

# 回路を考える

第1回 歴史と今 --- 先人たちの苦闘、今に残る混乱

ザインエレクトロニクス株式会社

源代 裕治

gendai-yuji@thine.co.jp

## 目的

- 回路に親しむ
- 回路の気持ちを感じられるエンジニアになる

## 方法

- 歴史から学ぶ
  - 先人たちの努力の跡をたどる
- 基礎を再検討する
  - 分かっているつもりの事も考え直す
- 経験を積む
  - 自分で考える

第1回 2018年10月23日(火) 歴史と今 --- 先人たちの苦闘、今に残る混乱

第2回 2018年11月 6日(火) 回路網の話(オフセット付き抵抗編)

第3回 2018年11月13日(火) 回路網の話(変化に応答する回路編)

第4回 2018年11月27日(火) 素材(素子)に親しもう

第5回 2018年12月 4日(火) もっと回路と話そう。話せば分かる。

各回の内容は進捗に応じて見直します。

毎回レポート課題を出します。解けるものを提出ください。

# 『電気』って何ですか？

電子、陽子、電荷などとは違うものだろうか？

幾多の先人たちの苦闘があり、既に多くの事が理解されている。  
が、this big question には lots of answers, some are very long がある。  
先人が見出した答えを理解するだけで、人生の多くを使わねばならない。  
しかも、先人たちが探求のために作った足場が、まだ至る所に残っている。  
完全に整理される見込みは殆どない。跡を辿る者も楽ではない。

# 群盲象を撫でる



『群盲象を評す』とも言う。ジャイナ教の伝承では、6人の盲人が、ゾウに触れることで、それが何だと思うか問われる形になっている。

足を触った盲人は「柱のようです」と答えた。尾を触った盲人は「綱のようです」と答えた。鼻を触った盲人は「木の枝のようです」と答えた。耳を触った盲人は「扇のようです」と答えた。腹を触った盲人は「壁のようです」と答えた。牙を触った盲人は「パイプのようです」と答えた。

それを聞いた王は答えた。「あなた方は皆、正しい。あなた方の話が食い違っているのは、あなた方がゾウの異なる部分を触っているからです。ゾウは、あなた方の言う特徴を、全て備えているのです」と。

他、異説多数 (by Wikipedia)

[http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%95%E3%82%A1%E3%82%A4%E3%83%AB:Blind\\_men\\_and\\_elephant.png](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%95%E3%82%A1%E3%82%A4%E3%83%AB:Blind_men_and_elephant.png)

# Andrew John Wiles

Perhaps I could best describe my experience of doing mathematics in terms of entering a dark mansion. One goes into the first room, and it's dark, completely dark. One stumbles around bumping into the furniture, and gradually, you learn where each piece of furniture is, and finally, after six months or so, you find the light switch. You turn it on, and suddenly, it's all illuminated. You can see exactly where you were.

*in integers*  
for  $n \geq 3$ .

[Quoted from *Did earlier thoughts inspire Grothendieck?* by Frans Oort, who refers to the BBC documentary by S. Singh and John Lynch: *Fermat's Last Theorem*. Horizon, BBC 1996.]

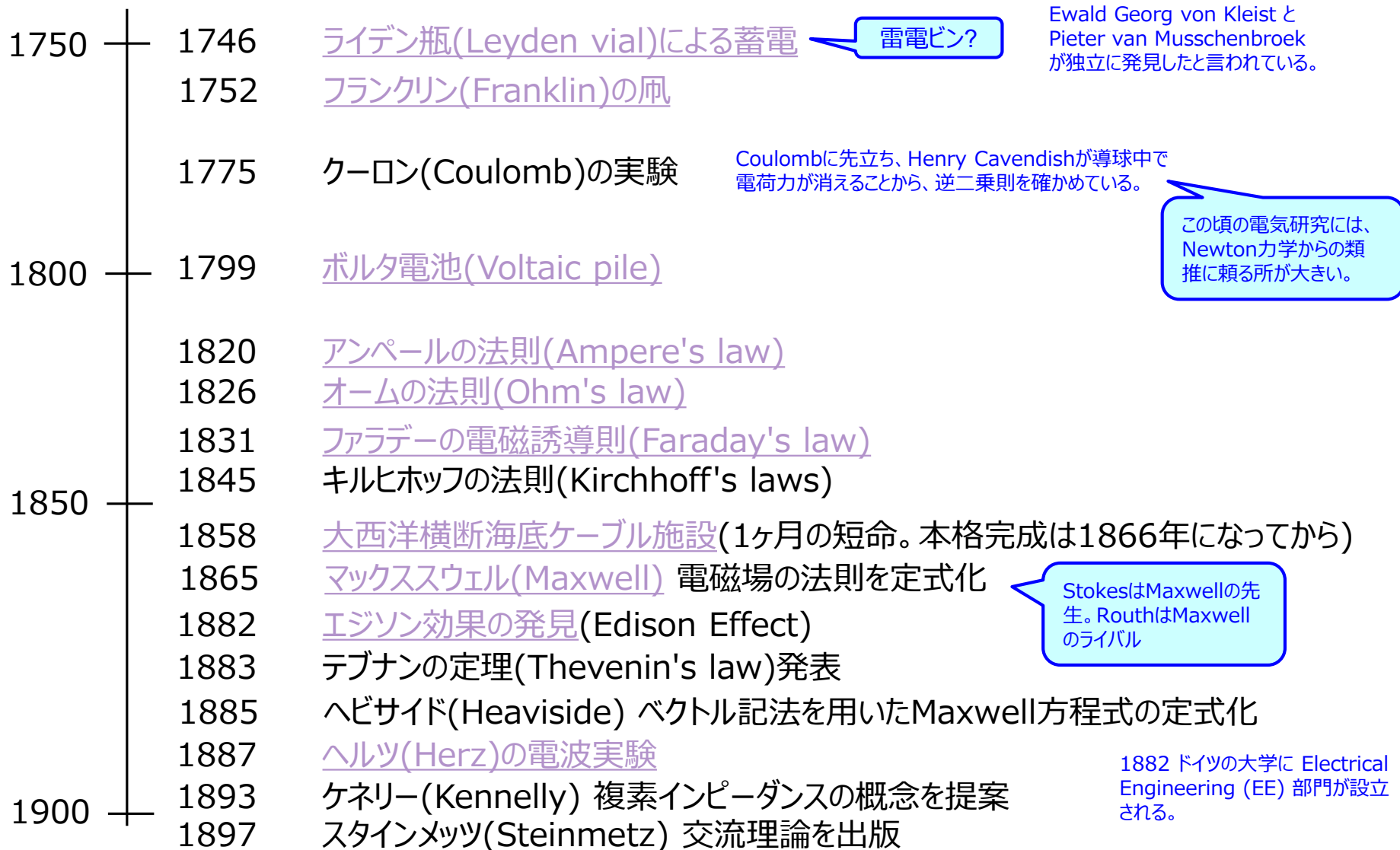
<https://micromath.wordpress.com/2011/11/06/andrew-wiles-on-doing-mathematics/>



<https://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-3493189/British-mathematician-Sir-Andrew-Wiles-gets-Abel-math-prize.html>

# 私の電気史観(19世紀)

何年かに及ぶイベントの表示には  
ブレが避けられない。





# 私の電気史観(20世紀前半)

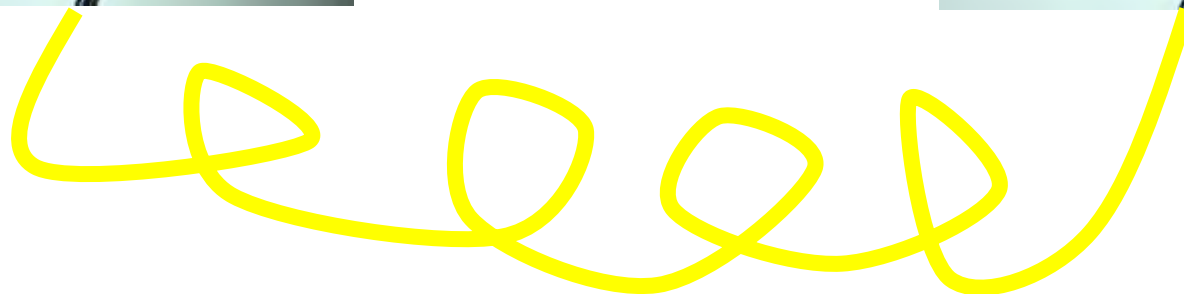
|      |       |                                                |
|------|-------|------------------------------------------------|
| 1900 | 1901  | <u>マルコーニ(Marconi)の無線電信</u> 、大西洋を越える            |
|      | 1904  | <u>フレミング(Fleming)の2極管(Thermionic Valve)</u> 発明 |
|      | 1907  | ド・フォレスト(deForest)の三極管(Audion)発明公開              |
| 1920 | 1918  | アームストロング(Armstrong)のスーパーヘテロダイン発明公開             |
|      | 1920頃 | ラングミュアの真空管(Langmuir's plotron)                 |
|      | 1926  | ノートンの定理発表(Norton's law)                        |
|      | 1927  | ブラック(Black) <u>負帰還増幅器</u> をひらめく                |
| 1940 | 1946  | 電子計算機 <u>ENIAC</u> 稼働                          |
|      | 1947  | 点接触 <u>トランジスタ</u> の発明                          |
|      | 1948  | 接触型トランジスタの発明                                   |
|      | 1958  | 集積回路の発明(Kilby with TI)                         |
| 1960 | 1959  | シリコン・プレーナーICの開発(Noyce with Fairchild)          |
|      | 1956  | 愛媛県新居浜市に生まれる                                   |



# 私の電気史観(20世紀後半～現在)

|      |      |                                             |           |                                       |
|------|------|---------------------------------------------|-----------|---------------------------------------|
| 1960 | 1960 | DEC PDP-1(ミニコン)発売                           |           |                                       |
|      | 1964 | IBM System 360発表                            |           |                                       |
|      | 1965 | $\mu$ A709 OPAm (Bob Widlar with Fairchild) |           |                                       |
|      | 1965 | ムーアの法則発表(Moore's Law)                       |           |                                       |
| 1970 | 1968 | CMOS-IC発表(RCA)                              | 1970      | 文部省認定ラジオ技術講座<br>第1部修了                 |
|      | 1971 | Intel 4004発表                                |           |                                       |
|      | 1973 | Spice1公開                                    | 1971      | 同第2部修了 交流理論を学ぶ                        |
| 1980 |      |                                             | 1981      | 航空学修士(東京大学大学院)                        |
|      |      |                                             | 1981-1988 | 日立製作所にてコンピュータの論理設計                    |
|      |      |                                             | 1988-2015 | ソニーにて、ADC、リードチャネル、イメージセンサ<br>などの開発に従事 |
| 1990 |      |                                             | 2012      | ADC研究で学位(東工大松澤先生に師事)                  |
|      |      |                                             | 2015-     | ザインにて回路開発に従事                          |

クリスタルマイクがスピーカーにもなると聞き、糸電話の代わりに使うことを考案した。  
出来るだけ長い距離で通信しようと、電気屋さんで抵抗が出来るだけ少ない電線と言って購入した。  
これを小学6年の時の夏休みの宿題として提出した。(写真はないが、こんな感じ)  
糸電話みたいに紙の筒を付けて、ちゃんと会話ができる程度には明瞭であった。  
**出カインピーダンス**なんて、存在すら想像できなかった。



10mの電源コード

# デパートで初めて電卓を見て驚く

1969頃



全桁0である  
ことに注目。

当時見た機種とは違うと思うが、雰囲気はこんな感じだった。カシオなんて聞いたこともない会社だった。

テンキーを押すたびに数字が一桁ずつ動いて行くのが不思議であった。当時知っていたのは、電池とスイッチの直列接続、並列接続だけだったので、いくら考えても動作が説明できなかった。

すぐ後に電卓の価格競争が起き、毎年1/2くらいで値下がりした結果、高校生になってから(1974年)、お年玉でカシオの電卓を買うことが出来た。

それまで30分は掛かっていた気体の状態方程式の問題が、1分も掛けずに解けるようになったので感動した。

1968年12月1日に発売された東芝最初のMOS型ICを搭載した電卓。  
当時の価格は190,000円。

<http://www.dentaku-museum.com/calc/calc/91-bunrui1/11-desktop/desktop.html>



# エレクトで遊ぶ

中学に入った頃のことだと思うが、お年玉を全部使って、エレクトを買った。見本の回路を組みむくらの事しかできなかったが、これで回路図記号を覚えた。

スプリングに挟む配線がよく接触不良を起こし、回路図通りには動かないことがあった。

これを購入したしばらくたって、電子ブロックが発売になり、そのスマートさに憧れたものである。

写真はヤフオクに出ていたマイキット100  
私のはプラスチックケースだったが、内容は同じものだろう。

<http://buyee.jp/item/yahoo/auction/e294721891>

1970頃





電気は通信教育で勉強した。使った教科書は手元がないので、左はWEBで入手した写真である。真空管からトランジスタへ移行する時期であったが、内容の殆どは真空管回路である。

中学1年の時に第1部、中学2年で第2部を修了した。それぞれ6巻からなる。宣伝によると、第1部で回路動作が理解できるようになり、第2部で設計が出来るようになる、とのことだった。

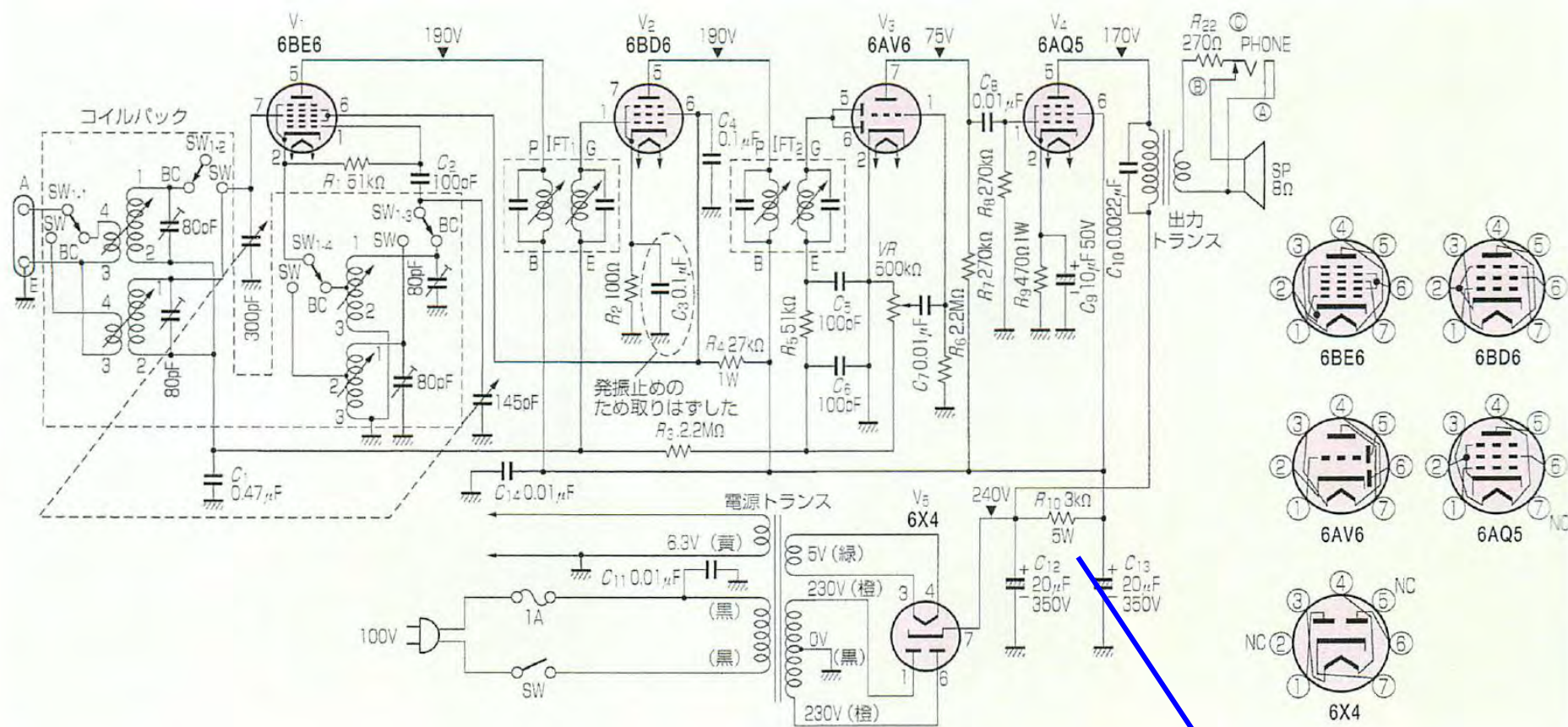
回路の理解には苦しんだので、早く第2部に行って、回路が作れるようになりたい、そうすれば、こんな苦労はしなくて良いのに、と思ったものだ。

今でいう回路の自動合成みたいなことを想像していたのだが、実際には単に回路定数の計算法を習っただけで、回路トポロジを作り出す話はどこにもなかった。当たり前か。第1部は一新されて新字体になっていたが、第2部は受講者数も少なく、まだ旧字体のままで読みづらかった。

それでも第2部で習った交流理論や回路理論が、自分の技術の基礎になっている。有難いことである。



# 5級スーパーラジオ回路図



【図1】 本機の全回路

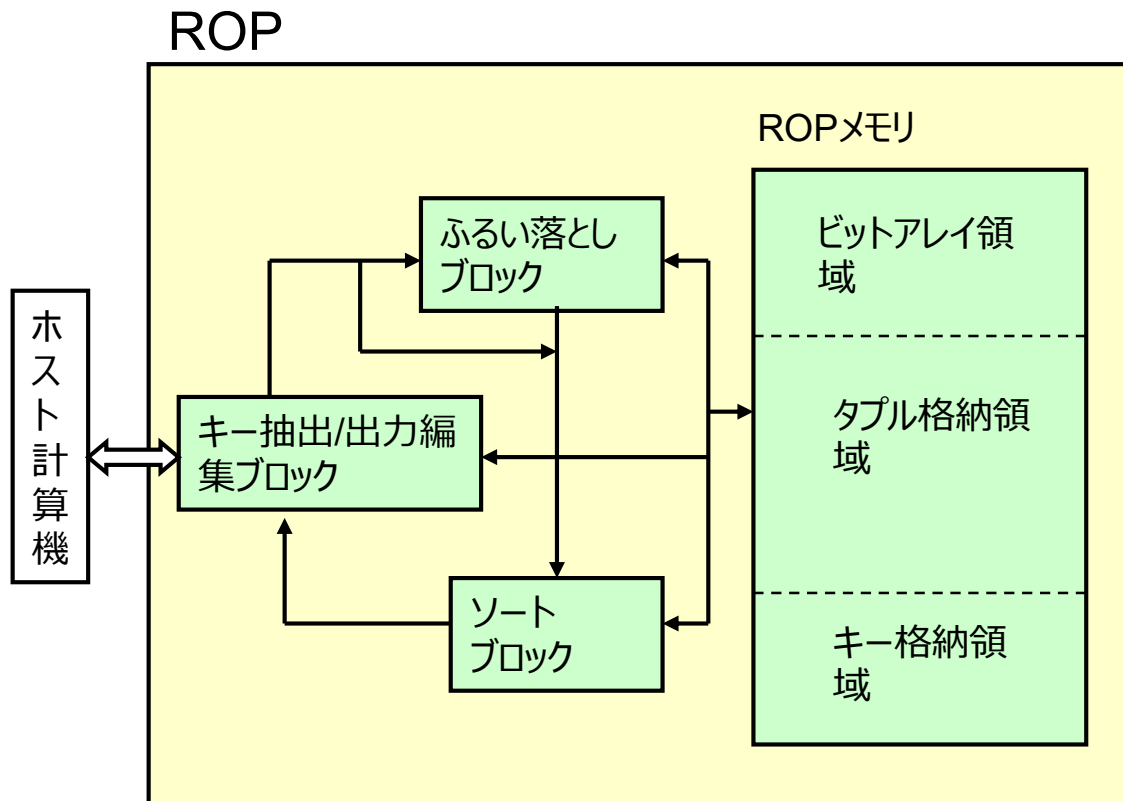
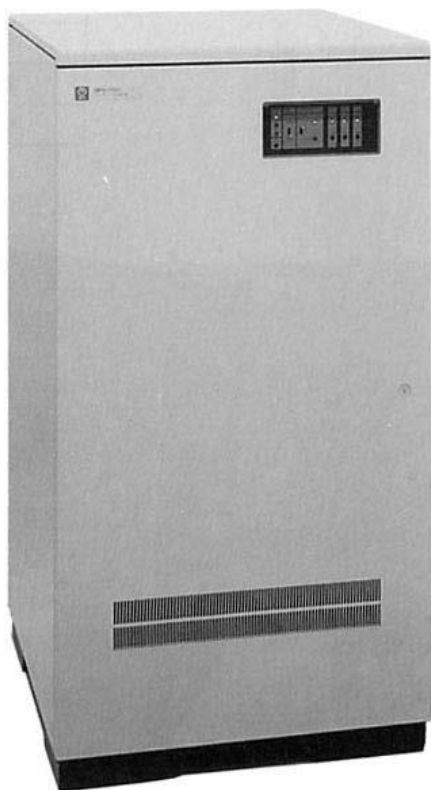
昭和20年代後半、MT管が使用されるようになったころのままの回路構成。この後、真空管ラジオはトランスレスが主流になった（メーカー添付の回路図を一部変更している）

藤本伸一, "2バンド5級スーパーの製作," ラジオ少年の時代, 誠文堂新光社, 2002.

オームの法則から、  
 $P = V^2 / R = 19.2W$   
 ではないのか？

## データベースプロセッサ RINDA

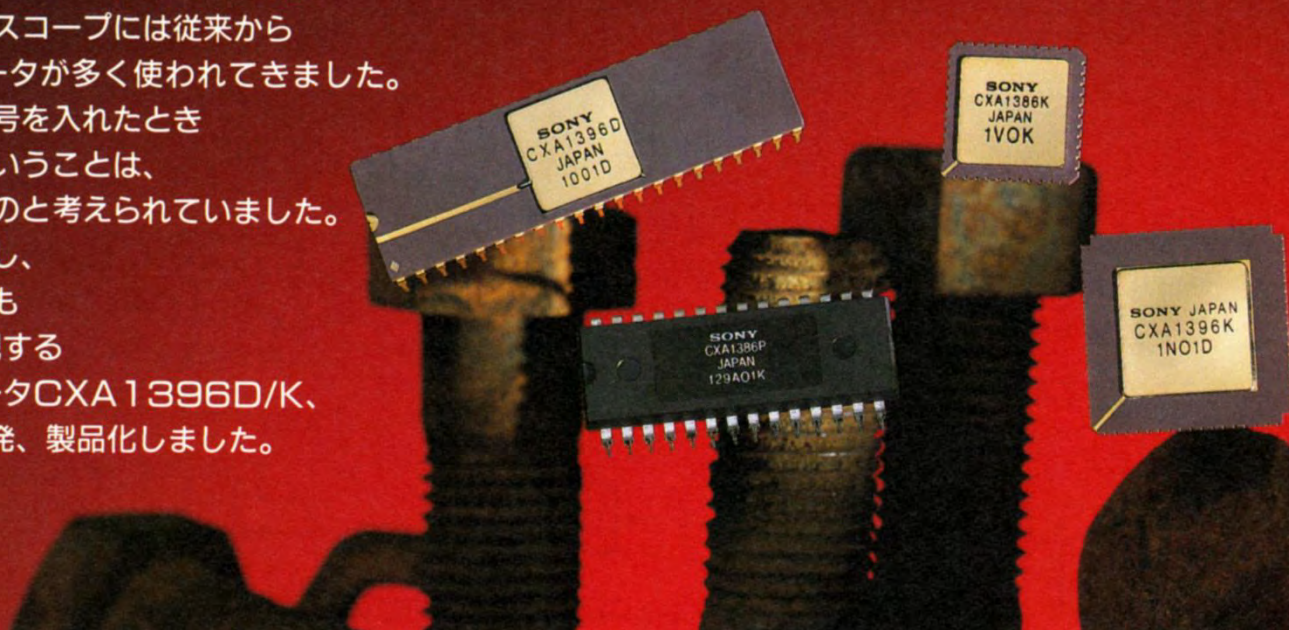
論理設計者4人で、設計構想から納品まで10ヶ月の短期開発プロジェクトだった。



<http://museum.ipsj.or.jp/computer/main/0081.html>



高速なアナログ/デジタル変換を必要とする機器、  
たとえばデジタルオシロスコープには従来から  
フラッシュA/Dコンバータが多く使われてきました。  
しかし、高周波の入力信号を入れたとき  
歪やノイズが多くなるということは、  
ある程度やむを得ないものと考えられていました。  
ソニーではこの点に着目し、  
高周波での使用においても  
きれいなA/D変換を実現する  
フラッシュA/DコンバータCXA1396D/K、  
CXA1386P/Kを開発、製品化しました。



Cx-PAL Vol.12 p.20, Apr. 1992

時代はCMOSになりつつあったが、再びバイポーラに戻り、さらに10年ほど、世の中から遅れることになった。

# オンキヨー INTEGRA713

1970年発売

INTEGRA713は〈コンピュータ〉を駆使することで生まれた新しいアンプです……従来経験的な手直しで作られてきたアンプの超低域でのピークや乱れを鋭く解析し、これを完全に除去することに成功したアンプです。

Spiceが発表されたのは1973年

正統なアンプ「インテグラ」ONKYO

「コンピュータ」生まれ！  
壮大なダイナミックレンジを誇る安定しきったアンプ群……！  
潤いあるピロード・タッチ……新しい音

## 怒濤する激昂の重低音にせよ……！

【INTEGRA】713  
SOLID STATE STEREO AMPLIFIER



713 定格 メイン部 定格出力55W 55W 歪率(1kHz) 定格出力時0.1% 周波数特性(0.1Hz) 10 70,000Hz D.F 100以上  
フリクション コイライオン部入力 220mV RIAA 偏度 0.5dB以内  
入力感度PH -1.2 2.5mV AUX TUNER他 180mV

■ INTEGRA 713 は〈コンピュータ〉を駆使することで生まれた新しいアンプです……従来経験的な手直しで作られてきたアンプの超低域でのピークや乱れを鋭く解析し、これを完全に除去することに成功したアンプです。713では、激烈に過熱する低音が怒濤のように押しよせようとも、今までのように乱れ、揺れ、汚れることなく「安定しきった」動作を示します。強靱な、豊かな低音はインテグラの特徴です。

■ 新しい重補正回路によって「徹底した超低歪率」です……インテグラでは、0.1%以上の歪は問題外とされています(普通は0.5%を基準にしています)。どんなに衝動的な音、どんなに重なり合いもつれ合う音が入っても決して濁りません。■ 0.1%という低歪率を基準に定格出力は55W + 55W、実際の演奏の出力値であるダイナミックパワーは150Wに及んでいます……あらゆるスピーカーをパワフルに駆り立てます(超高級コア使

用の大型電源トランスと大容量ケミコンによって、この強烈なパワーは超低域まで余裕を持って確実に出ます)。ダンピングファクタは100という大きな値です。■ 最高級の石を厳選し、回路設計に贅を尽したインテグラでは、最高のS/N が実現されています。PHの最大許容入力も220mVと圧倒的な値であり、(壮大なダイナミックレンジ)を誇ります。

■ 格調あるデザイン。INTEGRAは画期的な「トップパネル方式」です。

価格 INTEGRA 701 ¥150,000 712 ¥79,000 713 ¥62,000 714 ¥47,000 613 ¥54,000 ……詳細カタログ



## 頭つぶれの〈減衰形過渡応答〉を 初めて解決した… 〈完全安定〉プリメイン!

1Hz付近のピークは、低域の安定度を直接表現する決定的な要素です。

1Hz近辺になると、もう、通常の測定器では測定できない、..

回路トポロジーによって数式化しておいて<コンピュータ>で処理し、1Hz以下、必要なだけ超々低域まで結果をボーデ線図で出力、..

ループ伝達関数が1になる周波数での位相余裕を見...ると、<低域の安定度>が一目瞭然となります。

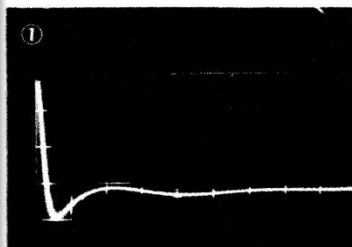
技術者にとっては、常識的な「安易さ」が生命とになります……。

例えば、アンプの低域について、10Hz程度までピークがなければ、それ以下についてははるか可聴帯域外でもあり、全く問題はないだろう……という安易さ。

確かにアンプは、トランジスタOTL回路になってから、NFループ内は低域に関してはCRによる時定数のみとなってこれを大きく取ることは容易であり、10Hzくらいまで全くピークのないのは常識になりました……しかしより精密に見ると、ピークはなくなったのではなく、1Hz近辺に移動しただけであることが分ります。

ところで、この1Hz近辺のピークは、低域の安定度、あるいは過渡応答を直接表現する決定的な要素です……。

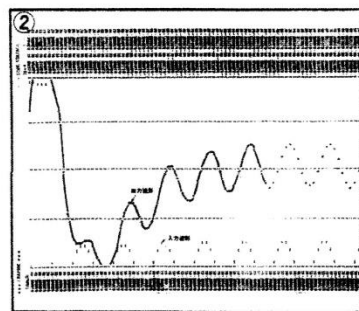
さて、この1Hz近辺となると、もう、



通常の測定器では測定できないため、精密な実験にはいきおいコンピュータの利用が有利になってきます。つまり、回路を回路トポロジーによって数式化しておいて「コンピュータ」で処理し、1Hz以下、必要なだけ超々低域まで結果をボーデ線図として出力させ、NFループのループゲインと位相の廻り

をチェックします(こちら辺は、私たちの最も得意とするところ……)。

そして、ループ伝達関数が1になる周波数での位相余裕を見ます……こうすると、〈低域の安定度〉が一目瞭然となります



ですが、1Hz近辺まで細心の注意を払われていない通常のアンプでは、発振こそしないまでも大変不安定になっており、周波数特性もその周波数でピークを生じています(この点、全段直結方式は、NFループ内に時定数を持たないため、低域の安定性に関しては完全です……逆に、直結方式の最大のメリットはここにあると言うことができます)。

この1Hz近辺のピーク……不安定性が動作上どう現われるかを具体的に見るには、瞬間的なステップ入力を入れ、その応答をシンクロスコープで見た〈ステップ応答 — 第1図〉が便利です。図のように不安定なアンプでは、振動……その周期はピークの周波数に一致します……を

くり返ししながらゆっくり収斂します。つまり、これは、低域に何かの信号が入ると、回路全体が不安定にゆすられ、スピーカに余分な信号が出るということです。

そして……こうしたアンプは、非周期性の「音声信号」がフーリエ級数に展開すると常にDC近い低域までスペクトル分布していることから、常に不安定にゆれていることを意味し、可聴帯域の信号が第2図のようにゆすられ、〈頭つぶれ〉の過渡応答を常に示すことを意味します。

この〈減衰振動形の過渡応答〉は、今まで、あってはならないマッキンの音とかマランツの音を構成していた主要な原因の一つでもあった訳です……。

パワーアップ・インテグラ……新製品733・732、そしてベストセラー725はプリメインを通して、この〈安定性〉を直流域までチェックした初めての製品であり、この〈減衰形の過渡応答〉をシャットアウトした初めてのプリメインです……。

従ってインテグラ・シリーズ、初めて不動の安定性を達成し、初めて厳密な立上りを再現します……(新しい重低音)そして〈新しいトランジェント〉が開花します。以前、鋭敏な〈耳〉が、このアンプは一拍遅れる……などと言っていたのは決して荒唐無稽ではなかったのです!

インテグラ・シリーズ……★偏差なき

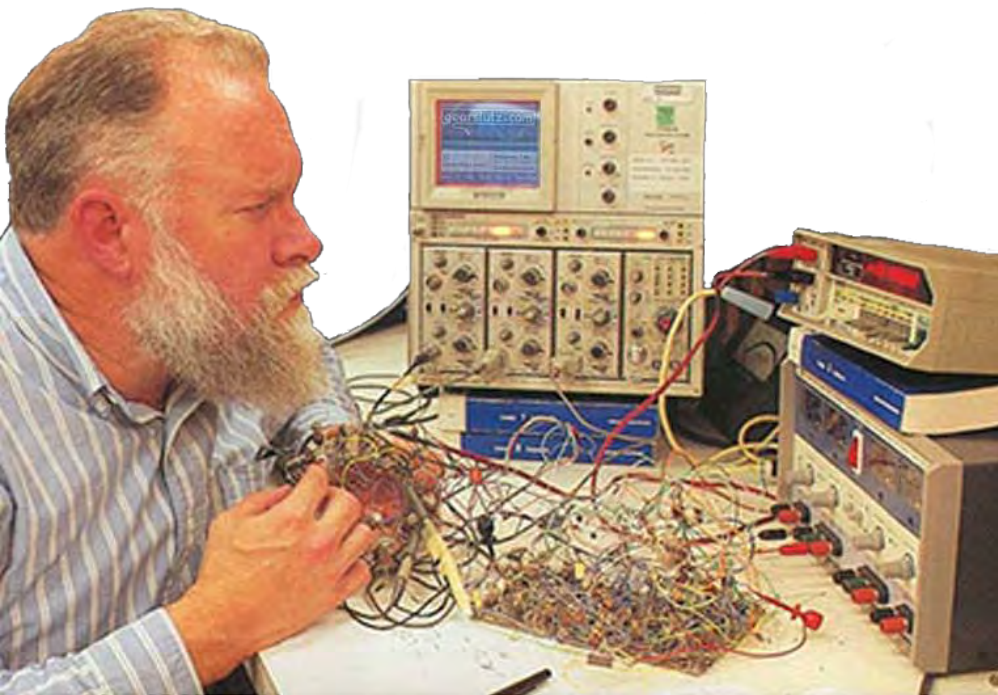
RIAA偏差 ★申し分なく大きい許容入力 ★上限100KHzのPBW (詳細は先月号)……可聴全域に渡り、微小出力から最大出力まで、0.03%以下という限界的な〈直角型〉超低歪率……

ONKYO





<https://www.flickr.com/photos/mightyohm/6926143499>



What's All This Spicy Stuff, Anyhow?

(Part I) November 22, 1990

(Part II) December 13, 1990

(Part 2.5) October 10, 1991

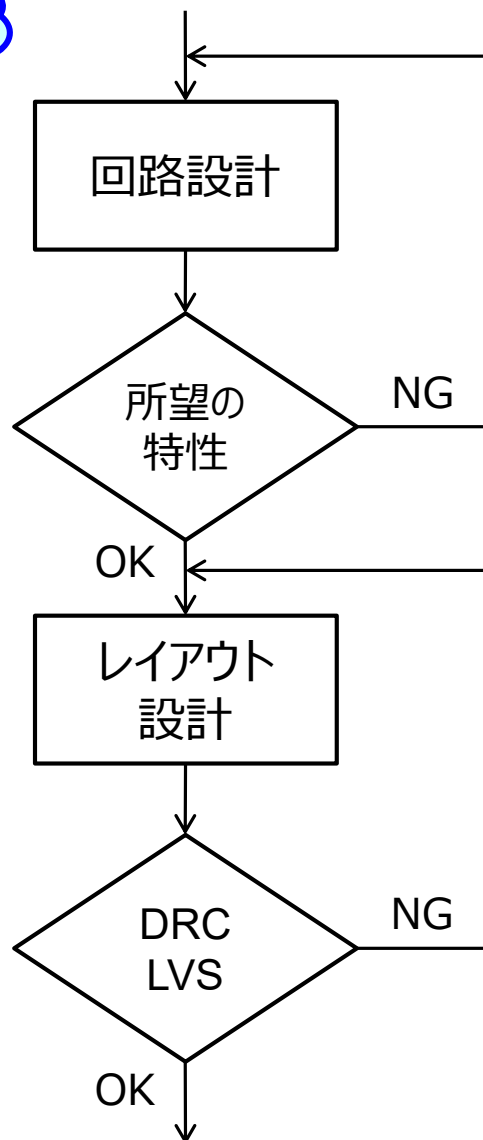
Spiceには一貫し  
て懐疑的だった

Spice can insulate you, shield you away from an understanding, an appreciation, of what makes a real circuit work. You can now take a circuit in Spice, tweak the parameters—try out all sorts of values of resistors—and get a circuit that is “optimized.” In fact, if you are a really smart programmer, you can program the computer to do it all for you. But Spice doesn't really UNDERSTAND your circuit—and neither do YOU if you only optimize things that way.



# アナログIC回路設計フロー

今どきの



すごく単純化すると、こんな感じになる。

simulation以外の方法で回路を仕上げて行くことはもはや非現実的になっている。

レイアウト後に寄生容量や寄生抵抗が確定する。

**LPE:** Layout Parameter Extraction

これにより回路特性が相当変化する。その変化量を想定しながら回路は設計しておくが、それでもレイアウト後の回路修正を無くすことは、今の所まだ不可避である。

**DRC:** Design Rule Checking

レイアウトがプロセスルールを守っているか

**LVS:** Layout versus Schematic

レイアウトが回路と一致しているか

初期のICではDRCと言ってもA4で2ページ程度であった。最先端プロセスでは、印刷したら分厚い本になるだろう。人間が見落としなしにチェックすることは不可能である。所要時間を考えると論外である。レイアウト作業自体も、ツールのサポートなしには不可能になっている。

DRC自体も不合理な所が散見される。それでも市場で問題になっていないため、修正される見込みは殆どない。

# 個人でも使えるCADツール

山ほどあります。本格的なものだけでも漏れなくリストアップするのは難しい。

## 回路シミュレータ

**LTspice**

QUCS

Xyce

TINA, TINA-TI, TINA7(日本語Book版)

SIMetrix, ADI SimPE

OrCAD Lite, Pspice

(Spectre

AFS Analog FastSPICE)

} この辺りはプロ御用達

## 回路方程式

SapWin4

SCAM Symbolic Circuit Analysis in MatLab

## HDLシミュレータ

Icarus Verilog

GPL Cvar

Veritak

ModelSim-Altera Edition

Vivado

GHDL

## レイアウト

WGex

GLADE

# 回路シミュレータ: LTSpice

閲覧履歴

製品

アプリケーション

設計支援

コミュニティ

調べる / 学ぶ

サポート

設計支援 > 回路設計 / 計算ツール > LTSpice

印刷 myAnalogに保存

検索 (設計支援)

シミュレーションモデル

リファレンス設計

評価用 ハードウェア & ソフトウェア

パッケージング、クオリティ、シンボル & フットプリント

回路設計 / 計算ツール

アンプ設計 & リニア デザイン ツール

クロック & タイミング ツール

データコンバータ デザインツール

LTSpice

パワーマネジメン トツール

RF / シンセサイザ ツール

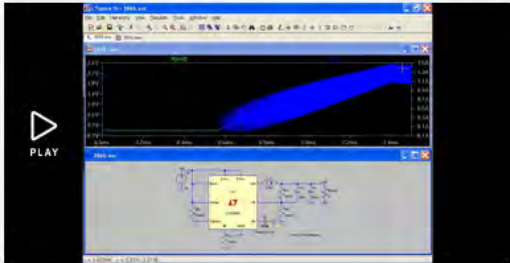
プロセッサとDSP

## LTSpice

LTSpice®は高性能なSpiceシミュレーション・ソフトウェアで、回路図入力、波形ビューワに改善を加え、スイッチング・レギュレータのシミュレーションを容易にするためのモデルを搭載しています。LTSpiceとアナログ・デバイセズの多くのスイッチング・レギュレータとアンプに対応するマクロモデル、そして一般的な回路シミュレーションのためのデバイスライブラリをここからダウンロードできます。

### LTSpiceを使用する利点

通常のSPICEシミュレータと比較して、スイッチング・レギュレータのシミュレーションが非常に高速化され、ほとんどのスイッチング・レギュレータの波形を数分で表示できます。このビデオでは、アナログ回路設計でLTSpiceを使用する利点と、どれだけ気軽に使用開始できるかをご説明します。



### LTSpiceのダウンロード

LTSpice シミュレーション・ソフトウェアのダウンロード:

- LTSpice XVII ダウンロード (Windows 7, 8 and 10用)
- LTSpice XVII ダウンロード (Mac OS X 10.7+用)
- LTSpice IV ダウンロード (Windows XP用) (サポートは終了しております)

<http://www.analog.com/jp/design-center/design-tools-and-calculators/ltspice-simulator.html>



# LTspice Group

Home Mail Tumblr News Sports Finance Entertainment Lifestyle Answers Groups Mobile More ▾

**YAHOO! GROUPS**

Search Conversations Search Groups Search Web

Yuji Mail

Groups Home

LTspice 99+

LTspiceFiles

All My Groups

Manage My Groups

Create a Group +

Browse Groups

Terms (Updated) Privacy (Updated)

Guidelines Feedback

Help Blog

Conversations Photos Files **About** More ▾

Membership ▾ ?

## Group Website

<http://www.linear.com/LTspice>

## Group Information

Members : 67291

Category : Electrical

Founded : Sep 27, 2002

Language : English

## Group Settings

- This is a public group.
- Attachments are not permitted.
- Members cannot hide email address.
- Listed in Yahoo Groups directory.
- Membership does not require approval.
- Messages from new members require approval.
- All members can post messages.

## Group Email Addresses

Post Message : [ltspice@yahoogroups.com](mailto:ltspice@yahoogroups.com)

Subscribe : [ltspice-subscribe@yahoogroups.com](mailto:ltspice-subscribe@yahoogroups.com)

Unsubscribe : [ltspice-unsubscribe@yahoogroups.com](mailto:ltspice-unsubscribe@yahoogroups.com)

List Owner : [ltspice-owner@yahoogroups.com](mailto:ltspice-owner@yahoogroups.com)

## Trending Topics

[See All >](#)

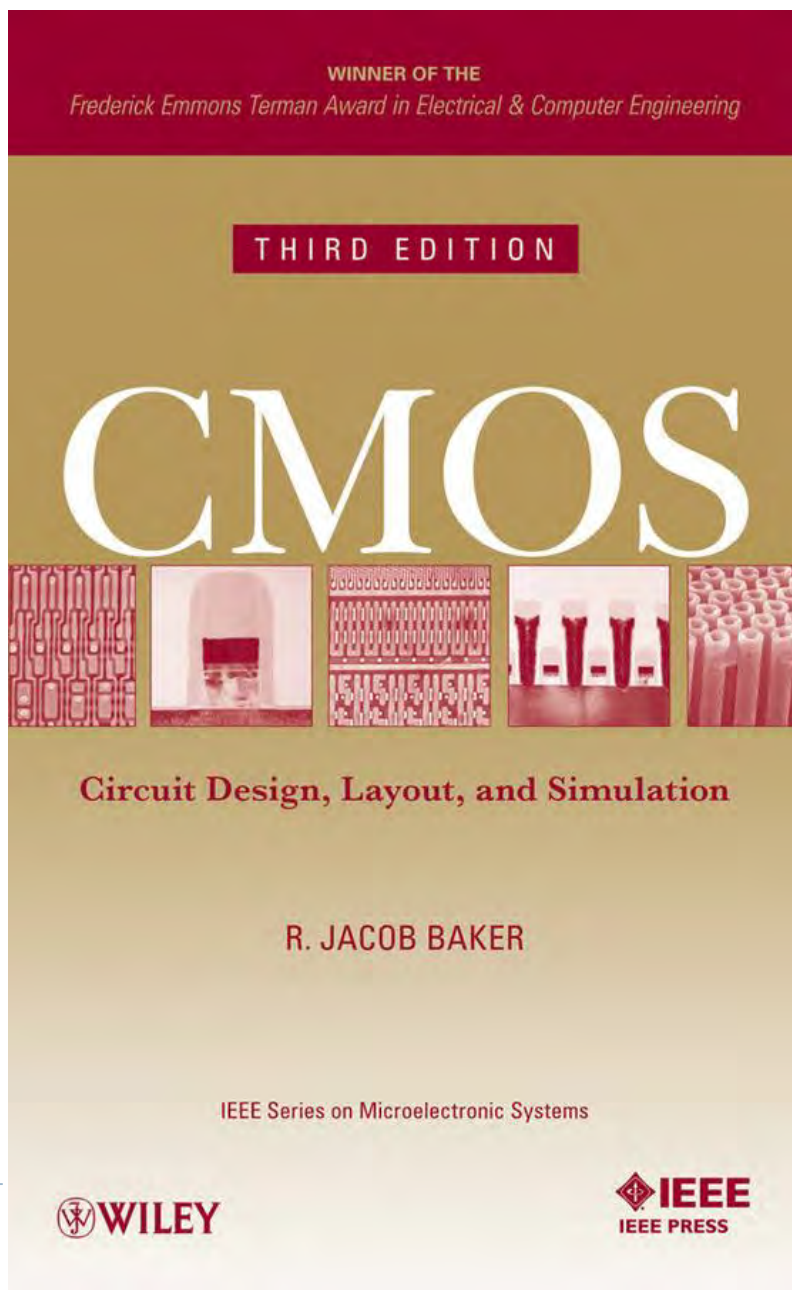
|                                            |          |
|--------------------------------------------|----------|
| <a href="#">ETHERNET Output Simulation</a> | 3 Posts  |
| <a href="#">#INDV and #NQAN errors</a>     | 18 Posts |
| <a href="#">What does @1 do?</a>           | 8 Posts  |

## 2.5V DC/DC Converter

LTspice

Public Group, 67291 members

# デバイスモデルの入手



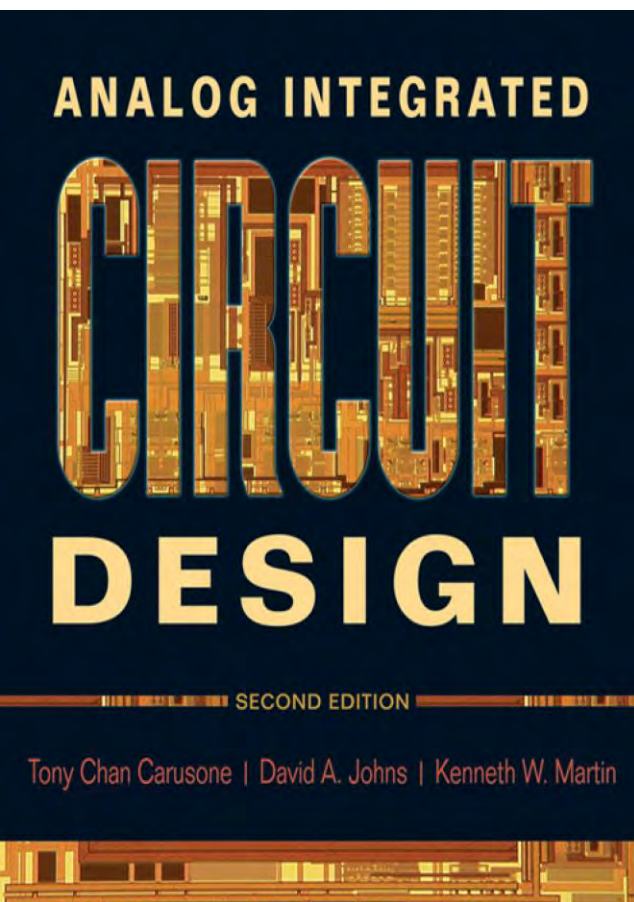
IC回路のシミュレーションに使うデバイス情報は、ベンダーと契約しないと使えないものが殆どである。学習用に使えるものは少ないが、その中でBakerさんの教科書が有用である。

<http://cmosedu.com/cmos1/book.htm>

から、`cmosedu_models.txt` をダウンロードして用いる。

このサイトからは、このモデルライブラリを用いたLTSpice回路も多数ダウンロードできる。(全て for free)

# デバイスモデルの入手



Tony Chan Carusone, David Johns, Kenneth Martin, "Analog Integrated Circuit Design, 2nd Edition," Wiley, Nov. 2011

この教科書のサイト

<http://analogicdesign.com/>

からも、教育用のデバイスモデルが入手できる。

回路はnetlistで供給される。LTspice用のスキーマは、自分で入力することになる。

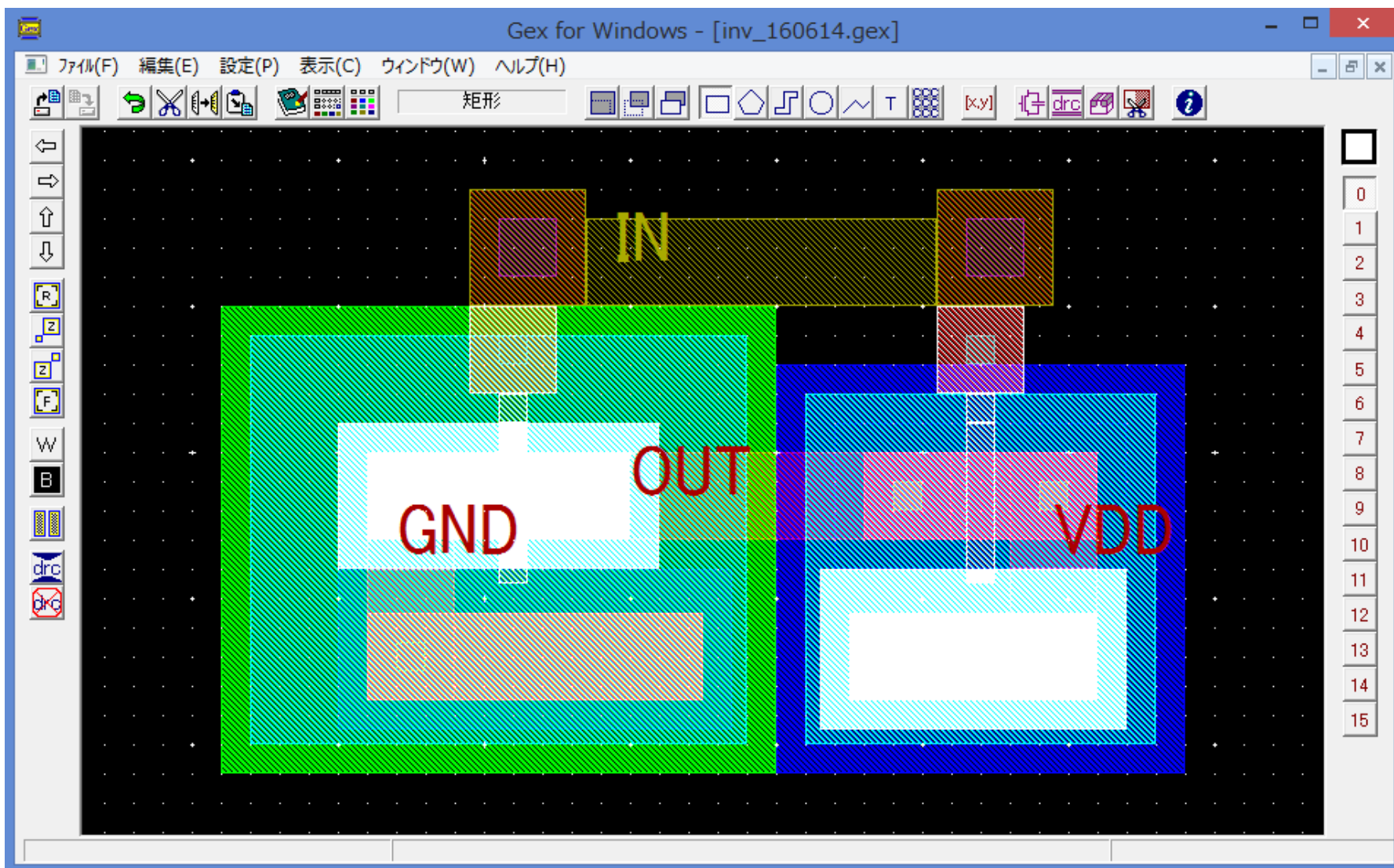
**Table 1.5** MOSFET parameters representative of various CMOS technologies and used for rough hand calculations in this text.

|                                                     | 0.8 $\mu\text{m}$ |       | 0.35 $\mu\text{m}$ |       | 0.18 $\mu\text{m}$ |       | 45 nm |       |
|-----------------------------------------------------|-------------------|-------|--------------------|-------|--------------------|-------|-------|-------|
| Technology                                          | NMOS              | PMOS  | NMOS               | PMOS  | NMOS               | PMOS  | NMOS  | PMOS  |
| $\mu C_{ox}$ ( $\mu\text{A}/\text{V}^2$ )           | 92                | 30    | 190                | 55    | 270                | 70    | 280   | 70    |
| $V_{t0}$ (V)                                        | 0.80              | -0.90 | 0.57               | -0.71 | 0.45               | -0.45 | 0.45  | -0.45 |
| $\lambda \cdot L$ ( $\mu\text{m}/\text{V}$ )        | 0.12              | 0.08  | 0.16               | 0.16  | 0.08               | 0.08  | 0.10  | 0.15  |
| $C_{ox}$ (fF/ $\mu\text{m}^2$ )                     | 1.8               | 1.8   | 4.5                | 4.5   | 8.5                | 8.5   | 25    | 25    |
| $t_{ox}$ (nm)                                       | 18                | 18    | 8                  | 8     | 5                  | 5     | 1.2   | 1.2   |
| $n$                                                 | 1.5               | 1.5   | 1.8                | 1.7   | 1.6                | 1.7   | 1.85  | 1.85  |
| $\theta$ (1/V)                                      | 0.06              | 0.135 | 1.5                | 1.0   | 1.7                | 1.0   | 2.3   | 2.0   |
| $m$                                                 | 1.0               | 1.0   | 1.8                | 1.8   | 1.6                | 2.4   | 3.0   | 3.0   |
| $C_{ov}/W = L_{ov}C_{ox}$<br>(fF/ $\mu\text{m}$ )   | 0.20              | 0.20  | 0.20               | 0.20  | 0.35               | 0.35  | 0.50  | 0.50  |
| $C_{db}/W \approx C_{sb}/W$<br>(fF/ $\mu\text{m}$ ) | 0.50              | 0.80  | 0.75               | 1.10  | 0.50               | 0.55  | 0.45  | 0.50  |



# レイアウトツール: WGeX

MakeLSIに参加登録すると入手できる。







### 最新の20件

2017-08-06

- FrontPage

2016-07-21

- コメント/関連用

- 語集

- 関連用語集

2016-07-09

- WGeXの使い方/  
ビットマップ画像  
でお絵かき

2016-06-29

- WGeXの使い方/  
スタンダードセル  
で論理回路設計

- WGeXの使い方

2016-05-16

- WGeXの使い方/  
抵抗

2016-04-27

- LTSpiceのモデル  
名について

2016-03-28

- コメント/WGeX  
の使い方

2016-03-21

- WGeXの使い方/  
スタンダードセル

- Tutorial

2016-01-02

- 設計CAD

2015-12-20

- RecentDeleted

2015-11-01

- ウィッシュリスト

2015-08-29

- FAQ集

2015-08-13

- Inkscape

2015-07-02

- How to make  
LSI

- How to use CA  
D

- What's News (English)

- MOSモデル

[English Page is here \(tentative\) / Slide for introduction](#)

※(2017/03/09:akita11) このページのコンテンツは、徐々にScrapboxページへ移行していて、こちらは今後更新されない予定です。ブックマークされている方は変更をお願いします。

## 参加登録フォーム <sup>+</sup>

ご興味ある方は、情報交換MLやCAD配布の参加登録をどうぞ！（参加資格は特にありません）→[MakeLSI参加登録フォーム](#)

## What's New <sup>+</sup>

- (2016/1/4) 2015年末のコミックマーケットC89で、紹介リーフレットを頒布しました。A4両面(等倍)印刷して3つ折りするとびったりです。(リーフレット中にリンクのあるこのプロジェクトの背景についてまとめた文書もあります)

- [15MkLSI-leaflet.pdf](#)

- [15MkLSI-C89main.pdf](#)

※2016年度版(17/08/06追記)

- [16MkLSI-leaflet.pdf](#)

- (2015/11/1) 設計環境・ツールなどのウィッシュリストをつくってみました。現状の整理（何が足りないか）と、「それなら作れそう」「こんなものがある」という情報をお待ちしています！

- (2015/8/22) MLやCAD配布の参加登録のフォームをつくりました。ご興味ある方はぜひ！→[MakeLSI参加登録フォーム](#)

- (2015/8/3) 「どこから始めればいいのか」「LSIなんて・・・」という方のためにFAQ集を作りました。「私には遠い世界で関係ない世界」と思われる前に、ぜひご一読ください。

- (2015/7/1) 森山さんのフリーウェア・OSWのCADツールに関する情報ページへリンクをはりました！→[設計CAD](#)

- (2015/6/22) English web site will come soon!

- (2015/4/1) サーバ移転にともない、URLが変更になりました。今後はこちらをお使いください！（不具合などがあれば [akita@ifdl.jp](mailto:akita@ifdl.jp) までご連絡ください）

- (2015/1/19) いろいろ使うファイルを、[GitHub?](#)にまとめていきたいと思います。<https://github.com/akita11/mklsi>

- (2014/12/25) 2015/7月予定の第1回試作トライアルの予定情報をまとめました。どんなツール？どんなもん？とまずは覗いてみるだけでもOKですので、ご興味のある方は、Facebookページのコメントで名乗っていただくか、ここのコメントに記載をお願いします。年明け早々に、CADツールなどの情報を準備したいと思います。（ちなみに参加資格に制限はありません）<https://www.facebook.com/makelsi>

- (2015/5/10) とりあえずメーリングリスをつくっています。覗いてみるだけでもOKですので、ご希望の方はakitaまでご連絡ください。

# 私の工具箱

Spectre  
LTspice  
TINA  
Verilog-A  
Veritakwin

Perl  
Visual Basic  
Delphi  
Turbo Pascal

ADC測定ルーチン  
データ処理

データベースマシンの  
方式検討

Mathematica 11  
MATLAB home R2017b  
LabVIEW home  
Maple 11

PR信号処理  
関数

作文とコーディ  
ングは専ら

秀丸エディタ  
LaTeX  
JabRef  
GNUPLOT

Visio  
PowerPoint  
Paint.NET  
PaintShop Pro  
CorelDraw

Google  
Wiki  
IEEE Xplore  
CiNii  
ResearchGate

論文検索の  
主要DB

IEEE  
電子情報通信学会  
ACM  
情報処理学会  
日本数式処理学会

[orcid.org/0000-0003-0169-5492](https://orcid.org/0000-0003-0169-5492)

工具箱を見れば、  
エンジニアの実力が  
分かる、そうです。

奥村晴彦: アルゴリズム事典  
森口繁一: 数値計算工学  
高橋陽一郎: 実関数とFourier解析1, 2  
Razavi: Design of Analog CMOS Integrated Circuits  
Moby Thesaurus

# AIはエンジニアを救うか？

---

経験的には、このような問題設定は間違っている。

AIをどう使えば設計に有用か、を問うべきである。

良くも悪くもエンジニアの仕事が劇的に変わることは、歴史的必然であろう。

電子計算機が出来たころ、似たような議論があった。

電子計算機が人間を支配しようとしたら、コンセンストを抜けばよい、と当時の専門家は言っていた。オンラインがダウンした時の影響を想像できなかったに違いない。

今の計算機でも多くの点で、人間より賢い。

AIがインフラの一部になる前に、道徳を教えるべきである。

AIに無用の人間と判断されたら、即、社会から抹殺されることになりかねない。

DRCを行うAIは、おそらく6桁位、既存プログラムより遅い。

人間は恐らくAIより6桁遅い。

AIに手順を教えるのは難しい、と思う。

既存のAIはパターンマッチングに特化して高性能である。

権謀術数を駆使して野望を実現するような技は、おそらく、さらに6桁くらい複雑である。

アメリカのゴールドラッシュで大金を得たのは、山師たちにジーンズを売りつけたLevi'sであった。  
この歴史から、どんな教訓を得るか。

# 参考文献 1-1

---

- Bob Pease, "Focus on: Bob Pease on Analog," Vol. 1 and Vol. 2  
[https://www.electronicdesign.com/Electronic\\_Design\\_Library\\_Bob\\_Pease\\_eBook\\_Vol.\\_1](https://www.electronicdesign.com/Electronic_Design_Library_Bob_Pease_eBook_Vol._1), from '90s or so.
- Jim Williams, "Analog Circuit Design: Art, Science, and Personalities," Butterworth-Heinemann, 1991.
- Jim Williams, "The Art and Science of Analog Circuit Design," Butterworth-Heinemann, 1998.
- 松本栄寿, "計測ミュージアム," <http://www.ksplz.info/+museum/>
- 太田浩一, "マクスウェルの渦、アインシュタインの時計," 東京大学出版会, 2005.
- 菊池誠, "若きエンジニアへの手紙," 工学図書, 2006.
- Franco Maloberti and Anthony C. Davies, "A Short History of Circuits and Systems," River Publishers, 2016.



## 参考文献 1-2

---

- Herold S. Black, "Inventing the negative feedback amplifier--Six years of persistent search helped the author conceive the idea "in a flash" aboard the old Lackawanna Ferry," IEEE Spectrum, pp. 55-60, Dec. 1977.
- William Shockley, "The path to the conception of the junction transistor," IEEE Tran. Electron Devices, Vol. ED-23, No. 7, pp. 597-620, July 1976.

# ハルロック



西餅による日本の漫画作品。「電子工作×女子大生 = 今まで見たこともないマンガ！」と銘打ち、かつて「分解魔」、「ドライバー少女」と言われた「はるちゃん」が電子工作で活躍する内容となっている。作中に出てくる「猫ツイッター」は実際に作成され、「Maker Faire Tokyo 2014」へ出展された。

<https://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%8F%E3%83%AB%E3%83%AD%E3%83%83%E3%82%AF>

# レポート課題 1-1

---

本日の講義の中で、間違いもしくは、不適切な発言と思うものがあれば、指摘ください。

提出先: [yuji.gendai@gunma-u.ac.jp](mailto:yuji.gendai@gunma-u.ac.jp)

その他、コメント、意見、講義への要望、なんでもOKです。次回以降に反映して行きたいと思います。

質問も勿論受け付けますが、当面立て込んでいるので、手間のかかる回答は私の講義当番が終わるまで、対応できないかも知れません。

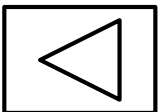
# ライデン瓶(Leyden jar)

1746

ほんの少しではあるが、とにかく電気を蓄えられるようになった。



<https://www.wired.com/2017/01/the-physics-of-leyden-jars/>

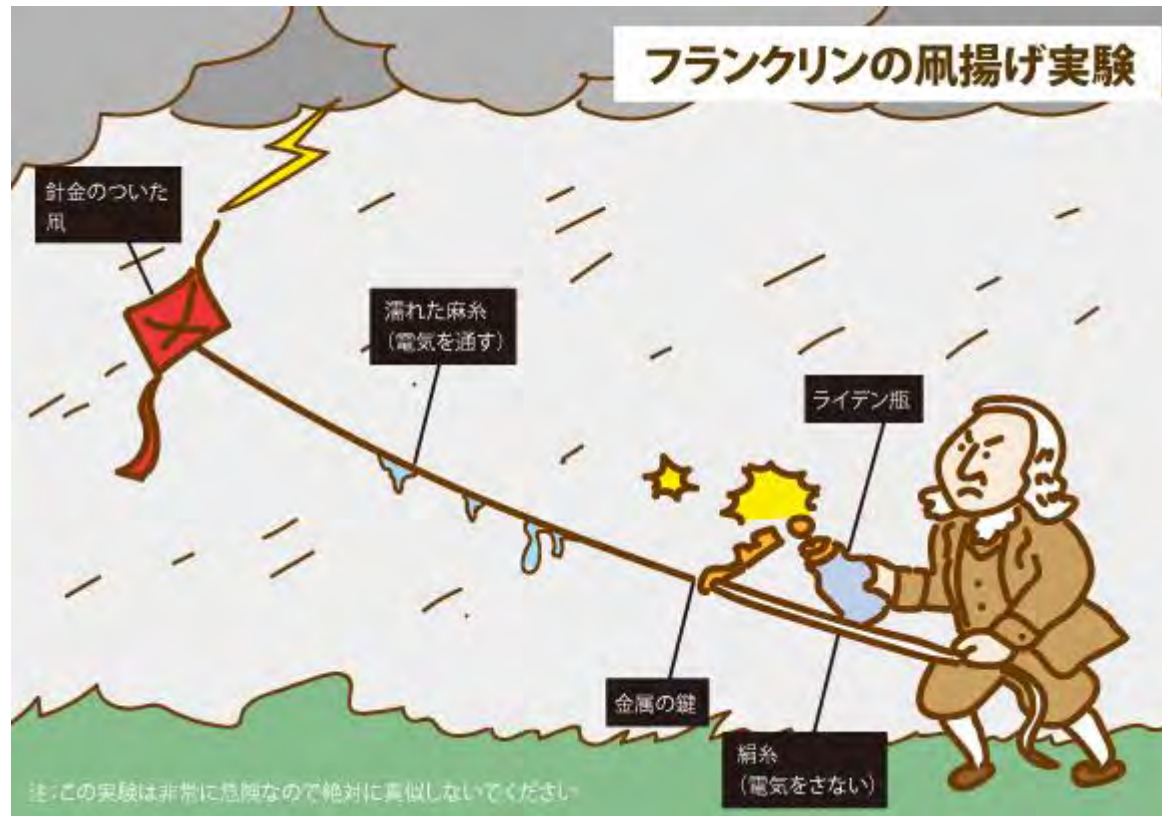




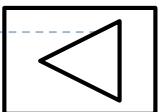
# Franklin's kite experiment

1752年6月

この実験には疑義がとなえられているが、フランクリンは単に雷が電気であると主張して、  
嵐の実験で確かめたという以上に、電気とは何かという疑問に対し、多くの貢献がある。



[https://s3-ap-southeast-2.amazonaws.com/cheers-client-admin-ckeditor/var/www/cheers\\_production/admin.cheers.com.au/releases/20180228153214/public/ckeditor\\_assets/pictures/162/content\\_201803\\_kitamura\\_photo4.jpg](https://s3-ap-southeast-2.amazonaws.com/cheers-client-admin-ckeditor/var/www/cheers_production/admin.cheers.com.au/releases/20180228153214/public/ckeditor_assets/pictures/162/content_201803_kitamura_photo4.jpg)

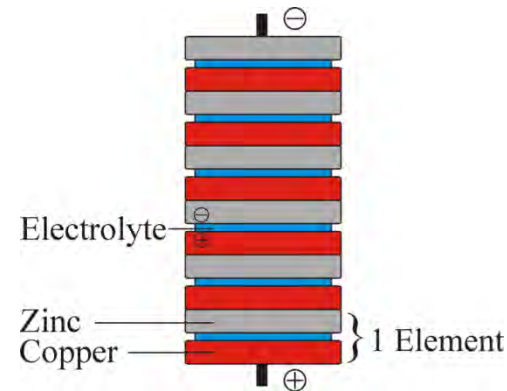


## ボルタ電池の復元模型

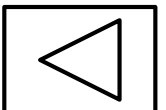


一定の電圧を連続して取り出せるようになったことで、電気に対する人類の理解が一気に進むようになった。その貢献は、必ずしも史実として確立している訳ではないかも知れないが、『電気の歴史ここに始まる』と言っても過言ではない発明であろう。左に引用した資料でも、ボルタ電池の貢献を高く評価している。

## 銅と亜鉛を用いたボルタ電池の仕組み



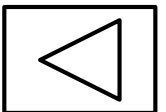
[Wikipedia](#)





電流が方位磁石を動かすというエルステッド(Ørsted)の実験を聞いたアンペールは、直ちに精密な実験に取り掛かり、電流の磁気作用を定式化した。今日Ampere's lawとしてMaxwell方程式の一部となっている法則は、その後Maxwellにより整備された形式で、Ampereが発見した法則と等価ではない。

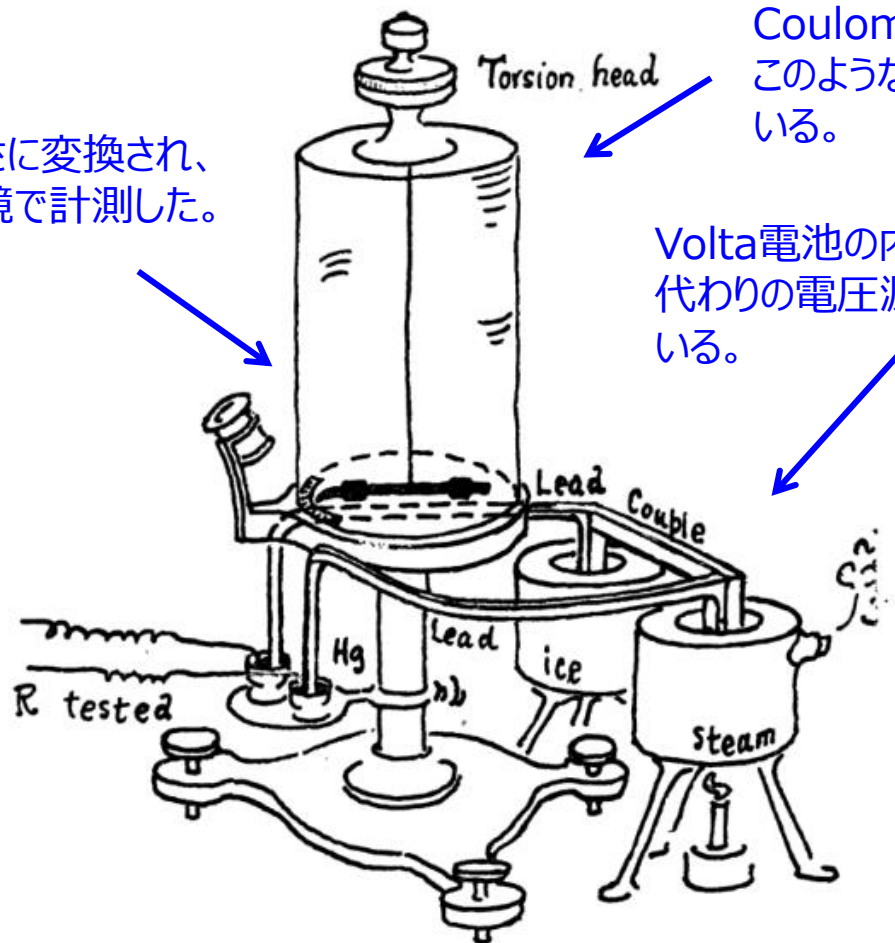
Franco Maloberti and Anthony C. Davies (Editors)  
"A Short History of Circuits and Systems,"  
River Publishers, 2016



電流は磁界の強さに変換され、  
そのトルクを顕微鏡で計測した。

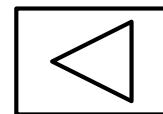
Coulombが発明したねじり秤は、  
このようなものだったろうと想像して  
いる。

Volta電池の内部抵抗が大きかったので、  
代わりの電圧源として熱電対が使われて  
いる。



Ohm's Torsion Balance and Thermocouple

FIG. 3

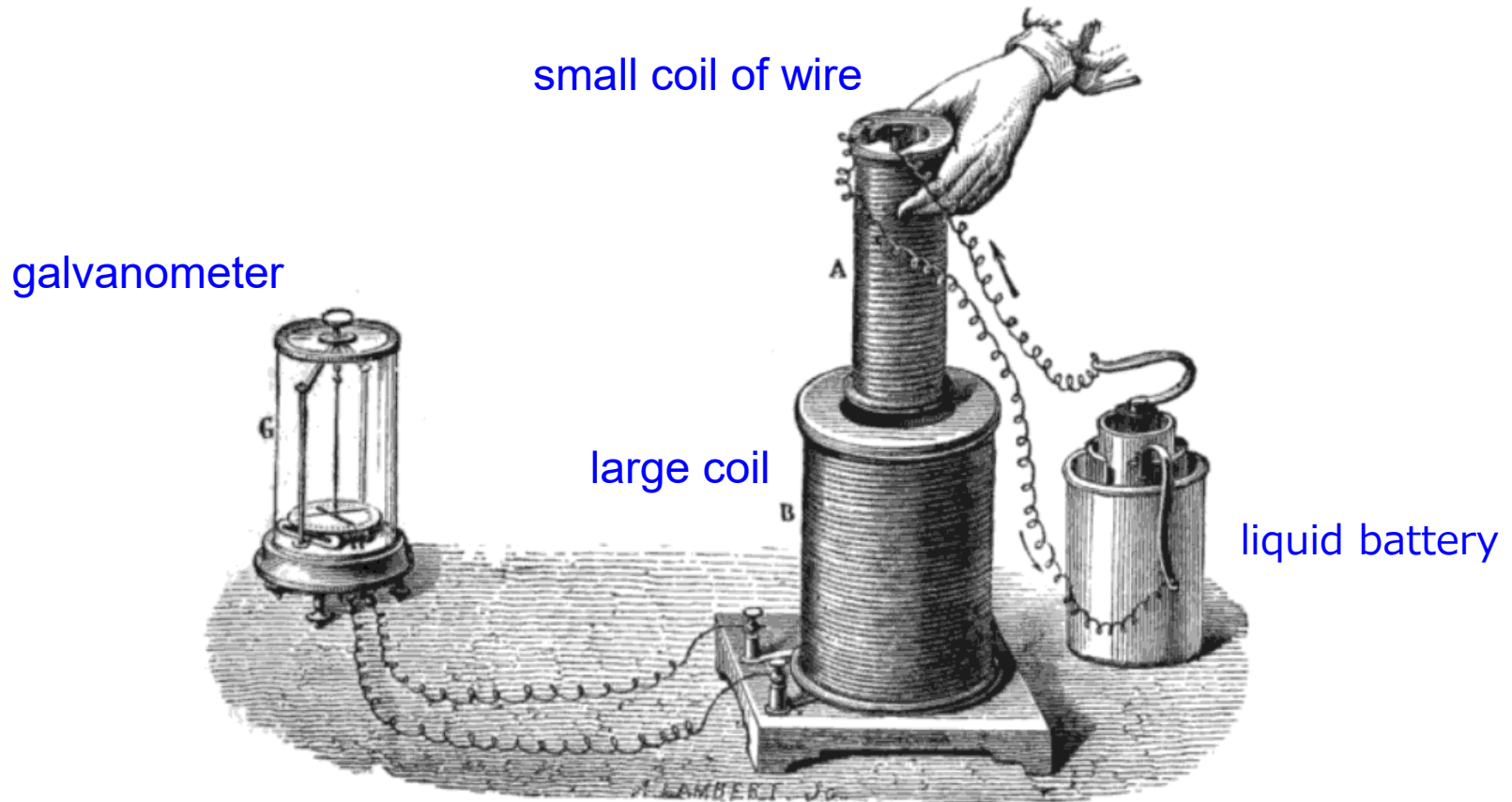




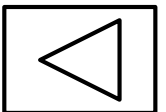
# Faradayの実験

1831

Ampereの法則に触発されて、磁界が電流を作るのではないかと考えたFaradayだが、いくら強力な磁場を作っても電流は検出されなかった。ある日、実験器具を片づけようとバッテリーを外した瞬間、検流計の針がピクリと動いたことに気が付いた。(出展不明)

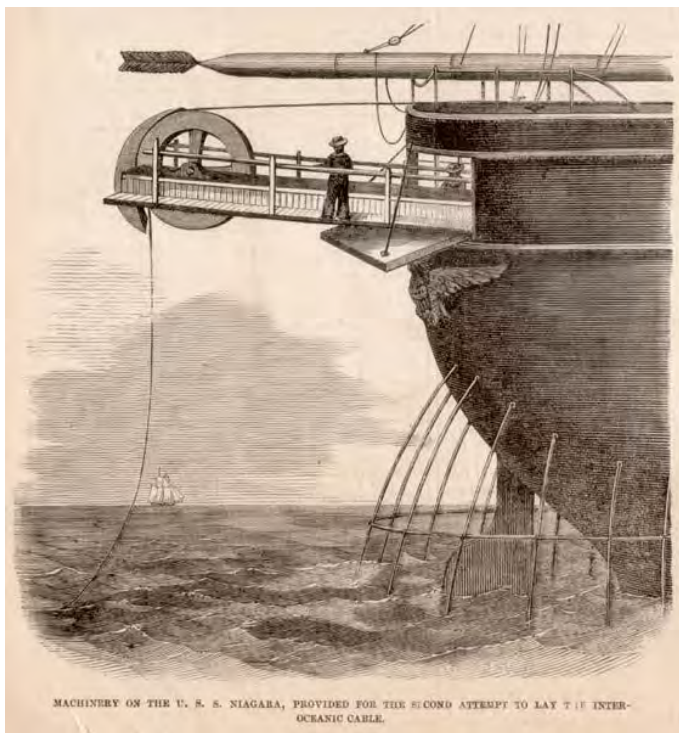


Arthur William Poyser, "Magnetism and Electricity: A Manual for Students in Advanced Classes," Longmans, Green, & Co., New York, p.285, fig.248, 1892



# 大西洋横断海底ケーブル

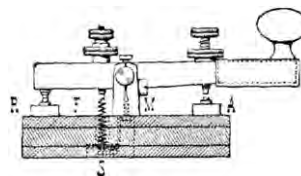
1858



大西洋横断海底ケーブルの敷設の試み **U.S.S. Niagara**

<http://www.atlantic-cable.com/Article/1858Leslies/index.htm>

モールス符号  
は、既に広く  
使われていた。



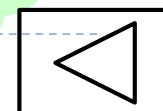
99語/16.5時間



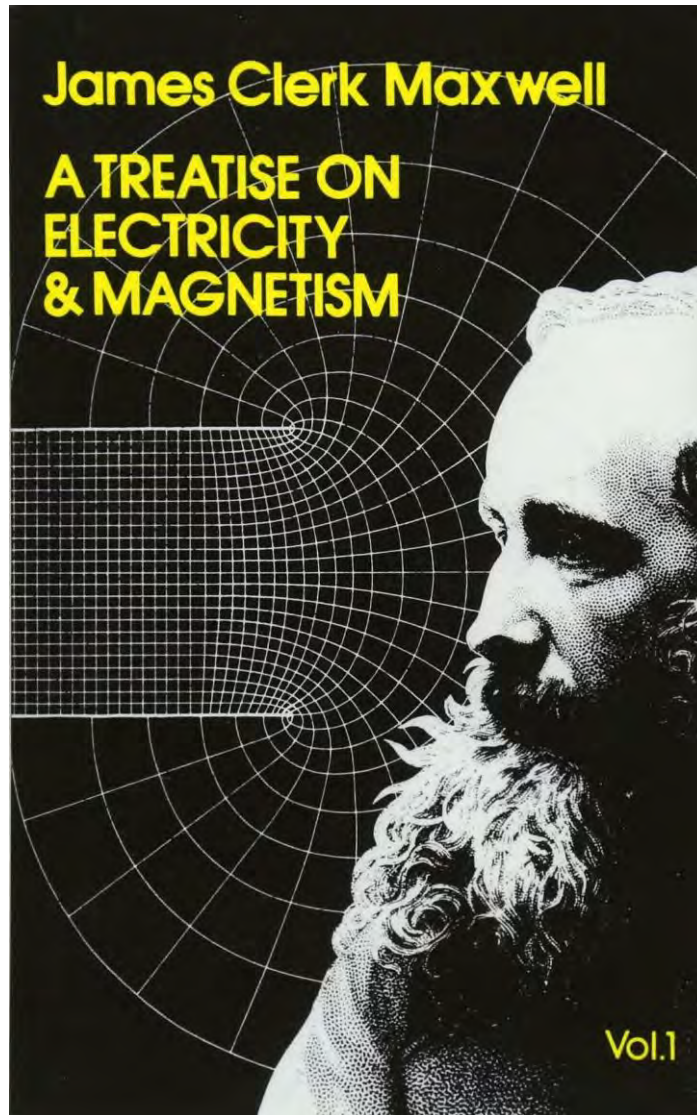
Map showing the position of the cable from London to New York

<http://www.atlantic-cable.com/Cables/1857-58Atlantic/index.htm>

伝送線路の  
理論は、まだ  
無かった

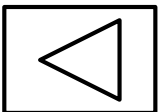


# Maxwell電気磁気論考



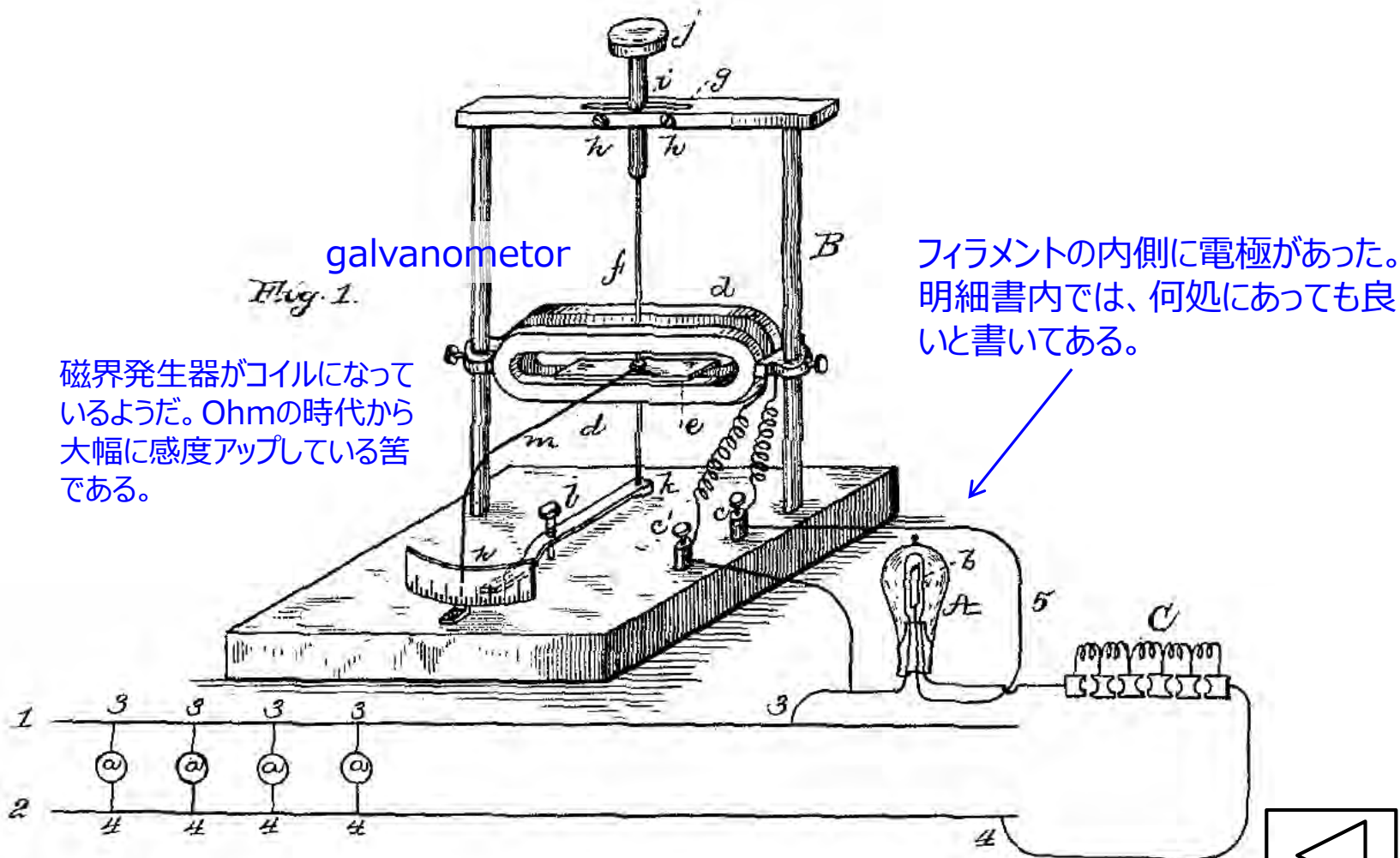
Dover版Vol.1の表紙。文字が橙のVol.2がある。

- 1873 初版
- 1879 没。享年48歳
- 1881 第2版。  
Maxwellが作業中だった改訂版を  
W.D.Nivenが完成させた。
- 1891 第3版。J.J.Thomsonに依る。  
Doverから入手できるのはこの版。  
序文には、Maxwell以降の進歩を反映  
しようとするが別の本になってしまうので  
断念した旨の記載がある。





電極の整流作用ではなく、発光量に比例する効果を利用したとする発明である。(現象そのものは特許にならない。)  
好適にはプラチナ板に正の電圧をかける、との記載があるが図からは読み取れない。実際には動作しなかったそうである。



T. A. Edison, "Electrical Indicator," US Patent No. 307301, Patented Oct. 21, 1884

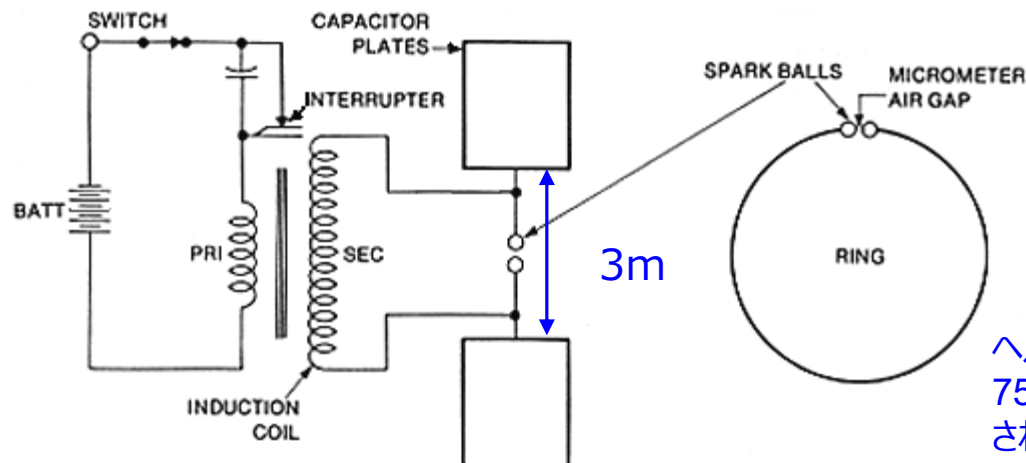


こんな装置で、2mの伝送を確認した

送信側のギャップは3/4cm

火花は顕微鏡で観察した。

実際に用いられたのはライデン瓶で、数万Vをかけていた。



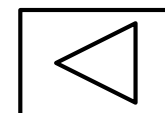
[http://people.seas.harvard.edu/~jones/cscie129/nu\\_lectures/lecture6/hertz/Hertz\\_exp.html](http://people.seas.harvard.edu/~jones/cscie129/nu_lectures/lecture6/hertz/Hertz_exp.html)

両端に直径30cmの金属球

発生周波数は60MHzから500MHzと推定されている

ヘルツの手紙には、一辺75cmの正方形と記載されている。

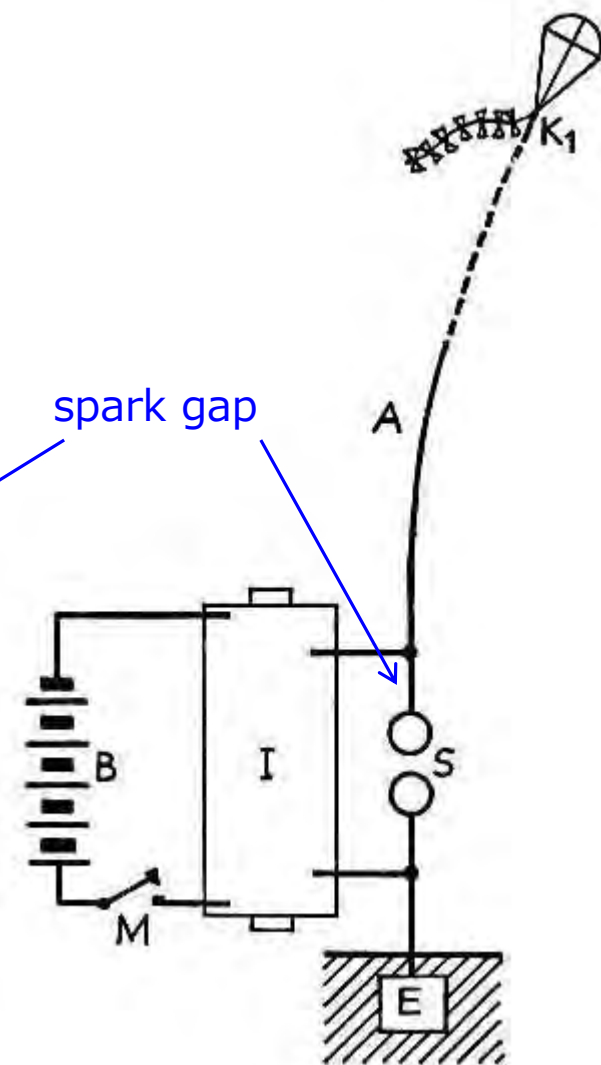
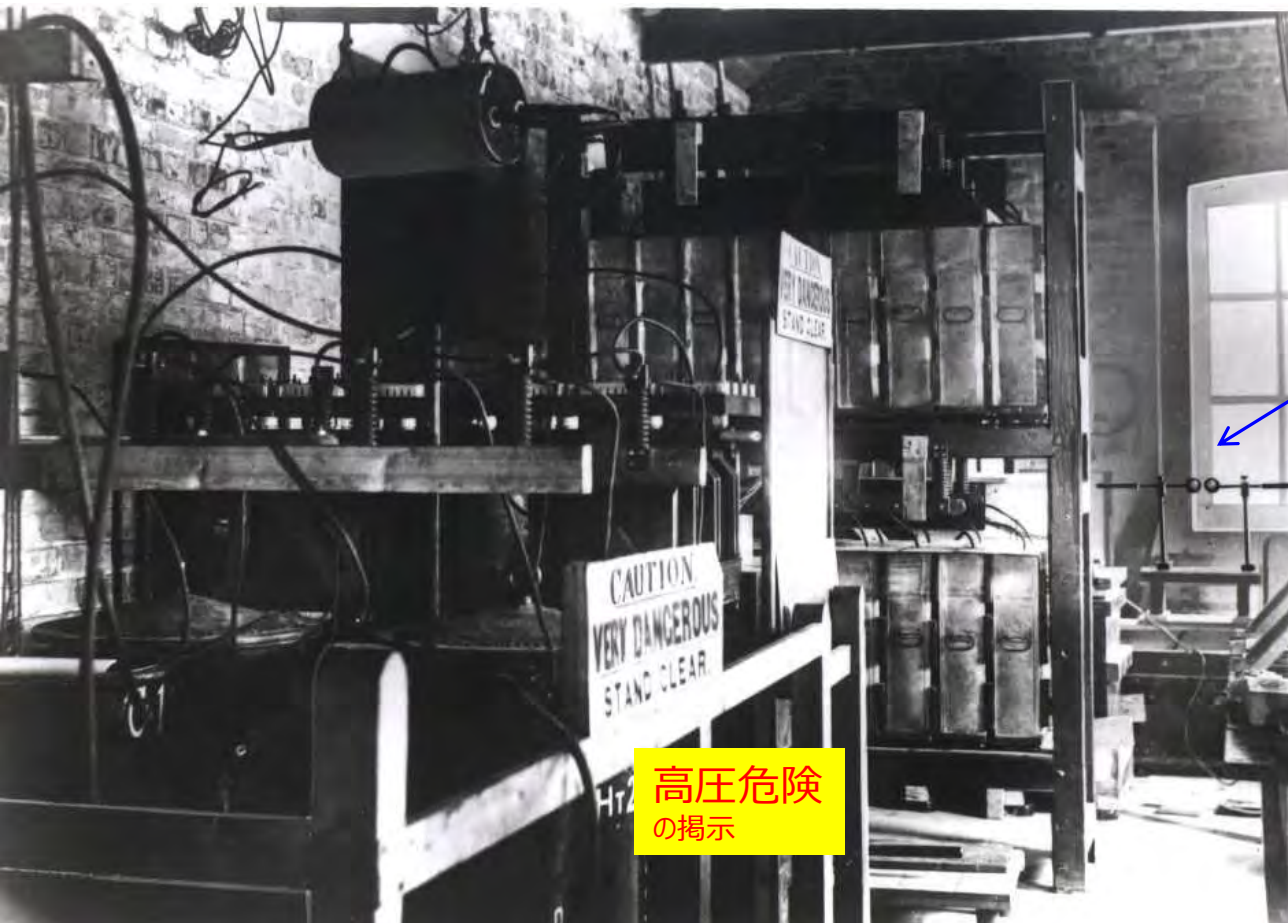
<https://sites.google.com/site/dianbolilunyanjiusaito/home/-5-herutsu>



# Marconiの無線送信機

1901

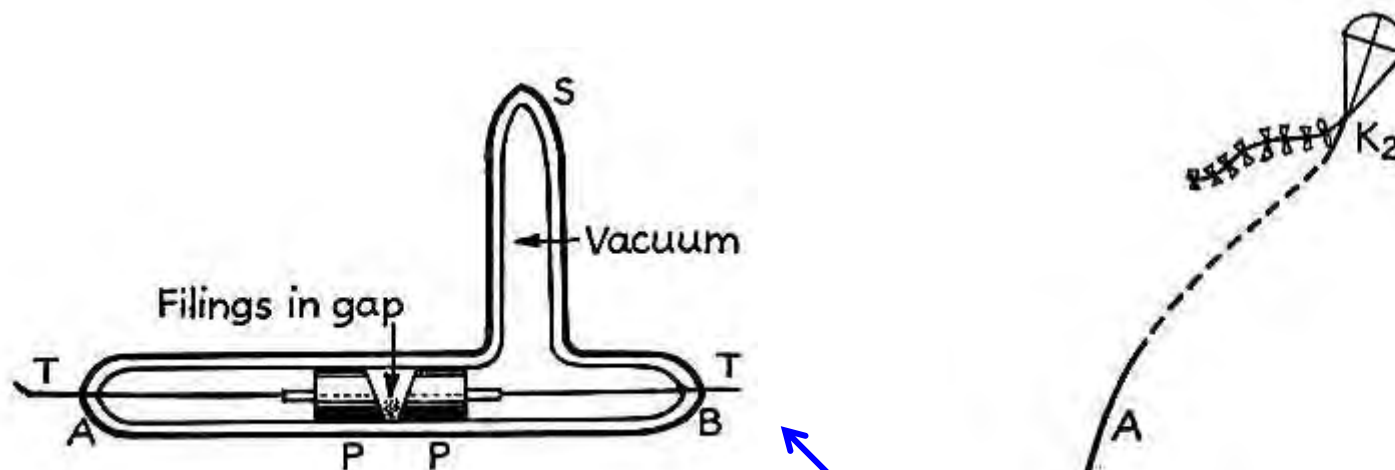
The Marconi Company transmitter at Poldhu, Cornwall, Circa 1901



<http://www.newscotland1398.net/nfld1901/marconi-nfld.html>

片極が地面になっている。

# Marconiの無線受信機



Marconi's version of the coherer. A-B=evacuated glass tube; T-T=platinum terminal wires; P-P=silvered beveled plugs; S=side tube for evacuation.

Adapted from "A History Of The Marconi Company", by W.J. Baker, Methuen (1970).

<http://www.newscotland1398.net/nfld1901/marconi-nfld.html>

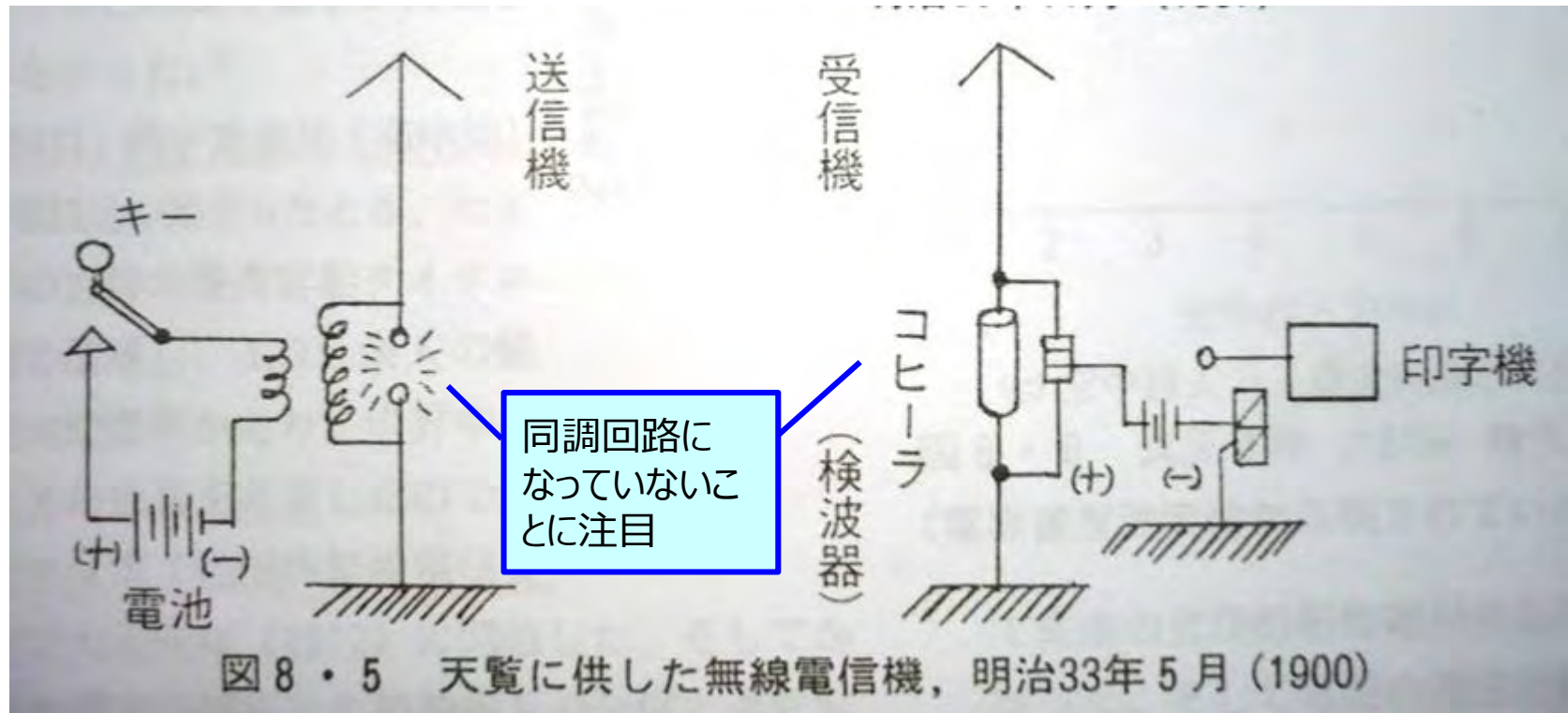
# 敵艦見ゆ

1905年 日本海海戦(日露戦争)

ロシアのバルチック艦隊発見は無線電信で連絡された。

明治36年(1902年)頃、東京芝に逓信学校がありましてね、教室の正面には『電気とは不可思議なるもの也』と書いた額があがっていましたよ。

[https://www.google.co.jp/search?source=hp&ei=MpecW9\\_RJsiR8wXY7Y6wDg&q=%E6%95%B5%E8%89%A6%E8%A6%8B%E3%82%86+%E3%83%A2%E3%83%BC%E3%83%AB%E3%82%B9&oq=%E6%95%B5%E8%89%A6%E8%A6%8B%E3%82%86+%E3%83%A2%E3%83%BC%E3%83%AB%E3%82%B9&gs\\_l=psy-ab..3..0i30k1.2035.8458.0.9346.15.14.0.0.0.0.174.1572.0j12.13.0....0...1c.1j4.64.psy-ab..2.12.1532.6..0j35i39k1j0i4k1j0i4i37k1j0i4i30k1j0i13i30k1.110.rIByLqUTkh](https://www.google.co.jp/search?source=hp&ei=MpecW9_RJsiR8wXY7Y6wDg&q=%E6%95%B5%E8%89%A6%E8%A6%8B%E3%82%86+%E3%83%A2%E3%83%BC%E3%83%AB%E3%82%B9&oq=%E6%95%B5%E8%89%A6%E8%A6%8B%E3%82%86+%E3%83%A2%E3%83%BC%E3%83%AB%E3%82%B9&gs_l=psy-ab..3..0i30k1.2035.8458.0.9346.15.14.0.0.0.0.174.1572.0j12.13.0....0...1c.1j4.64.psy-ab..2.12.1532.6..0j35i39k1j0i4k1j0i4i37k1j0i4i30k1j0i13i30k1.110.rIByLqUTkh)



日本の商船の電気技術史について (明治以前から第2次世界大戦終了(昭和20年)まで) 第8章

<https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwimibG3sLzdAhUDfrwKHUNSAkMQFjAAegQICAC&url=https%3A%2F%2Fwww.jasnaoe.or.jp%2Fzousen-siryokan%2F2013%2F130815-ootani%2Footani-07.pdf&usq=AOvVaw0KQ1C-LigX6oWsRTIfazA>





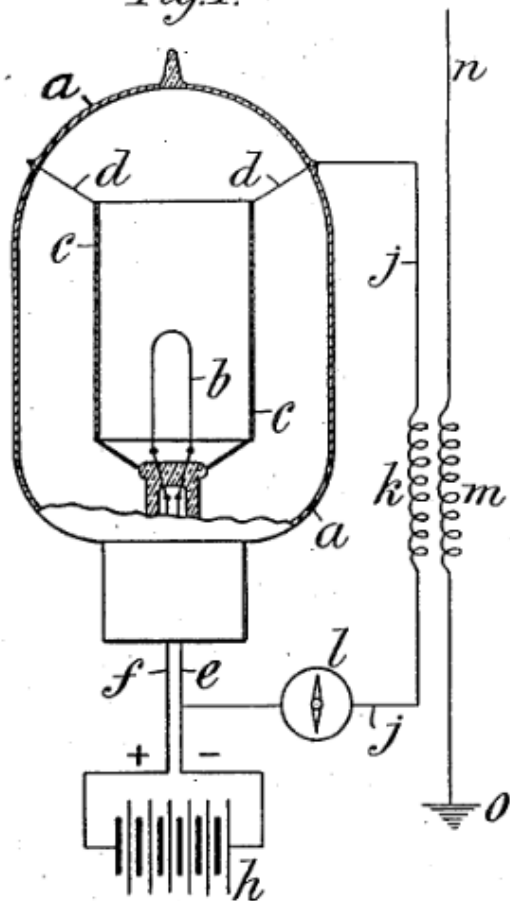
# 真空管の発明

1905

1907

Flemingの2極管

Fig.1.



signal  
indicating  
device

DeForestのAudion

アンテナ

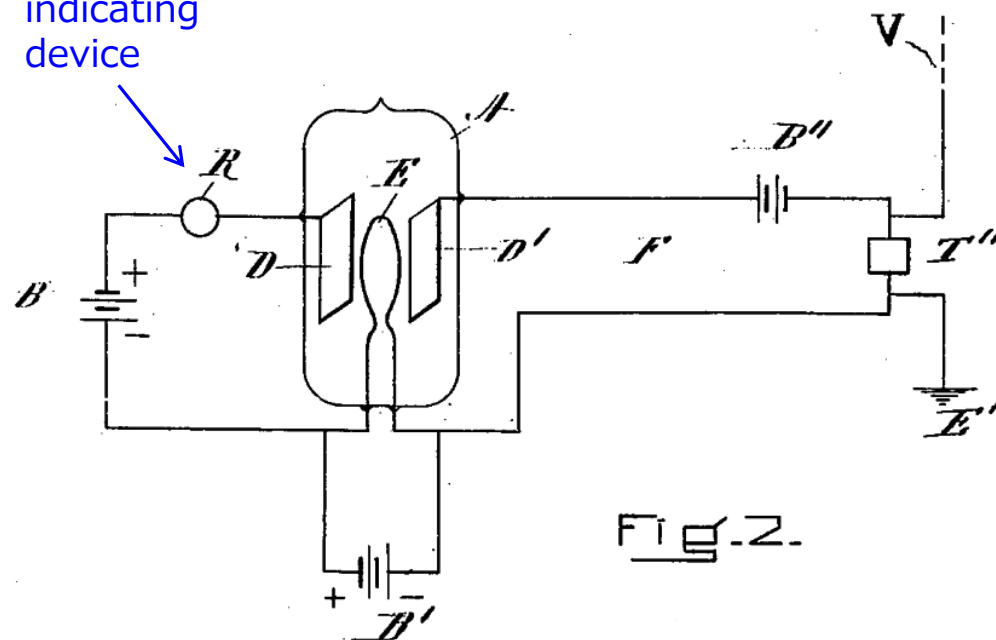


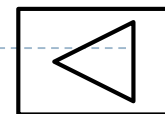
Fig.2.

DeForestの発明は、もともとFlemingの特許を回避するために工夫された。プレート検波みたいな動作であろうか。明細書中には増幅するとの記載があるが、3極管とは違い、グリッドがプレートの反対側に配置されている。

発明家DeForestはArmstrongらによって開拓された3極管理論は、最後まで理解できなかったのではないかとされている。

J. A. Fleming, "Instrument for Converting Alternating Electric Currents into Continuous Currents," US Patent Number 803,684, patented Nov. 7, 1905

L. De Forest, "Device for Amplifying Feeble Electrical Currents," US Patent No. 841,387, patented Jan. 15, 1907



THE NEW YORK TIMES SATURDAY, AUGUST 6, 1927.

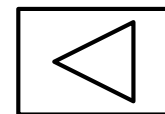
$\Delta E = (i_1 + i_2)KR_0 + i_1KR$   
 $\Delta E = K[i_1(R_0 + R) + i_2R_0]$   
 $\frac{\Delta E}{E} = \frac{K}{K+1}$   
 $\frac{\delta E}{E} = \frac{K}{1+K} = 1$   
 $\frac{E}{E} = [1 + \frac{1}{K}]$   
 $\mu = 1 + \frac{1}{K}$   
 $\frac{1}{K} = \mu - 1$   
 $K = \frac{1}{\mu - 1}$   
 $K = \frac{1}{1.5}$

11-25  
 Disclosed in principle  
 to E. C. Blessing Aug 6, 1927  
 H. S. Black Aug 18, 1927  
 Witnessed and Inducted  
 E. C. Blessing  
 Aug 18, 1927

1927年8月6日、通勤のためいつものように Hudson 側を渡る船に乗っていた Black は、ずっと考えていたアンプのゲイン変動を抑える方法を思いついた。その時に手元にあった New York Times にアイデアを記したのが、左図である。

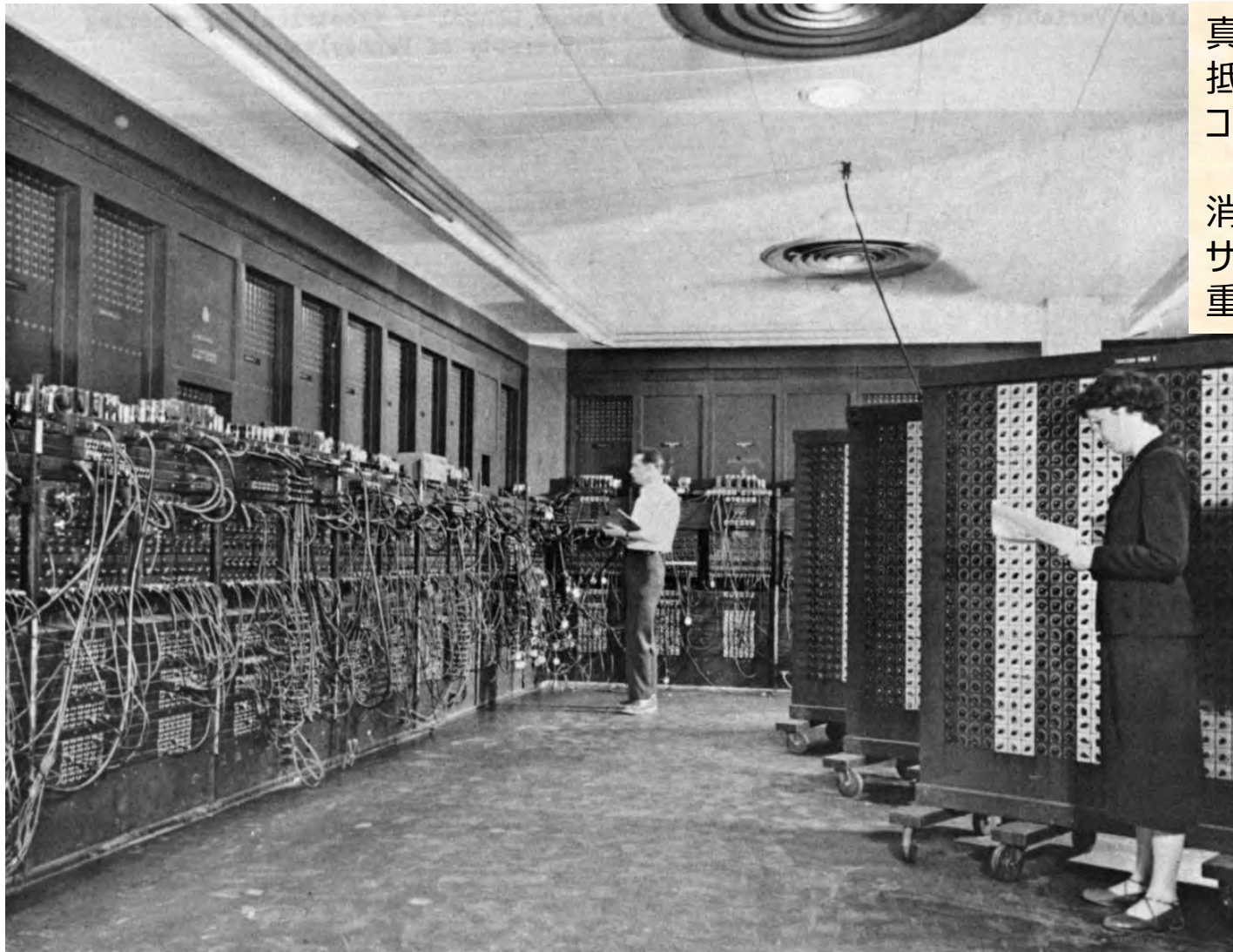
負帰還のアイデアは、回路を不安定にすることで当時すでに知られていた。そのため直ちに受け入れられた訳ではない。Bell 研の同僚である Bode や Nyquist などによる理論解析や普及に対する努力により、次第に広く受け入れられるようになった。

<http://techchannel.att.com/play-video.cfm/2012/6/27/AT&T-Archives-Negative-Feedback-Amplifier> なども参考になるかもしれない。



# ENIAC

1946

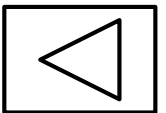


真空管 17,468 本  
抵抗 70k 個  
コンデンサ 10k 個

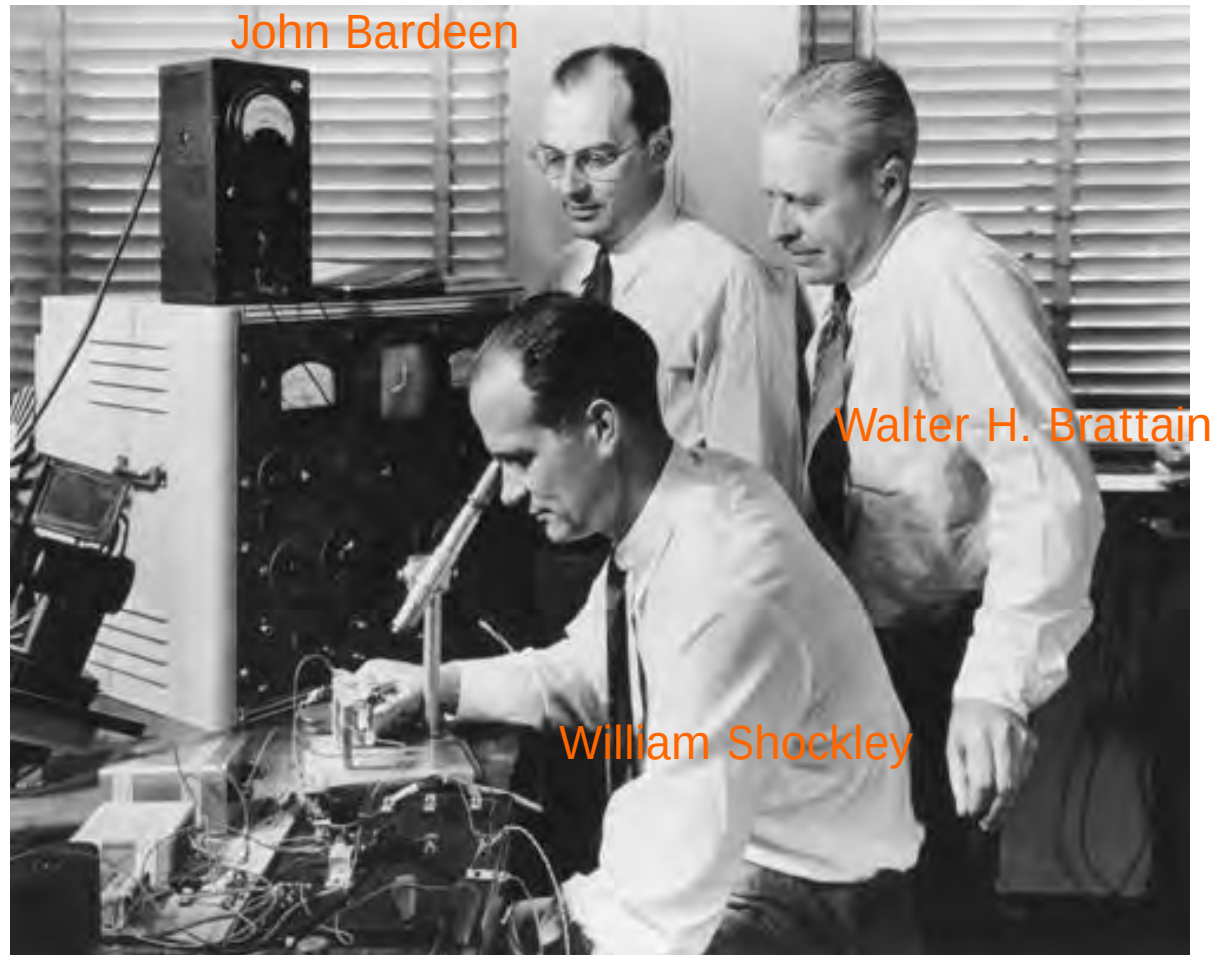
消費電力 150 kW  
サイズ 24m 0.9m 2.5m  
重量 30 t

当初より故障率が懸念されていたが、真空管が週に2～3本壊れる程度で、稼働率は90%を超えていた。

U.S. Army Photo







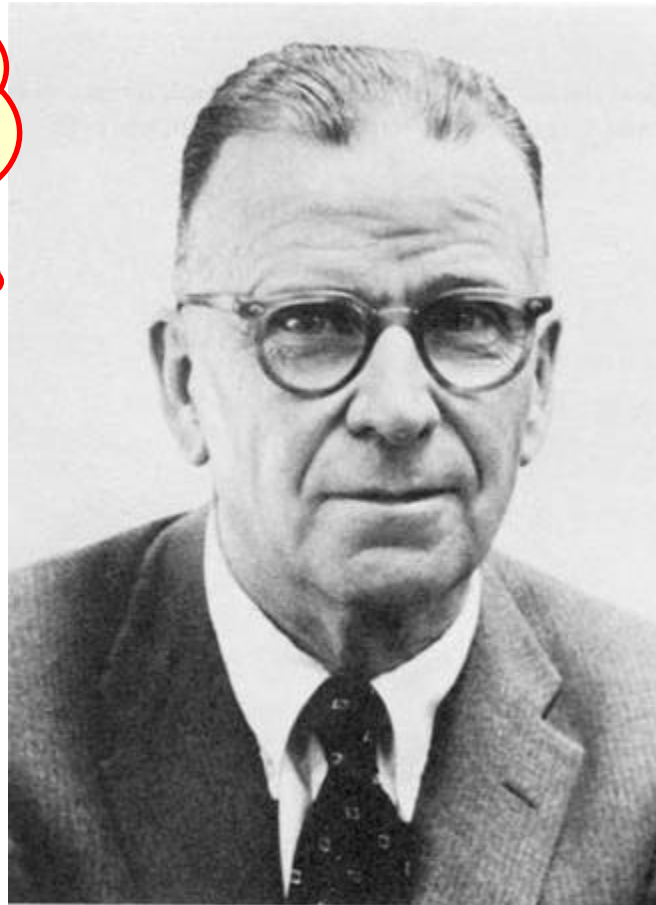
<http://www.computerhistory.org/collections/accession/102618866>



# トランジスタの祖父

---

10年間成果の出  
ないShockleyを  
支え続けた。



Mervin Joe Kelly (1894-1971)

<http://books.nap.edu/html/biomems/mkelly.pdf>

