

# 電気回路による 論理回路の実現



放射線腫瘍学教室 非常勤講師  
(関西福祉科学大学 保健医療学部 教授)

上杉 康夫

## 1. 今日につながる 電子計算機の理論的確立

今日の電子計算機に関する理論的確立は19世紀半ばまでには成し遂げられていました。

前回の第40回ホームページの広場では、2進数の加算はブール代数(boolean algebra)での論理積と排他的論理和とを組み合わせることで計算可能となっていることを説明いたしました(表1)<sup>\*1</sup>。

さらにド・モルガンの法則(De Morgan's laws)を使います<sup>\*2</sup>、

$$\neg(X \wedge Y) = \neg(X) \vee \neg(Y)$$

また

$$\neg(X \vee Y) = \neg(X) \wedge \neg(Y)$$

と変形可能ですので、このことから、NOT( $\neg$ )とAND( $\wedge$ )のみがあればOR( $\vee$ )が作れる、また逆にNOT( $\neg$ )とOR( $\vee$ )のみがあればAND( $\wedge$ )を作れることを説明しました<sup>\*3</sup>。

すなわち2進数の加算を機械的に行うには、論理積と排他的論理和の計算が機械的に実現すれば可能ですから、NOT( $\neg$ )とAND( $\wedge$ )、またはNOT( $\neg$ )とOR( $\vee$ )の計算が機械的に実現すれば2進数の加算は計算可能になると言えます<sup>\*1</sup>。

| 2進数の加算 |   |     |    | 論理積 |   |              | 排他的論理和 |   |            |
|--------|---|-----|----|-----|---|--------------|--------|---|------------|
| X      | Y | X+Y |    | X   | Y | X $\wedge$ Y | X      | Y | X $\vee$ Y |
|        |   | 2桁  | 1桁 |     |   |              |        |   |            |
| 0      | 0 | 0   | 0  | 0   | 0 | 0            | 0      | 0 | 0          |
| 0      | 1 | 0   | 1  | 0   | 1 | 0            | 0      | 1 | 1          |
| 1      | 0 | 0   | 1  | 1   | 0 | 0            | 1      | 0 | 1          |
| 1      | 1 | 1   | 0  | 1   | 1 | 1            | 1      | 1 | 0          |

表1: 2進数の加算と論理積の排他的論理和  
2進数の加算で1+1=10で桁上りが生じるが、その2桁目は論理積と、1桁目は排他的論理和と同じとなっている<sup>\*1</sup>。

さて年代的にながめると、ブール代数は1847年にジョージ・ブール(George Boole、1815年11月2日 - 1864年12月8日)の最初の本『論理の数学的分析』で紹介され、1854年にはさらに彼の『思考法則の調査』で詳しく説明されました<sup>\*4</sup>。ド・モルガンの法則は1838年に、オーガスタス・ド・モルガン(Augustus de Morgan、1806年6月27日 - 1871年3月18日)が提唱しました<sup>\*5、6</sup>。数学的な二進法確立はゴットフリート・ライプニッツ(Gottfried Wilhelm Leibniz、1646年7月1日(グレゴリオ暦)- 1716年11月14日)により17世紀になされました(図1)<sup>\*7、8</sup>。ライプニッツは全ての数字・四則演算を0と1からなる二進法で表そうとしました。1703年に出した『二進法算術の解説』という論文の中で、二進法のアイデアを解説しています<sup>\*9</sup>。

以上のことから、今日の電子計算機に関する理論的確立は19世紀半ばまでには成し遂げられていたと言えます。

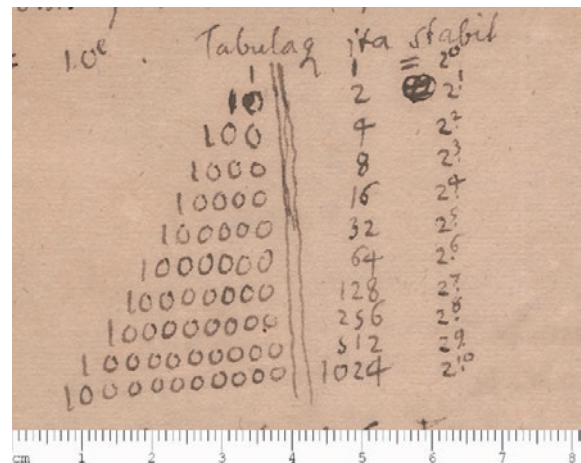


図1: ライプニッツの書簡  
ライプニッツが1697年に書いた書簡<sup>\*22</sup>。二進法の記述が見える。

## 2. 論理演算の電気回路による機械的計算の実現

クロード・シャノン(Claude Elwood Shannon、1916年4月30日 - 2001年2月24日)<sup>※10</sup>は、電子回路の問題と2進数の問題を解決し、電子式の計算機を見事に実現させました。彼は真理値表を電気と結びつけます。電気が流れている時を1として、電気が流れていない時を0として、電気のON/OFFで「1」と「0」を表現するようにし、電気を使った論理演算の実現を可能としました<sup>※11</sup>。

例えば、表2にある論理和演算の計算では、一番上の論理演算を「スイッチのXがON」「スイッチのYがON」の時に「結果であるスイッチがON」になるようにすれば良いのです。これによって論理演算を電気のON/OFFとして実現することが可能です。

論理和演算は、2つの命題がどちらも真でなければ結果も真になりませんでした。

図2にもスイッチがXとYで2つあります。そして、両方ともスイッチがONにならないと結果の部分に電気が行き着くことなく、明かりが付

| X | Y | $X \vee Y$ |
|---|---|------------|
| 0 | 0 | 0          |
| 0 | 1 | 1          |
| 1 | 0 | 1          |
| 1 | 1 | 1          |

表2：論理和 真理値表<sup>※1</sup>



図2：論理和演算の電気回路での表現  
スイッチがXとYとで2つある。そして、両方ともスイッチがONにならないと結果の部分に電気が行き着くことなく、明かりが付くことはない。どちらか片方だけスイッチがONになれば結果は0、両方ともスイッチがONになったときだけ結果は1となる。これによって論理和演算が電気のON/OFFによって実現できている<sup>※11</sup>。

くことはありません。どちらか片方だけスイッチがONになれば結果は0、両方ともスイッチがONになったときだけ結果は1となります。これによって論理和演算が電気のON/OFFによって実現できたことがわかります。

次に論理積演算を電気回路で表現します。論理積演算は、どちらか片方が真なら結果も真になる演算(表3)でした。その場合、図3のように2つのスイッチを並列で繋げれば作ることができます。XとYのどちらかがONになっていれば結果の部分に電気がたどり着くようになっています。これにより、論理積演算を電気回路で実現が可能となりました。

最後は論理否定演算を作ります。論理否定演算は、命題が真の場合は結果が偽、命題が偽の場合は結果が真と逆の値を出す演算(表4)でした。図4では、スイッチがOFFの状態に電気が流れるようになっています。つまり命題が偽の場合は結果が真となり、そしてスイッチをONにすると電気が流れなくなります。論理否定演算も電気回路によって実現が可能となりました。

クロード・シャノンのアイデアによって論理演算が電気回路によって実現可能となりました。

| X | Y | $X \wedge Y$ |
|---|---|--------------|
| 0 | 0 | 0            |
| 0 | 1 | 0            |
| 1 | 0 | 0            |
| 1 | 1 | 1            |

表3：論理積 真理値表<sup>※1</sup>

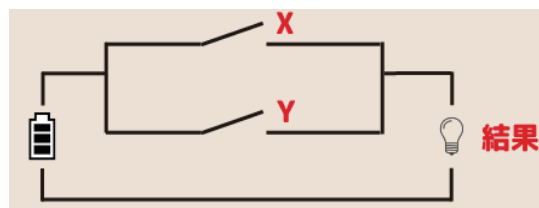


図3：論理積演算の電気回路での表現  
スイッチがXとYとで2つある。論理積演算は、どちらか片方が真なら結果も真になる演算である。その場合、XとYのスイッチを並列で繋げれば作ることができる。XとYのどちらかがONになっていれば結果の部分に電気がたどり着く<sup>※11</sup>。

| X | $\neg X$ |
|---|----------|
| 0 | 1        |
| 1 | 0        |

表4：論理否定 真理値表<sup>\*1</sup>



図4：論理否定演算の電気回路での表現  
論理否定演算は、命題が真の場合は結果が偽、命題が偽の場合は結果が真と逆の値を出す演算である。この場合、スイッチがOFFの状態では電気が流れるようになっている<sup>\*11</sup>。

さらにクロード・シャノンが電気回路で論理演算を実現させ、さらには電気回路での四則演算を実現させました。

### 3. 継電器 (リレー)、真空管、半導体

継電器(リレー)は、1835年にジョセフ・ヘンリー(Joseph Henry、1797年12月17日 - 1878年5月13日)によって発明されました<sup>\*12</sup>。

このリレーの電磁石に電流を流すと、鉄片が電磁石に引き寄せられてスイッチがオンとなります。電磁石の電流を切ると、バネの働きで鉄片は元の位置に戻り、スイッチはオフになります。スイッチングがこれと逆になるリレーも作ることができます。すなわち、電磁石が働いていない時はスイッチがオンになっていて、電磁石が働くと鉄片が引き寄せられてスイッチがオフになります<sup>\*13</sup>(図5、図6)。

このリレーを用いて、1930年代末から40年代にかけて、卓上計算機に代表される当時のデジタル計算機に本格的に改良の手を加えようという人たちが現れました。その代表が、当時ハーバード大学の大学院生であったハワード・エイケンと、後に「デジタル・コンピュータの父」と呼ばれるようになったベル電話研究所のジョージ・ス

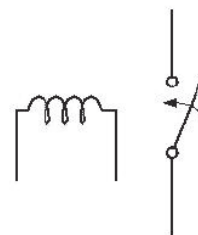


図5：リレー  
リレーの電磁石に電流を流すと、鉄片が電磁石に引き寄せられてスイッチがオンになる。電磁石の電流を切ると、バネの働きで鉄片は元の位置に戻り、スイッチはオフになる。スイッチングがこれと逆になるリレーも作ることができる。すなわち、電磁石が働いていない時はスイッチがオンになっていて、電磁石が働くと鉄片が引き寄せられてスイッチがオフになるものである<sup>\*13</sup>。

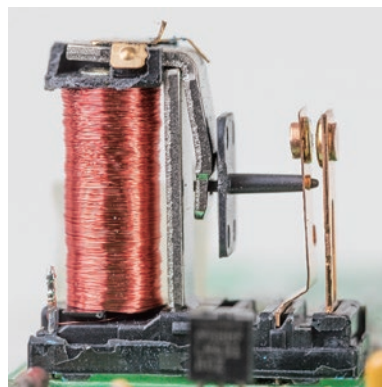


Photo by Raimond Spekking (2021) / CC BY-SA 4.0

図6：継電器(リレー)からカバーを外した状態<sup>\*23</sup>

ティビッツです。そしてこのふたりは、奇しくもほとんど同時期に、まったく別の立場からリレー式の自動計算機を開発しました<sup>\*14</sup>。

リレーは速度が遅く、また機械可動部分があるため、故障しやすいので、そこで考えられたのが(3極)真空管の利用です<sup>\*15</sup>。

エジソンが白熱電球の実験中に発見した熱電子放出(エジソン効果、リチャードソン効果)<sup>\*16</sup>(1884年)が端緒となり、その後フレミングが二極真空管(二極管)を発明(1904年)し、リー・ド・フォレストが三極真空管(三極管)を発明(1906年)しました<sup>\*17</sup>。

真空管は、内部を真空に近く保ったガラス管に、カソード、プレート、グリッドという3つの電極と、カソードを熱するためのフィラメント(ヒータ)が入った構造をしています(図7、図8)。

真空中で金属を熱すると、金属表面から電子が飛び出すという現象(熱電子放出)が知られています。そのような現象を起こしやすい金属でカソードは作られています。フィラメントの熱でカソードを熱すると、カソードから電子が飛び出します。カソードに電源のマイナス極、プレートにプラス極をつないでおくと、飛び出した電子はプレートに引き付けられて真空中を移動します。これによって、カソードからプレートに向かって電子が流れるので、プレート・カソード間に電流が流れます。ところが、その途中に網の目状になったグリッドがあります。グリッドに負電圧をかけると、電子はグリッドから反発力を受けるので、グリッドの網の目を通過しにくくなります。従って、グリッドにかける電圧によって、プレート・カソード間の電流をコントロールすることができ、電氣的にオン・オフ可能なスイッチが作れたこととなります。

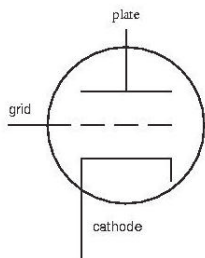


図7：3極真空管

真空管は、内部を真空に近く保ったガラス管に、カソード、プレート、グリッドの3つの電極と、カソードを熱するためのフィラメント(ヒータ)が入った構造をしている(図ではフィラメントは省略)<sup>※17</sup>。



Photo by Starbacks (2005) / CC BY-SA 3.0

図8：真空管<sup>※17</sup>

トランジスタは、電子回路において、信号を増幅またはスイッチングすることができる半導体素子です。ベル研究所の理論物理学者ジョン・バーディーンと実験物理学者ウォルター・ブラッテンは、半導体の表面における電子的性質の研究の過程で、高純度のゲルマニウム単結晶に、きわめて近づけて立てた2本の針の片方に電流を流すと、もう片方に大きな電流が流れるという現象を1947年に発見しました。これが実用化につながった最初のトランジスタである点接触型トランジスタの発見です<sup>※18</sup>。

トランジスタ(図9、図10)は、シリコンなどの半導体でできており、真空管のように真空中の電子の流れをコントロールする代わりに、半導体中の電荷の流れをコントロールしています。トランジスタにも色々な種類がありますが、最初に利用されたのは、バイポーラ型トランジスタと呼ばれるものです。NPN型バイポーラトランジスタと呼ばれるものを図9に示します。

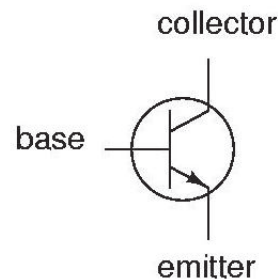


図9：NPN型バイポーラトランジスタ

トランジスタにはエミッタ、コレクタ、ベースという3つの電極がある。ベースからエミッタ間に電流を流していない時は、コレクタ・エミッタ間に電流が流れないが、ベース・エミッタ間にわずかな電流を流してやると、コレクタ・エミッタ間に電流が流れるようになる。これを利用すれば、電氣的にオン・オフ可能なスイッチが作れたことになる<sup>※18</sup>。

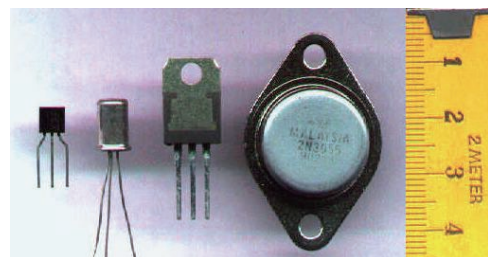


図10：トランジスタ<sup>※18</sup>

現在のコンピュータには真空管は使われていません。真空管にはヒータが必要なため電力を食い、またよく故障すること(電球と同じようにフィラメントが切れる)、動作させるのにトランジスタよりも高電圧が必要なこと、小型化しにくいこと、速度もあまり上げられないことがその理由です。

#### 4. 電気以外を利用した論理回路

論理回路ですが、流れがあるものと、その流れの制御が可能であれば、電気以外のものを使って実現可能と思われます。

検索しますと、水を利用したもの(図11)<sup>※19</sup>、プラレールを利用したもの(図12)<sup>※20、21</sup>を見出しました。

今回は、電気回路による論理回路の実現について記載いたしました。



図11：水を利用した論理回路<sup>※19</sup>



図12：プラレールを利用した半加算器の全体像  
流れはプラレールの鉄道車両模型を使用し、スイッチはポイントを使用しているのが見いだせる<sup>※20</sup>。

#### 参考文献

- ※1：ホームページの広場：第40回「コンピュータでの2進数の加算と論理演算に関して」  
[https://www.ompua.ac.jp/u-deps/ompuda/report/pdf/report\\_59\\_p22-25.pdf](https://www.ompua.ac.jp/u-deps/ompuda/report/pdf/report_59_p22-25.pdf)
- ※2：ド・モルガンの法則 - Wikipedia  
<https://ja.wikipedia.org/wiki/ド・モルガンの法則>
- ※3：ド・モルガンの法則と論理回路 | 日経クロステック(xTECH)  
<https://xtech.nikkei.com/it/article/Watcher/20080311/295950/>
- ※4：ブール代数 Boolean Algebra- 最新の百科事典、ニュース、レビュー、研究  
<https://academic-accelerator.com/encyclopedia/jp/boolean-algebra>
- ※5：Augustus De Morgan  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Augustus\\_De\\_Morgan](https://en.wikipedia.org/wiki/Augustus_De_Morgan)
- ※6：De Morgan, (1838) Induction (mathematics), The Penny Cyclopaedia.  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Penny\\_Cyclopaedia](https://en.wikipedia.org/wiki/Penny_Cyclopaedia)
- ※7：ゴットフリート・ライブニッツ - Wikipedia  
<https://ja.wikipedia.org/wiki/ゴットフリート・ライブニッツ>
- ※8：二進法 - Wikipedia  
[https://ja.wikipedia.org/wiki/二進法#cite\\_ref-leibniz10\\_6-0](https://ja.wikipedia.org/wiki/二進法#cite_ref-leibniz10_6-0)
- ※9：ライブニッツと微積分|アルゴリズムの歴史  
[https://zenn.dev/masahiro\\_toba/books/4d3bb178838675/viewer/140dcf](https://zenn.dev/masahiro_toba/books/4d3bb178838675/viewer/140dcf)
- ※10：クロード・シャノン - Wikipedia  
<https://ja.wikipedia.org/wiki/クロード・シャノン>
- ※11：【コンピュータの仕組み】論理演算の電気回路による実現 - 未来エンジニア養成所Blog  
<https://phoeducation.work/entry/20220823/1661209080>

- ※12：ジョセフ・ヘンリー - Wikipedia  
<https://ja.wikipedia.org/wiki/ジョセフ・ヘンリー>
- ※13：論理回路(4)  
<https://www.cc.kyoto-su.ac.jp/~kbys/kiso/logic/logic4.html>
- ※14：小田徹. コンピュータ開発のはてしない物語 起源から驚きの近未来まで (p.108). 株式会社技術評論社. Kindle版.
- ※15：論理回路(5)  
<https://www.cc.kyoto-su.ac.jp/~kbys/kiso/logic/logic5.html>
- ※16：熱電子放出  
[https://sakura-paris.org/dict/岩波理化学辞典/content/3819\\_1388](https://sakura-paris.org/dict/岩波理化学辞典/content/3819_1388)
- ※17：真空管 - Wikipedia  
<https://ja.wikipedia.org/wiki/真空管>
- ※18：トランジスタ - Wikipedia  
<https://ja.wikipedia.org/wiki/トランジスタ>
- ※19：I Made A Water Computer And It Actually Works - YouTube  
<https://www.youtube.com/watch?v=IxXaizglscw>
- ※20：プラレールで半加算器を設計した話 | サイボウズ式  
<https://cybozushiki.cybozu.co.jp/articles/m001205.htm>
- ※21：鉄道模型レイアウトによる論理回路の構成  
[https://ipsj.ixsq.nii.ac.jp/ej/?action=repository\\_action\\_mon\\_download&item\\_id=222531&item\\_no=1&attribute\\_id=1&file\\_no=1](https://ipsj.ixsq.nii.ac.jp/ej/?action=repository_action_mon_download&item_id=222531&item_no=1&attribute_id=1&file_no=1)
- ※22：1697年に書いた書簡  
[https://ja.wikipedia.org/wiki/ゴットフリート・ライブニッツ#/media/ファイル:Leibniz\\_binary\\_system\\_1697.jpg](https://ja.wikipedia.org/wiki/ゴットフリート・ライブニッツ#/media/ファイル:Leibniz_binary_system_1697.jpg)
- ※23：Delta Electronics DPS-350FB A - board 1 - OEG SDT-SS-112M - case removed-3045.jpg  
[https://ja.wikipedia.org/wiki/継電器#/media/ファイル:Delta\\_Electronics\\_DPS-350FB\\_A\\_-\\_board\\_1\\_-\\_OEG\\_SDT-SS-112M\\_-\\_case\\_removed-3045.jpg](https://ja.wikipedia.org/wiki/継電器#/media/ファイル:Delta_Electronics_DPS-350FB_A_-_board_1_-_OEG_SDT-SS-112M_-_case_removed-3045.jpg)