	東京工芸大学 非常勤講師
同年8月	東芝退社
2019年3月	東京工芸大学退任

[特許]

US 5件登録、EU 2件登録、国内特許約50件以上

[著作]

「ダイオード/トランジスタ/FET 活用入門」 CQ 出版 1987年

「SPICE とデバイス・モデル」 CQ 出版 2005年

「間違いが多い電気知識」東京図書出版 2018年

「基礎電気回路」Amazon・電子書籍 2019年

「アナログ回路設計法」Amazon・ペーパーバック 2022年

「設計のための電気」Amazon・ペーパーバック 2022年

2023年 (令和5年) 2月 初版発行

Copyright © 2023 新原 盛太郎

All rights reserved