

集積電子回路  
2021年10月05日  
10月12日

# 電気電子工学特別講義Ⅱ

## 回路設計論 1. 先人が辿った道

ザインエレクトロニクス株式会社  
源代 裕治  
yuji.gendai@gunma-u.ac.jp

## 目的

- 「回路の気持ち」が感じられるエンジニアを目指そう

## 方法

- 歴史から学ぶ
  - 先人たちの努力の跡を辿る
- 回路論を土台から再構築する
  - 先人たちが開拓に用いた足場を取り払う
- 回路と話し合う
  - simulatorに通訳してもらう

実際に回路と一緒に働かないと、深い付き合いはできない。しかしsimulatorは、良い仲介者になってくれる。

# 講義日程

場所: Zoomオンライン

時間: 火曜 16:00~17:30

- 
- 第1回 2021年10月 5日(火) 回路の歴史1  
先人たちの苦勞、今に残る混乱 この2回のテキストは『先人の辿った道』
- 第2回 2021年10月12日(火) 回路の歴史2  
後を追う者も楽じゃない
- 第3回 2021年10月19日(火) 回路の理論1 (枠組み) この2回のテキストは『我々が辿る道』  
回路とは部品(=branch)の接点(=node)に電流・電位の属性を付与したグラフ  
直線性定理とその系(Thevenin/Norton)
- 第4回 2021年10月26日(火) 回路の理論2 (他動素子)  
飛び道具branch達  
繰り返し回路
- 第5回 2021年11月02日(火) アクティブ素子1 (歴史展望) この2回のテキストは『能動素子達』  
真空管は人類が初めて手にした能動素子。何もかもが初体験  
トランジスタでは、勝手違いに手を焼きながらも、真空管の経験は生きた
- 第6回 2021年11月09日(火) アクティブ素子2 (動作点設定)  
回路と友達になりましょう
- 第7回 2021年11月16日(火) ICの基本回路 この回のテキストは『回路屋の身だしなみ』  
差動対+カレントミラー≡IC回路

# 注意事項

---

- 源代担当分の成績は、出席と最終レポートで決めます。
- 毎回、簡単なレポート課題を出して、メールにて返信してもらいます。
  - ✓ その内容は成績に反映しません。返信があったかどうかのみが成績に反映されます。
  - ✓ 各メールに必ず返信します。返信がなければ催促ください。
  - ✓ 疑問や質問がありましたら、そのメールに入れてください。
- 最終レポートの課題は、11月16日の最終講義時に提示する予定です。
  - ✓ 最終レポートも提出することが重要です。ただし、その内容は成績評価に反映します。
- WEBの講義資料は、講義で用いるものとほぼ同じですが、各回の区切りとは対応していません。講義の進捗に応じて、予定回からずれることが想定されます。合わせて一連の講義ですので、できるだけ全部聴講ください。
  - ✓ 講義資料は、現状のものを全て上げてもらっています。ただし例年、講義の進捗に伴い加筆修正が発生しています。最終講義の後に、今年度分の講義資料が確定します。もっとも、どのみち大改修は出来ないので、多少違う版を用いても、講義を追うのに困難はないと思います。

# 『電気』って何ですか？

似たような単語に、電流、電子、電荷などがある。  
それら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、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)

# 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.

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.]

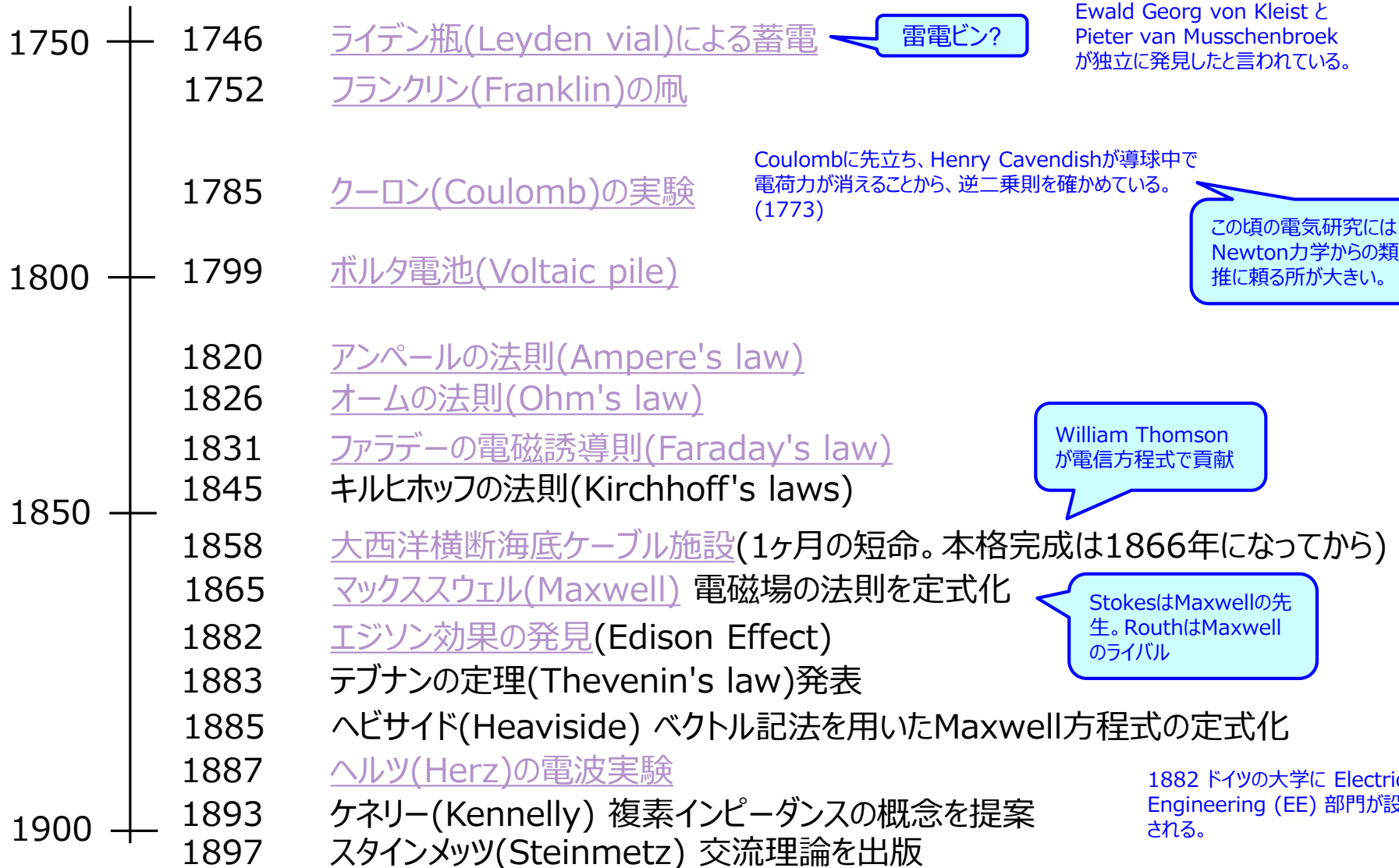
<https://micromath.wordpress.com/2011/11/06/andrew-wiles-on-doing-mathematics/>



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

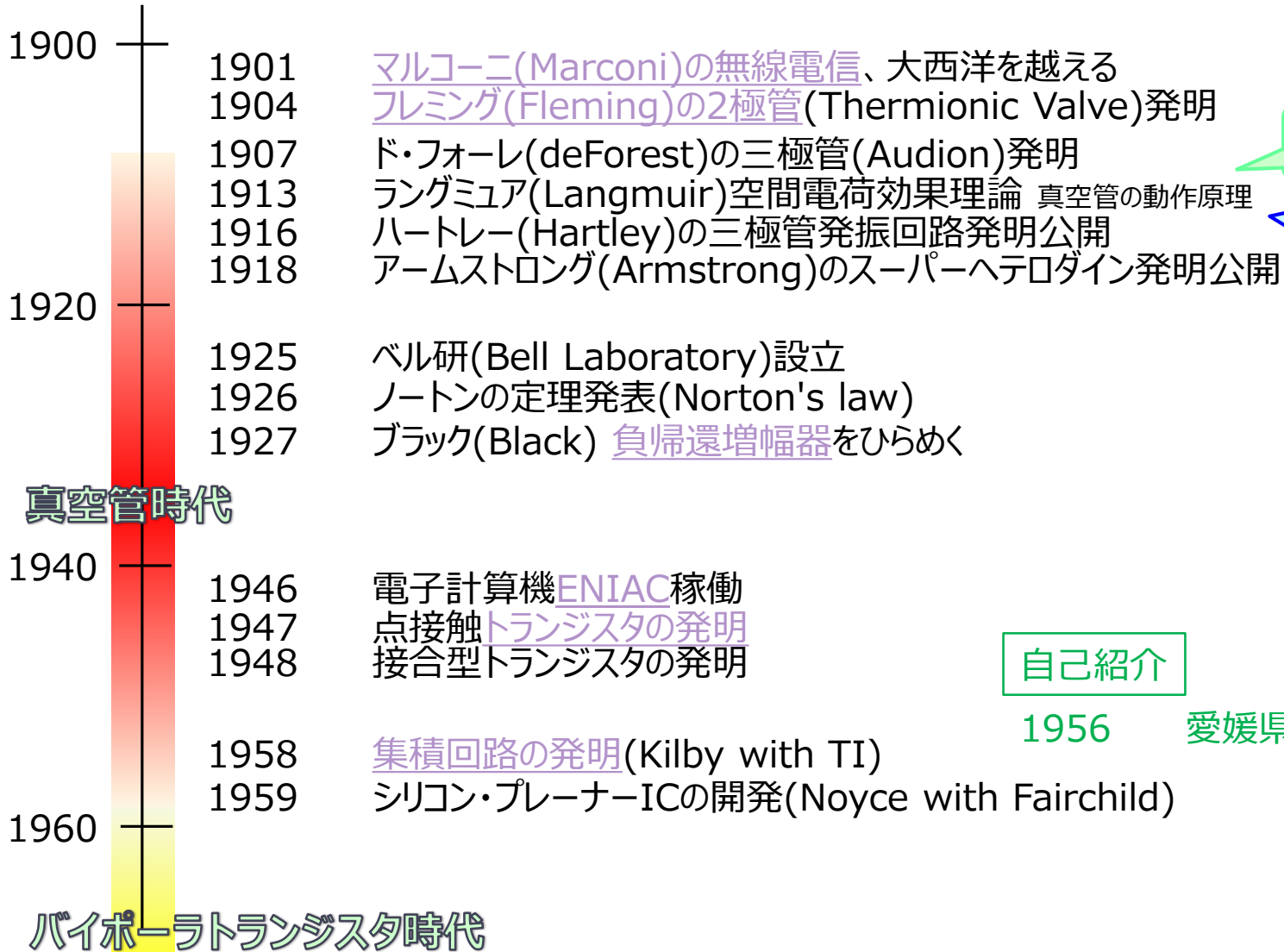
# 私の電気史観(19世紀)

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)



1912: タイタニック(Titanic)号から世界初のSOS

この頃、Colpittsらにより、信号増幅、変調などの基本回路技術が確立してゆく。

自己紹介

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)

## バイポーラトランジスタ時代

- 1960 1960 DEC PDP-1(ミニコン)発売
- 1964 IBM System 360発表
- 1965  $\mu$ A709 OPamp (Bob Widlar with Fairchild)
- 1965 ムーアの法則発表(Moore's Law)
- 1968 CMOS-IC発表(RCA)
- 1970 1970 文部省認定ラジオ技術講座 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
- 1977 Gray & Mayer, "Analysis and Design of Analog Integrated Circuits"

- 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、イメージセンサなどの開発に従事

## CMOS IC時代

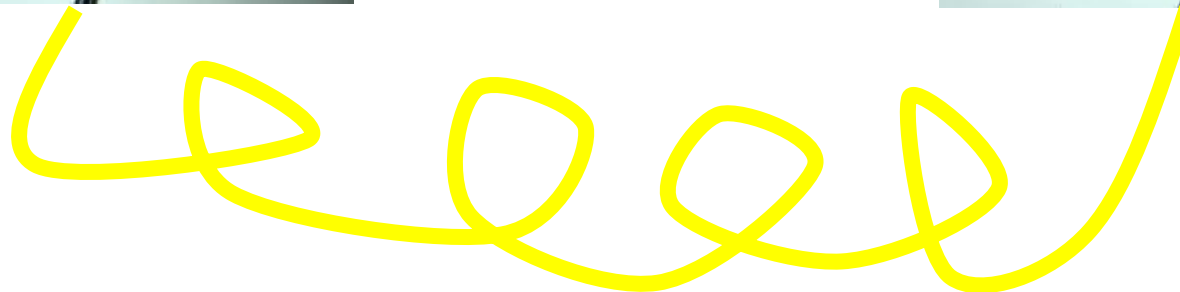
- 2001 Razavi, "Desing of Analog CMOS Integrated Circuits"
- 2012 ADC研究で学位(東工大松澤先生に師事)
- 2015- ザインにて回路開発に従事

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思いついた。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が欲しいと言ったら、電源コードを勧められてたので、それを購入した。これを小学6年の時の夏休みの宿題として提出した。

(当時の写真はないが、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



全桁に0が表示されている。

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。当時の少年が知っていたのは、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>

# エレキットで遊ぶ

1970頃

中学に入った頃のことだと思うが、その年のお年玉を全部使って、エレキットを買った。

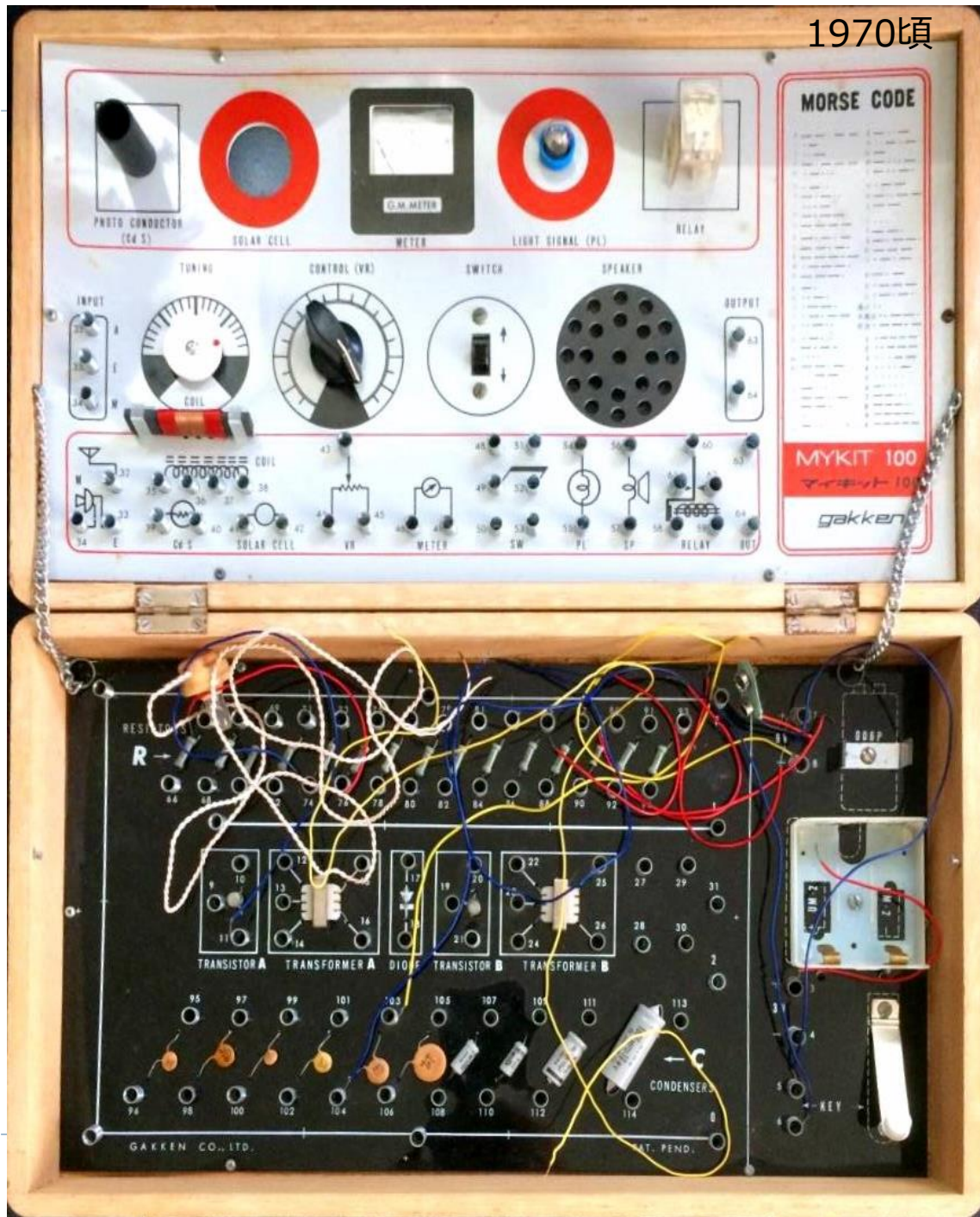
見本の回路を組みむくらの事しかできなかったが、これで回路図記号を覚えた。

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  
私が買ったのはプラスチックケースだったが、  
中身は同じものに見える。

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





電気は通信教育で勉強した。私自身が使った教科書は手元にはないので、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った。

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。

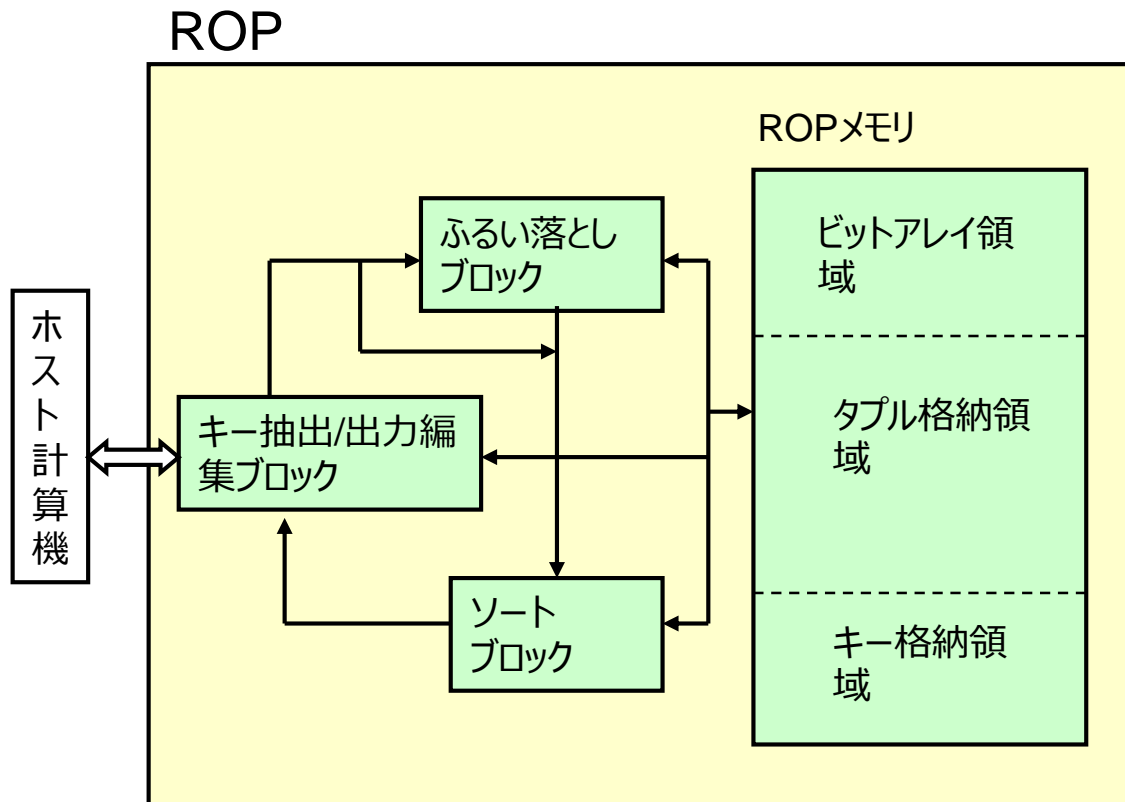
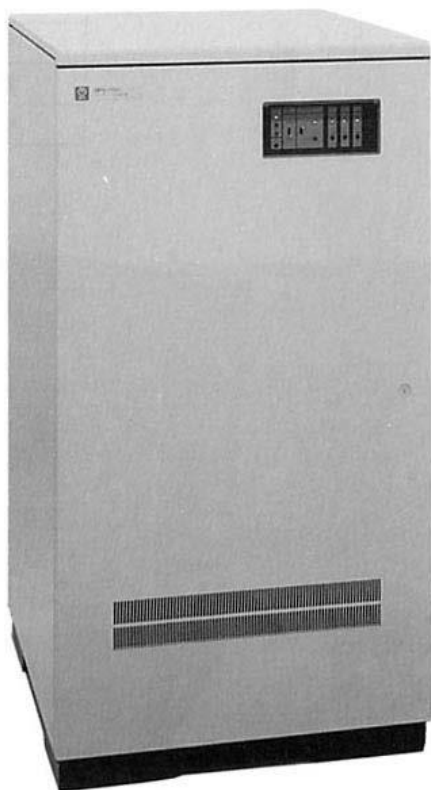
回路の理解には苦しんだので、早く第2部に行って、回路が作れるようになりたい、そうすれば、こんな苦労はしなくて良いのに、と思ったものだ。

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、回路トポロジー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部はまだ旧字体のまままで読みづらかった。受講者数が圧倒的に少なかったからであろう。

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。

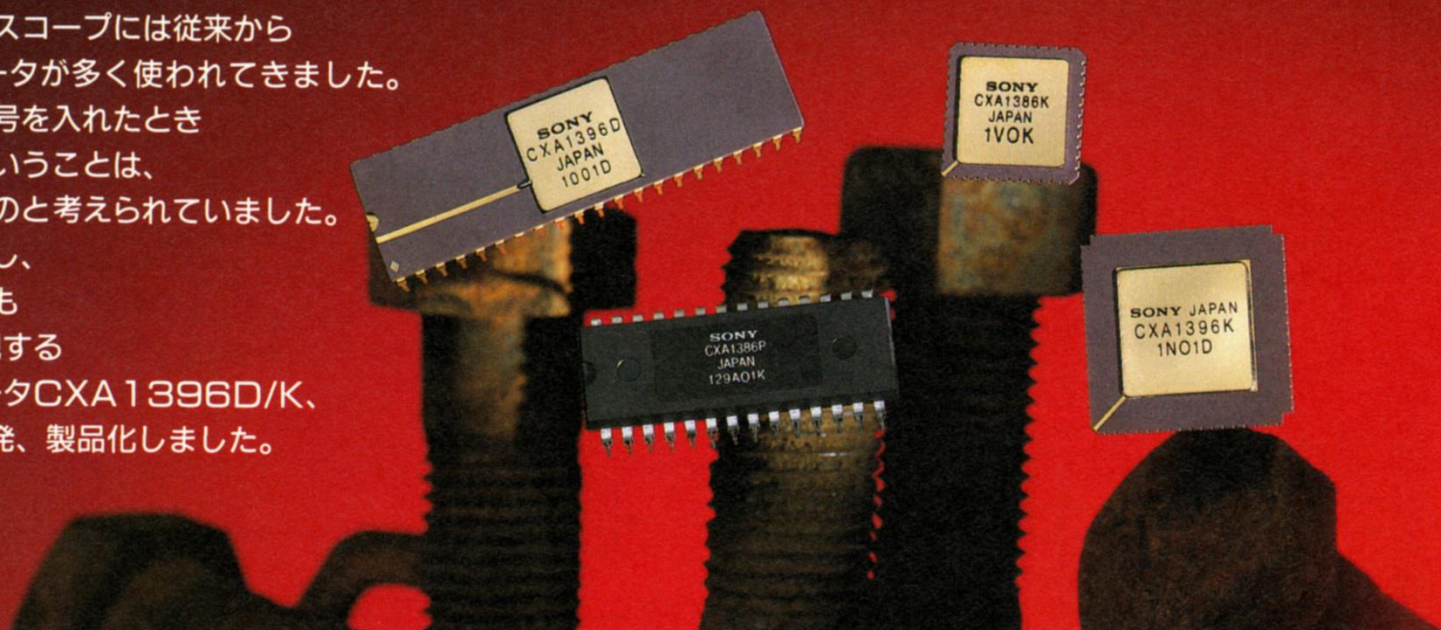
## データベースプロセッサ RINDA

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、再びバイポーラ開発に移り、さらに10年ほど世の中から遅れることになった。



- 高橋利衛, "基礎工学セミナー : 量の理論/現象の論理と法則の構造をめぐる討論," 現代数学社, 1974.
- 高橋利衛, "図説基礎工学対話 : どのようにして量は捉えられたか その歴史と論理と人物と," 現代数学社, 1979.
- 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.
- AT&T Bell Laboratories, "A History of Engineering and Science in the Bell Systems, Transmission Technology(1925-1975)," 1985.
- Franco Maloberti and Anthony C. Davies, "A Short History of Circuits and Systems," River Publishers, 2016.

- Gustav Kirchhoff, translated by J. B. O'Tool, "On the Solution of the Equations Obtained from the Investigation of the Linear Distribution of Galvanic Currents," IRE Trans. of Circuit Theory, Vol.5, Issue 1, pp. 4-7, March, 1958.  
An English translation is given of Kirchhoff's classic paper in 1847.
- 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.
- The Bell System Technical Journal  
<https://onlinebooks.library.upenn.edu/webbin/serial?id=belltechj>

# 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！」と銘打つ。「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>

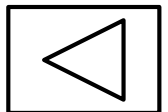
# ライデン瓶(Leyden jar)

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。



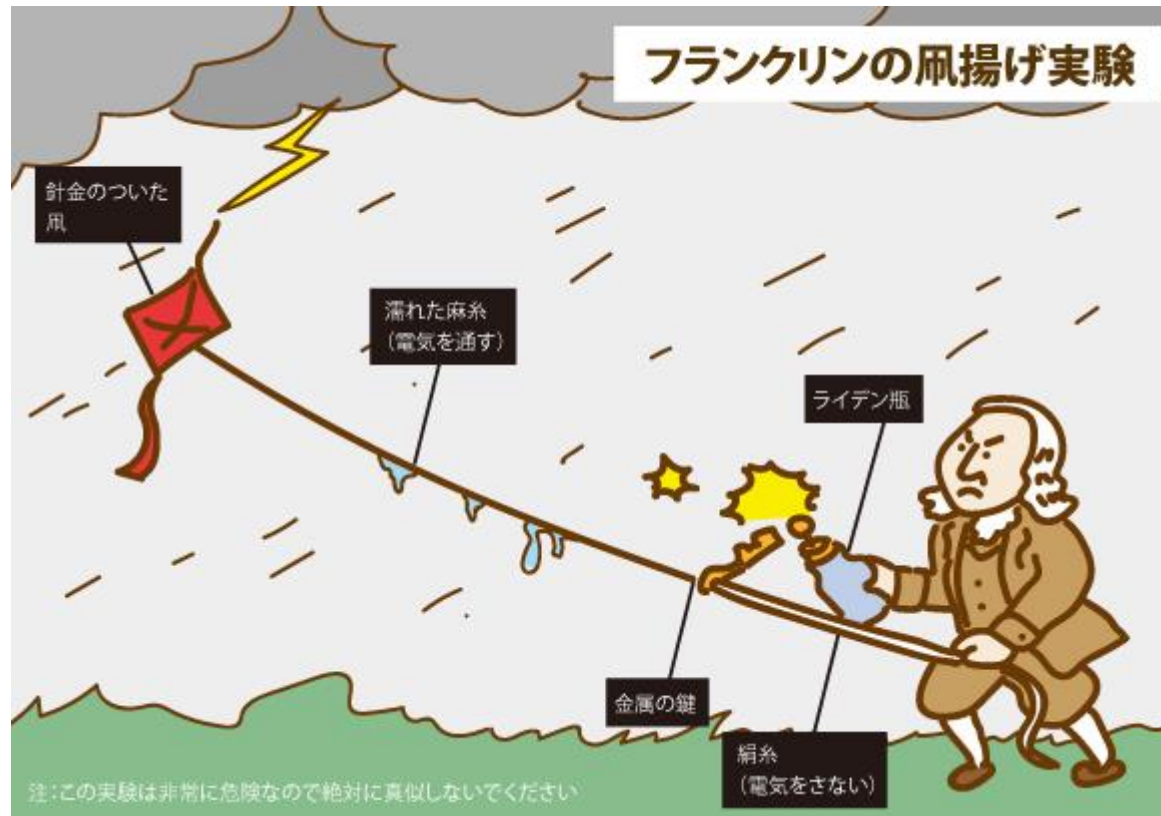
<https://www.wired.com/2017/01/the-physics-of-leyden-jars/>



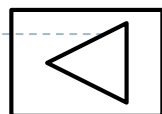
# Franklin's kite experiment

1752年6月

この実験には疑義がとなえられているが、いずれにしても電気研究に対するフランクリンの貢献は大きい。



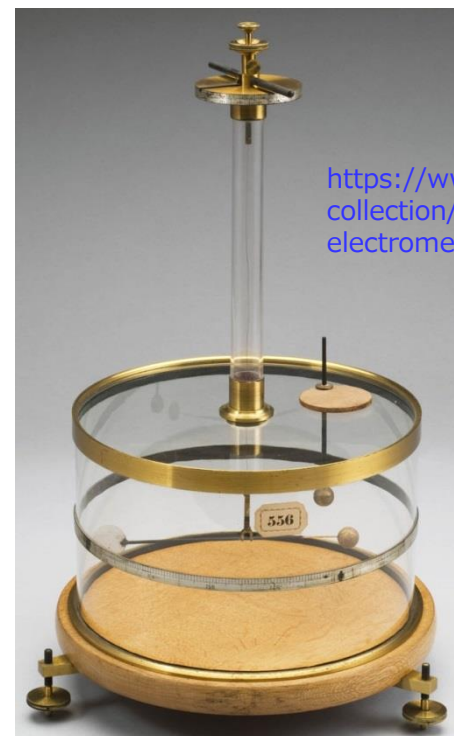
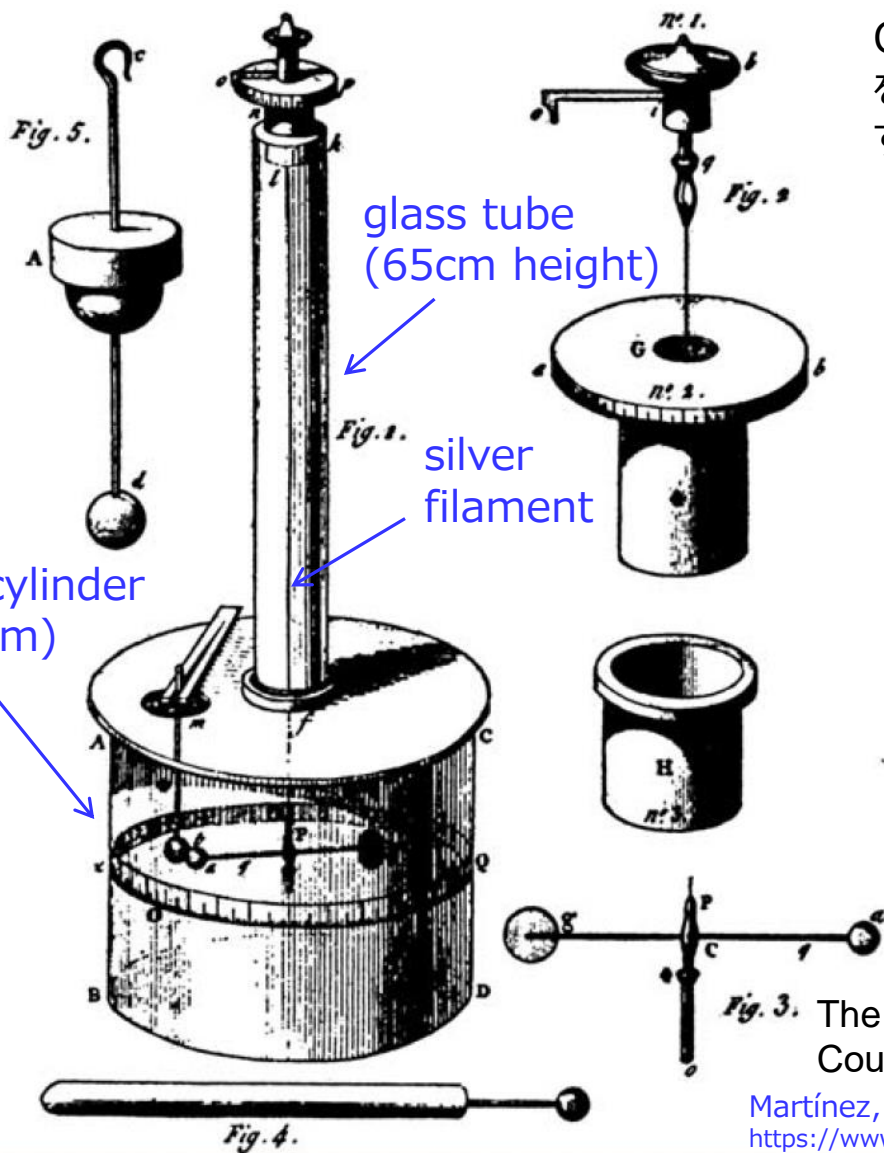
[https://s3-ap-southeast-2.amazonaws.com/cheers-client-admin-ckeditor/var/www/cheers\\_production/admin.cheers.com.au/releases/20180228153214/public/ckeditor\\_assets/pictures/162/content\\_201803\\_kitamura\\_photo4.jpg](https://s3-ap-southeast-2.amazonaws.com/cheers-client-admin-ckeditor/var/www/cheers_production/admin.cheers.com.au/releases/20180228153214/pub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



# Coulomb's torsion balance(ねじれ秤)

1785

Coulombは1785年、自身の考案したねじれ秤を用い、静電気力が距離の自乗に反比例するとするレポートを発表した。



The left diagram was originally included in Coulomb's memoir (finally published in 1788)

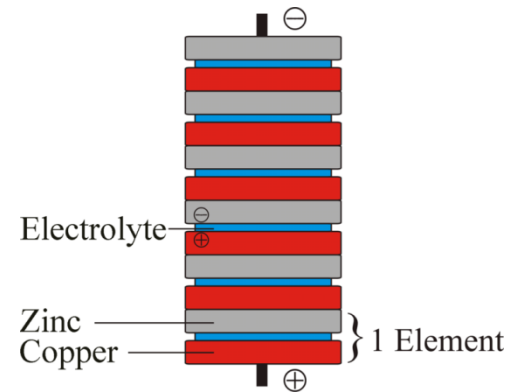
Martínez, "Replication of Coulomb's Torsion Balance Experiment"  
<https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKewjgwem84qDIAhWYdd4KHZgaC4UQFjAAegQIARAC&url=https://www.scienzadellecostruzioni.co.uk/2Fdocumenti/2FReplication%2520of%2520Coulomb%25E2%2580%2599s%2520Torsion%2520Balance.pdf&usg=AOvVaw0yhxFciQzA57LQxgTnoyD>

## ボルタ電池の復元模型

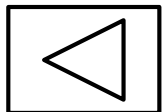


一定の電圧を連続して取り出せるようになったことで、電気に対する人類の理解が一気に進むようになった。必ずしも定説として確立している訳ではないかも知れないがその貢献は、『電気の歴史ここに始まる』と言っても過言ではなからう。左下に引用した資料でも、ボルタ電池の貢献を高く評価していた。

## 銅と亜鉛を用いたボルタ電池の仕組み



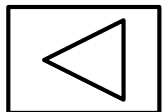
[Wikipedia](#)





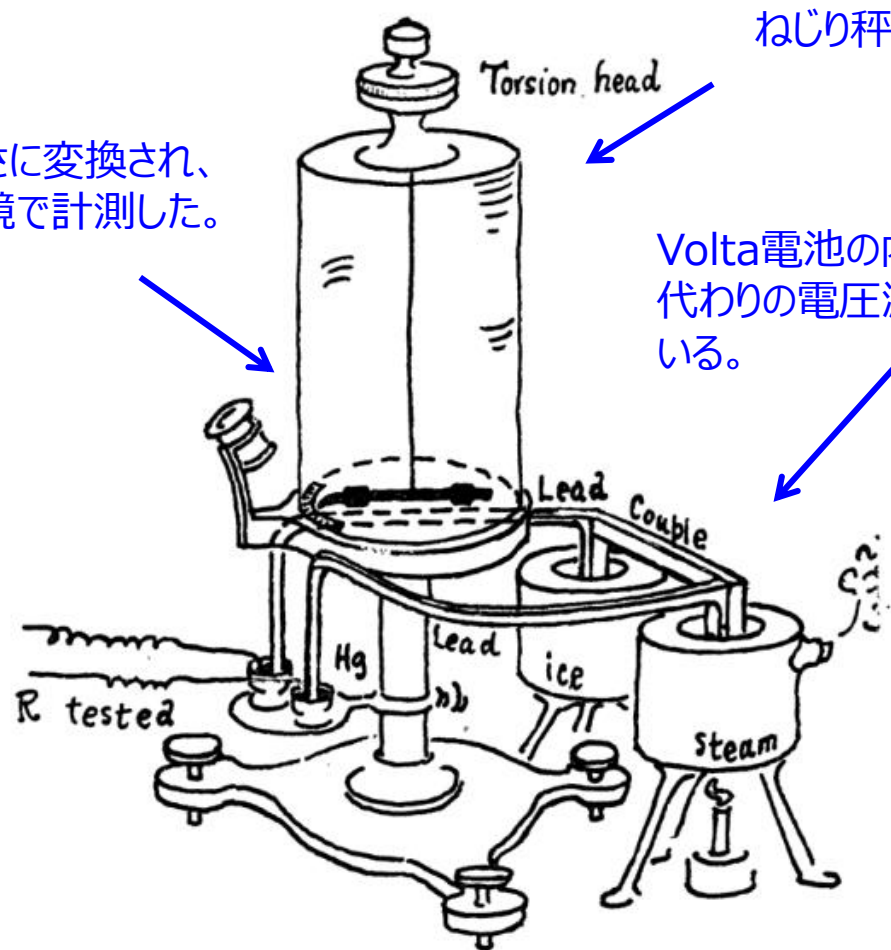
電流が方位磁石を動かすというエルステッド(Øersted)の実験を聞いたアンペールは、直ちに精密な実験に取り掛かり、電流の磁気作用を定式化した。今日Ampere's lawとしてMaxwell方程式の一部となっている法則は、その後Maxwellにより修正された形式で、Ampereが発見した法則と等価ではない。

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



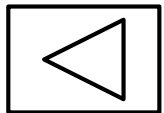


電流は磁界の強さに変換され、そのトルクを顕微鏡で計測した。

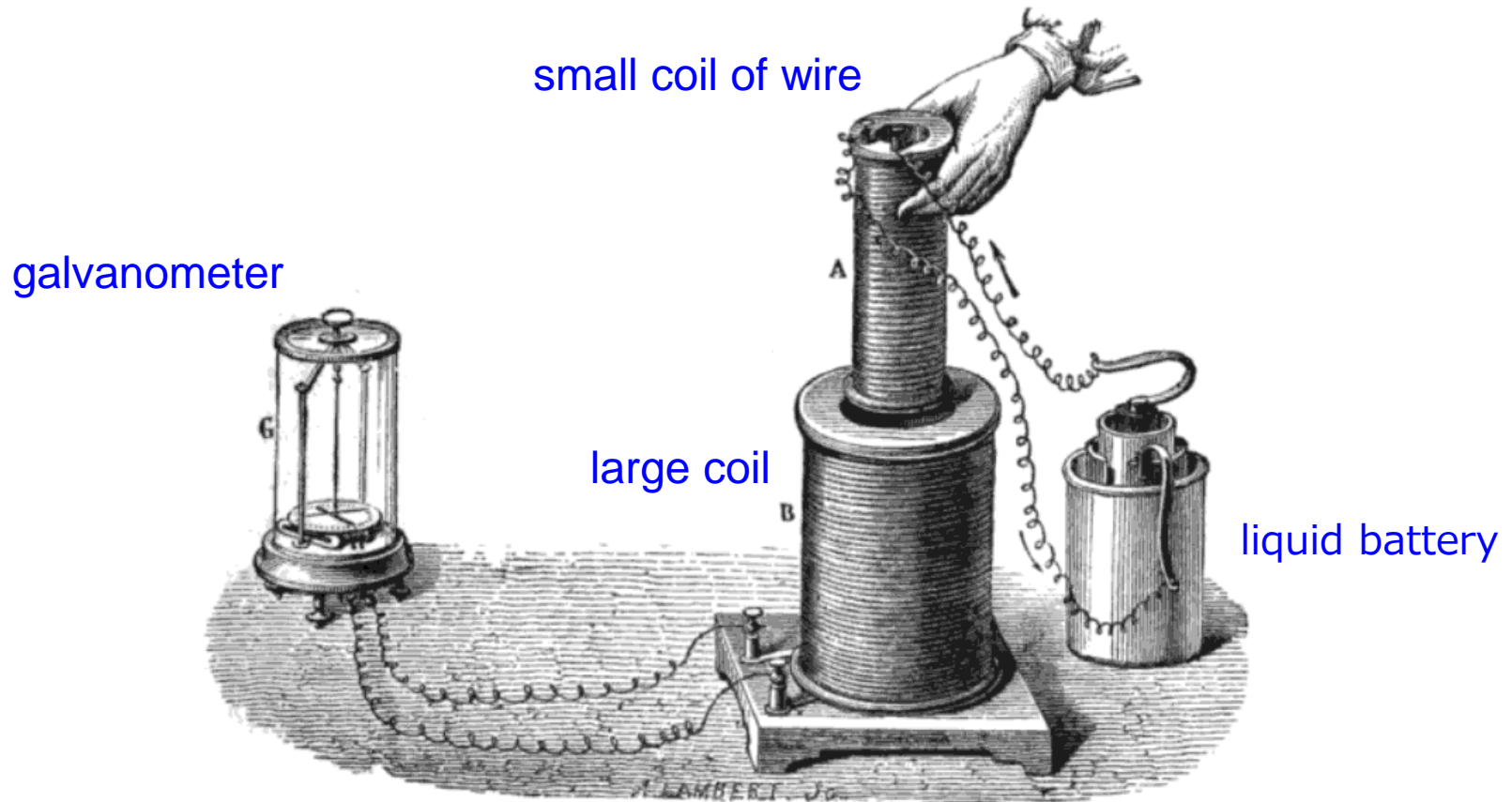


Ohm's Torsion Balance and Thermocouple

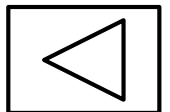
FIG. 3



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)

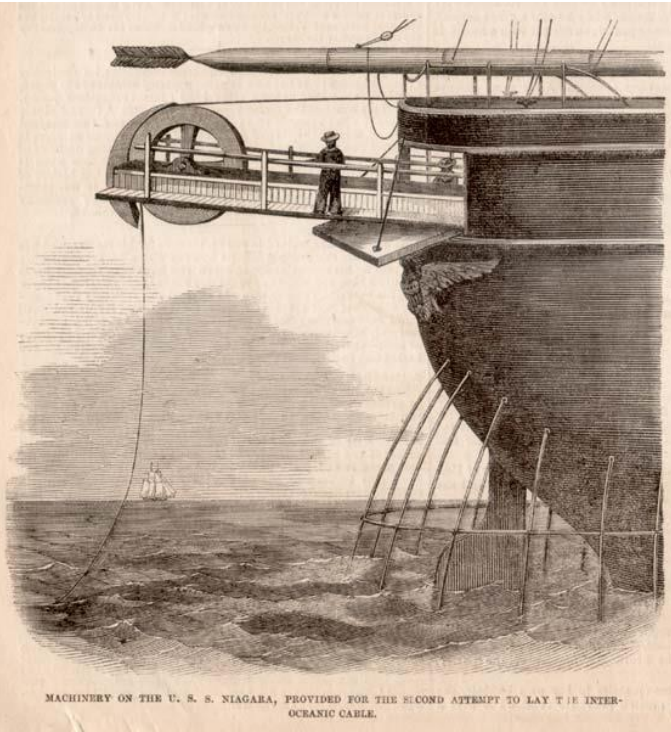


Arthur William Poyser, "Magnetism and Electricity: A Manual for Students in Advanced Classes," Longmans, Green, & Co., New York, p.285, fig.248, 1892



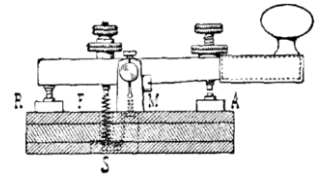
# 大西洋横断海底ケーブル

1858

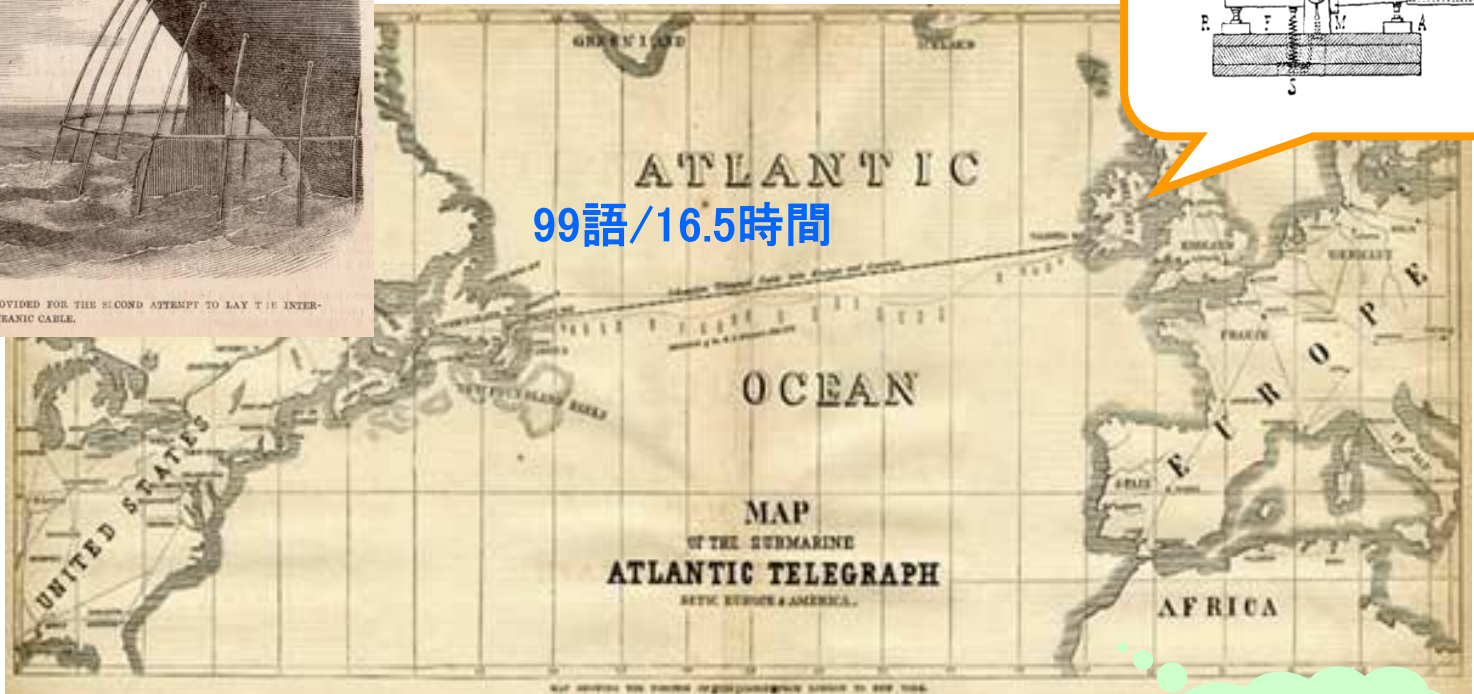


大西洋横断海底ケーブルの敷設の試み **U.S.S. Niagara**  
<http://www.atlantic-cable.com/Article/1858Leslies/index.htm>

モールス符号  
は、既に広く  
使われていた。

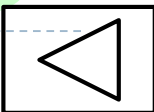


99語/16.5時間

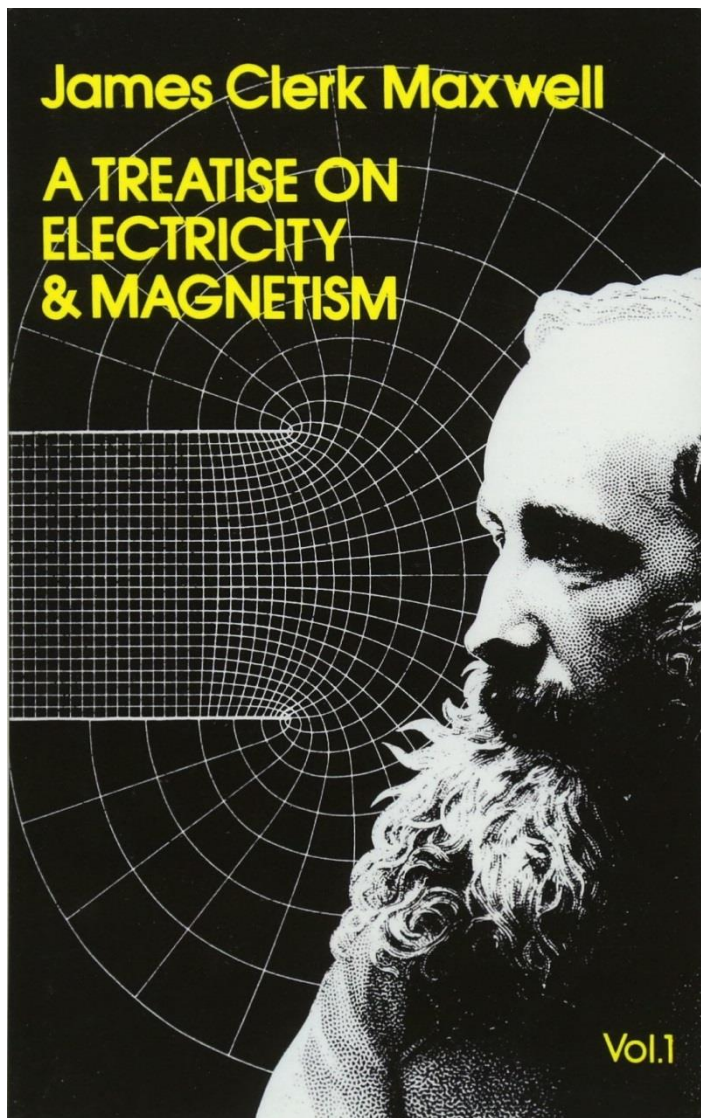


Map showing the position of the cable from London to New York  
<http://www.atlantic-cable.com/Cables/1857-58Atlantic/index.htm>

伝送線路の  
理論は、まだ  
無かった

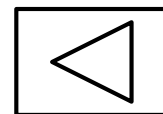


# Maxwell電気磁気論考

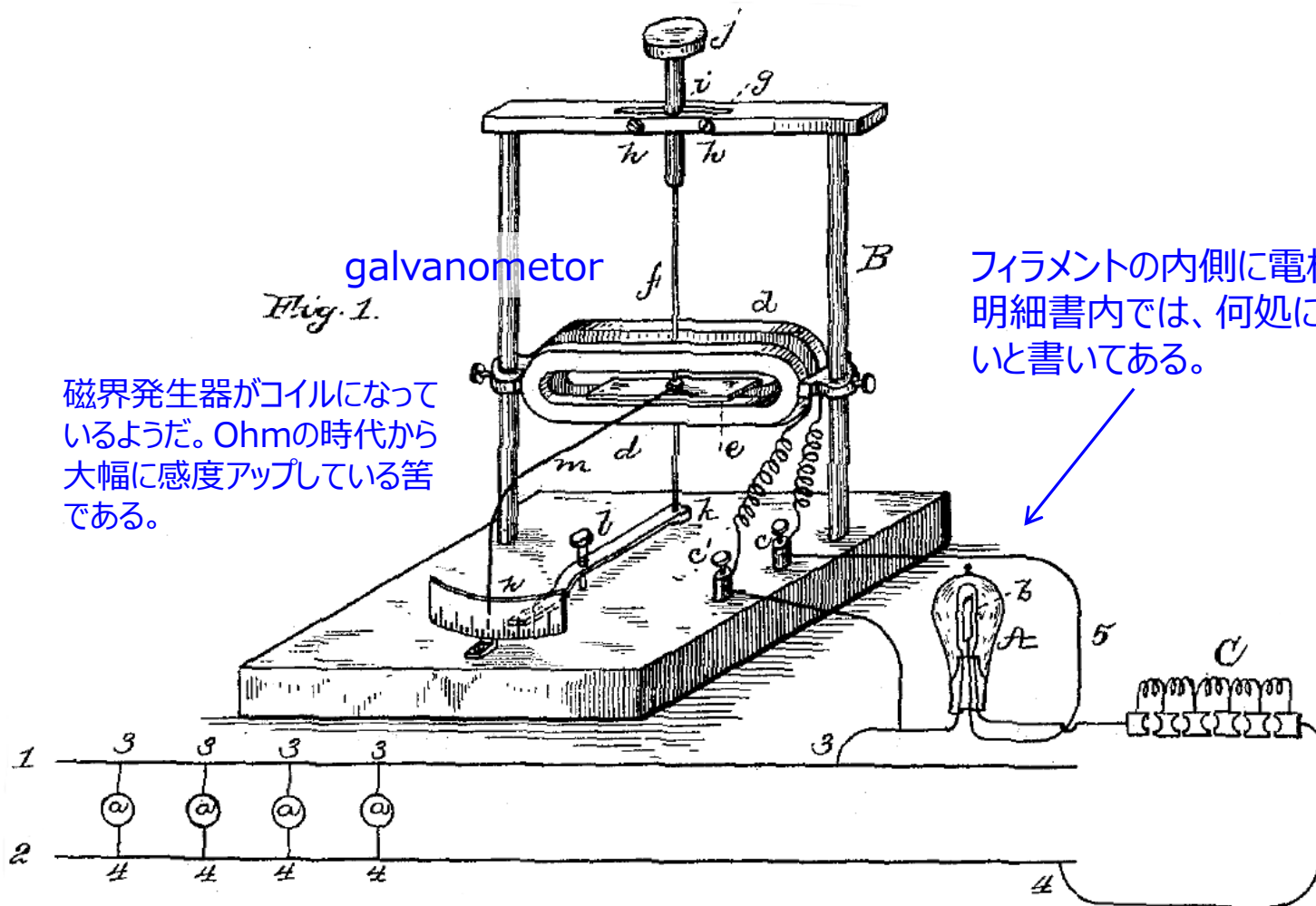


Dover版Vol.1の表紙。文字が橙のVol.2がある。

- 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。

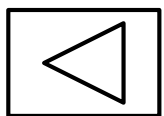


galvanometer  
Fig. 1.

磁界発生器がコイルになっているようだ。Ohmの時代から大幅に感度アップしている筈である。

フィラメントの内側に電極があった。明細書内では、何処にあっても良いと書いてある。

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

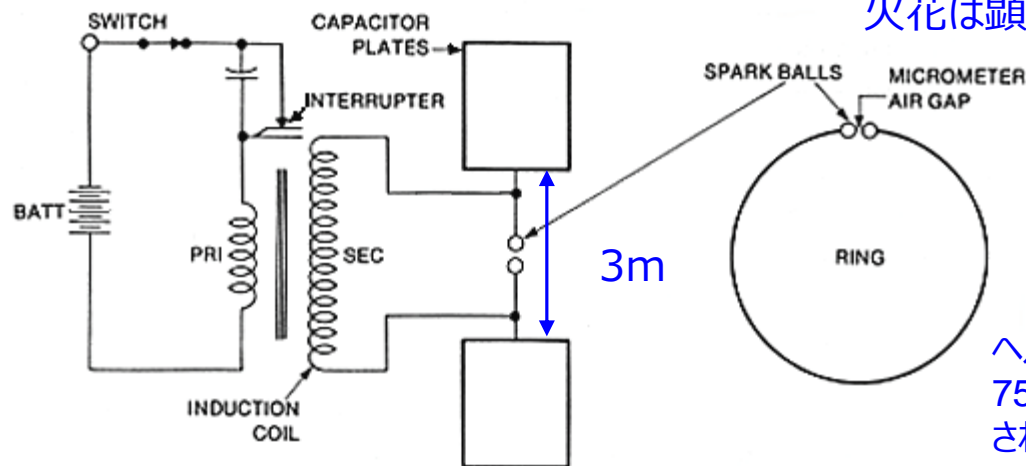


こんな装置で、2mの伝送を確認した

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。



3m

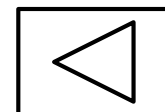
ヘルツの手紙には、一辺75cmの正方形と記載されている。

[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

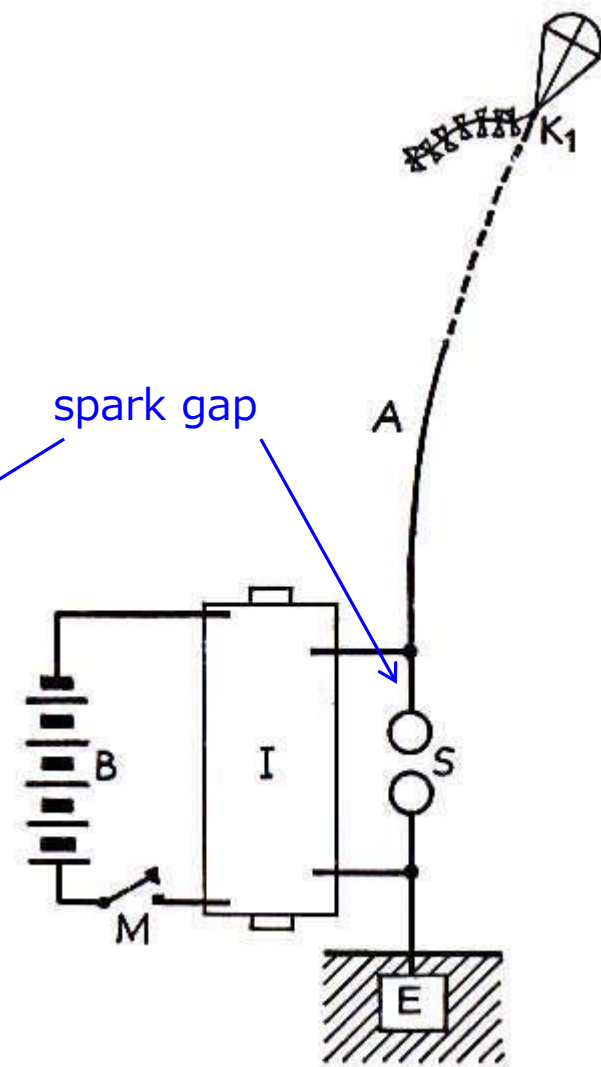
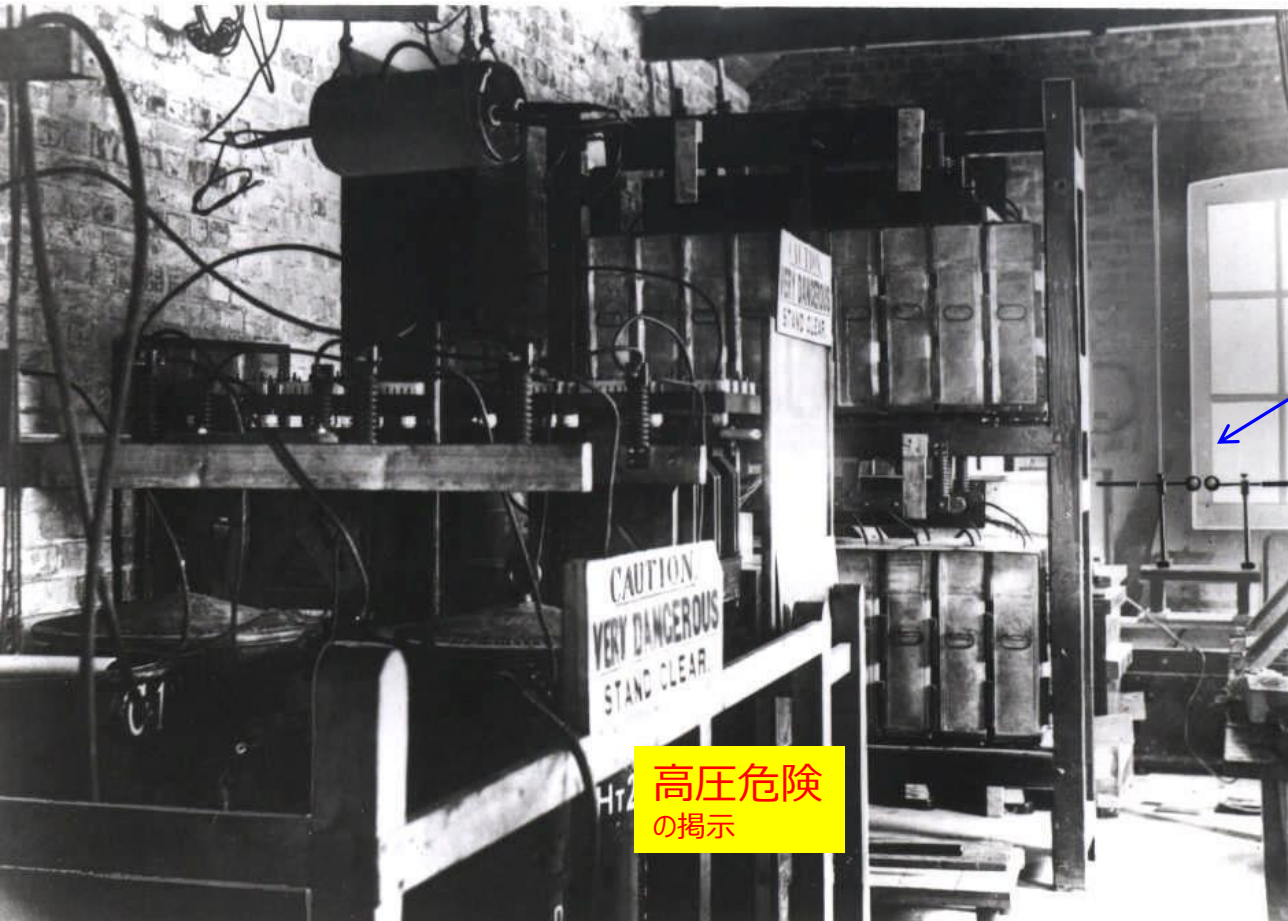
<https://sites.google.com/site/dianbolilunyanjiusaito/home/-5-herutsu>



# Marconiの無線送信機

1901

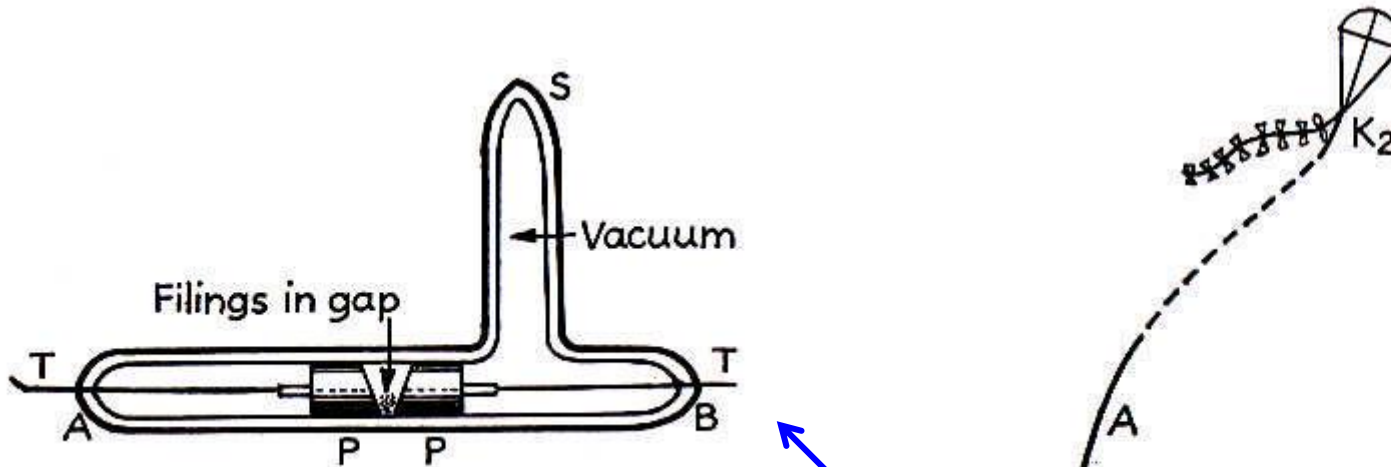
The Marconi Company transmitter at Poldhu, Cornwall, Circa 1901



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

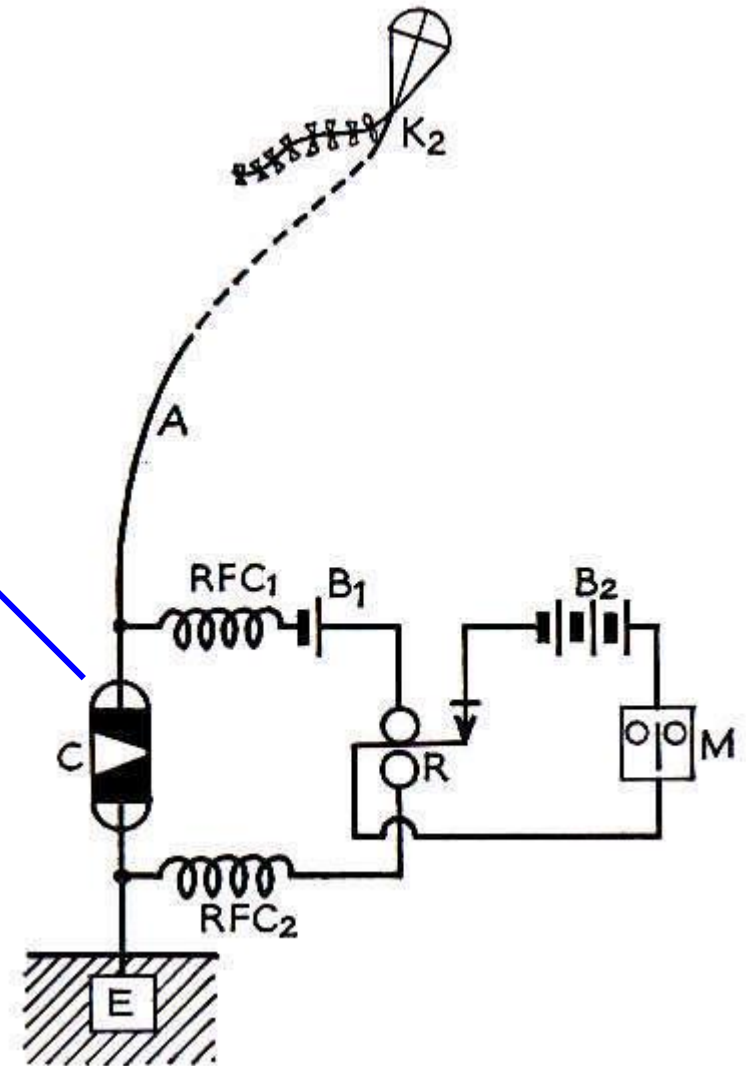
片極が地面になっている。

# 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>



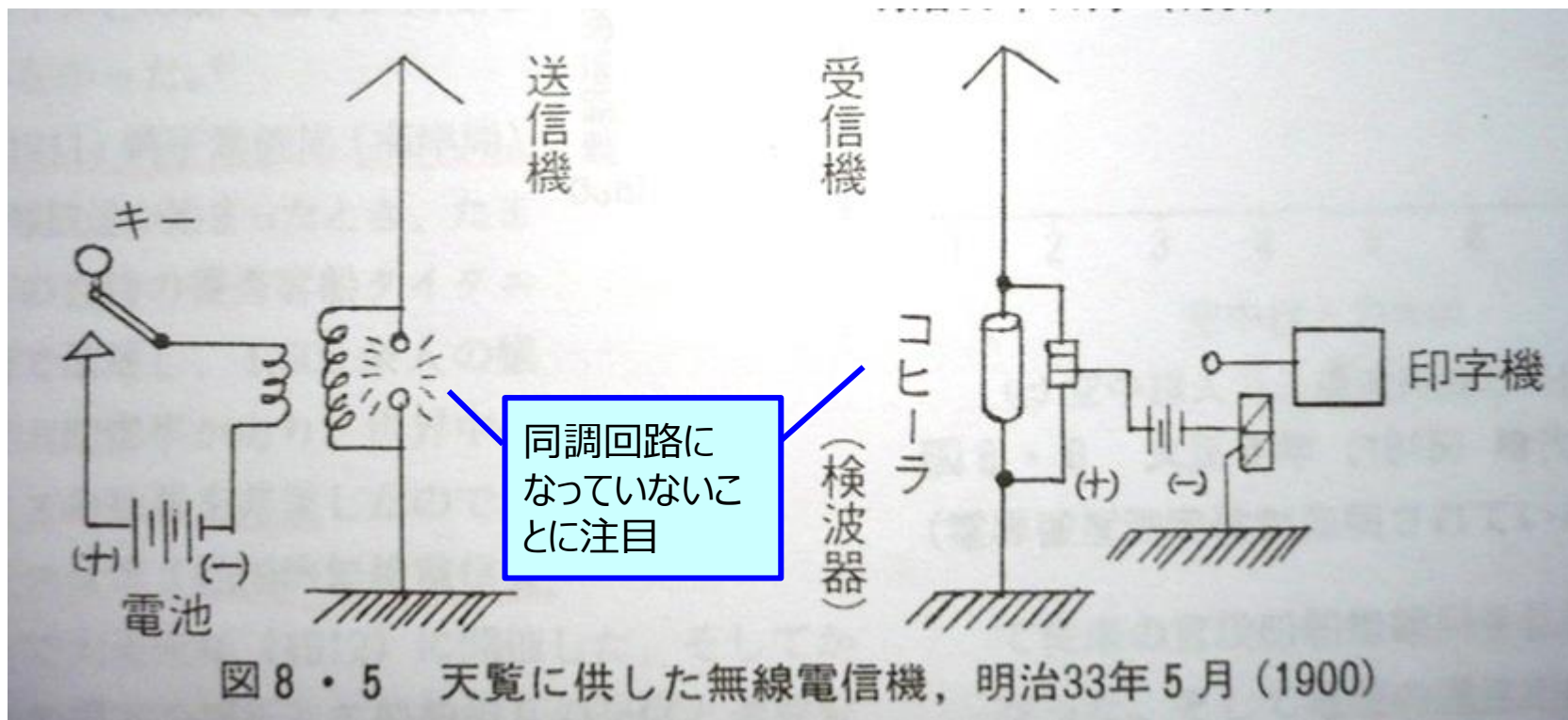
# 敵艦見ゆ

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。

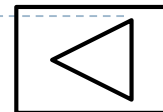
明治36年(1902年)頃、東京芝に逓信学校がありましてね、教室の正面には『電気とは不可思議なるもの也』と書いた額があがっていましたよ。

[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..0i30k1.2035.8458.0.9346.15.14.0.0.0.174.1572.0j12.13.0....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..0i30k1.2035.8458.0.9346.15.14.0.0.0.174.1572.0j12.13.0....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=2ahUKewimibG3sLzdAhUDfrwKHUNSAkMQFjAAegQIChAC&url=https%3A%2F%2Fwww.jasnaoe.or.jp%2Fzousen-siryokan%2F2013%2F130815-ootani%2Footani-07.pdf&usq=AOVvaw0KQ1C-LigX6oWsRTIfazA>

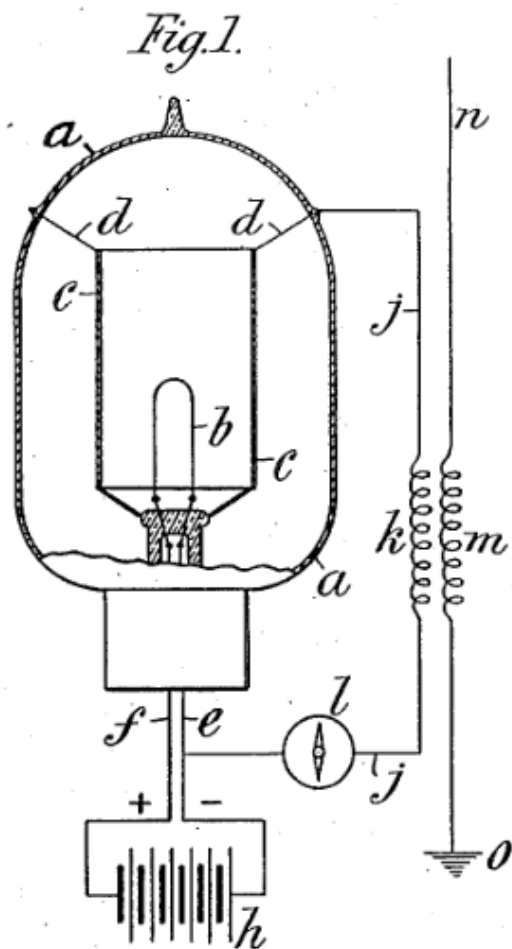


# 真空管の発明

1905

1907

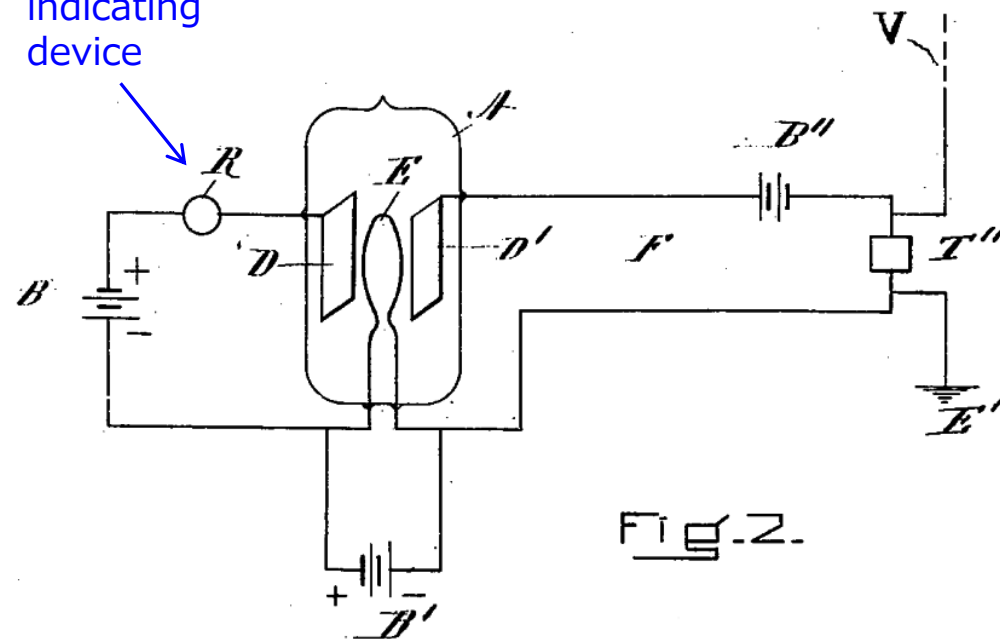
Flemingの2極管



signal  
indicating  
device

DeForestのAudion

アンテナ



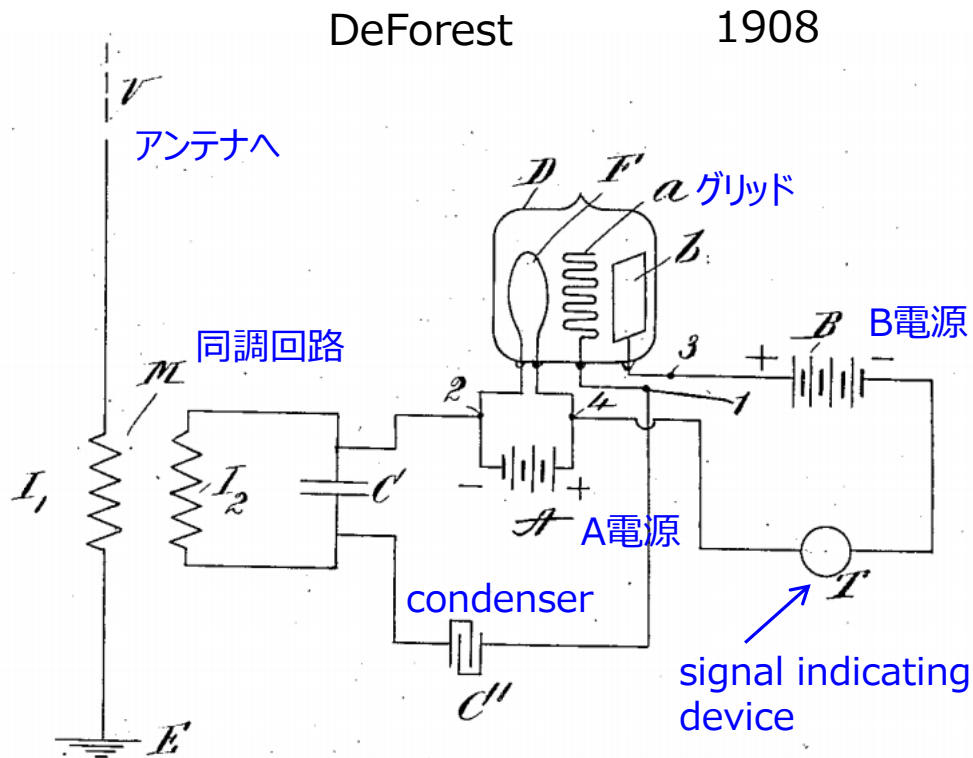
DeForestの発明は、もともとFlemingの特許を回避するために工夫された。プレート検波みたいな動作であろうか。明細書中には増幅するとの記載があるが、3極管とは違い、グリッドがプレートの反対側に配置されている。

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

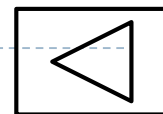
L. De Forest, "Device for Amplifying Feeble Electrical Currents," US Patent No. 841,387, patented Jan. 15, 1907

# 三極管の発明



先発明のAudionに対し、グリッドの配置と形状が改良されている。試行錯誤によりDeForestは、グリッド配線にコンデンサを入れると感度が上がることを発見した。しかし(後に常識となる)バイアスと言う概念は認識されていない。

L. De Forest, "Space Telegraphy," US Patent No. 879,532, patented Feb. 18, 1908



THE NEW YORK TIMES SATURDAY, AUGUST 6, 1927.

$$\Delta E = (i_1 + i_2)KR_0 + i_1KR$$

$$\Delta E = K[i_1(R_0 + R) + i_2R_0]$$

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{K}{K+1}$$

$$\frac{\delta E}{E} = \frac{K}{1+K} = 1$$

$$\frac{E}{\delta E} = [1 + \frac{1}{K}]$$

$$\mu = 1 + \frac{1}{K}$$

$$\frac{1}{K} = \mu - 1$$

$$K = \frac{1}{\mu - 1}$$

$$K = \frac{1}{1.5}$$

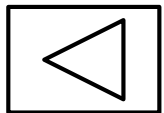
11-25  
OK  
E.C.B.

Disclosed in principle  
to E.C. Blessing Aug 6, 1927  
H.S. Black Aug 18, 1927  
Witnessed and Understood  
E.C. Blessing  
Aug 18, 1927

1927年8月6日、通勤のためいつものようにHadson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新聞紙(New York Times)にアイデアを記したのが、左図である。

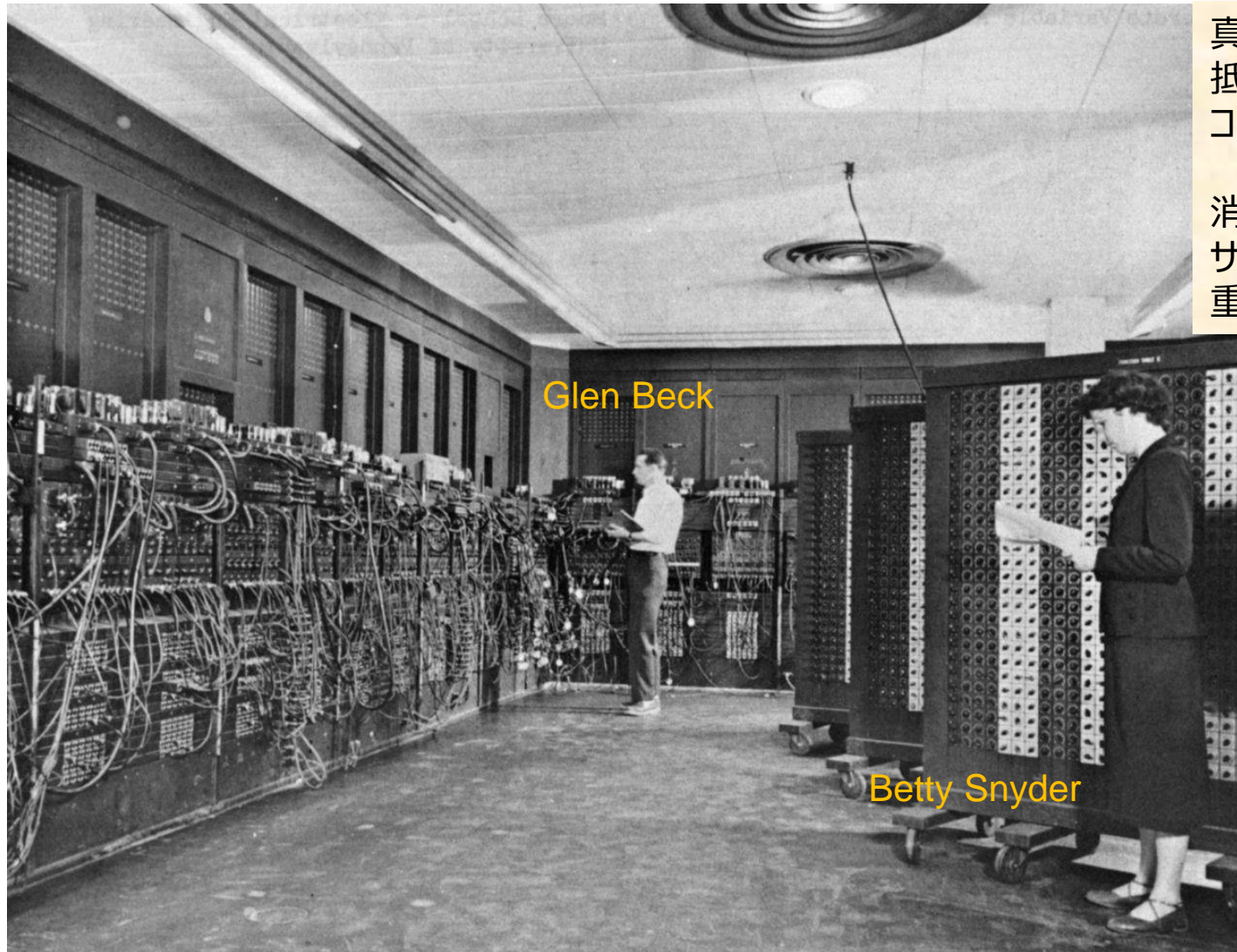
帰還のアイデアは当時すでに知られていて、回路を不安定にすると考えられていた。そのため『負』帰還が直ちに受け入れられた訳ではない。Bell研の同僚であるBodeやNyquistなどによる理論解析や普及に対する努力により、安定条件が理解され、次第に広く受け入れられるようになった。

<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

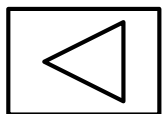


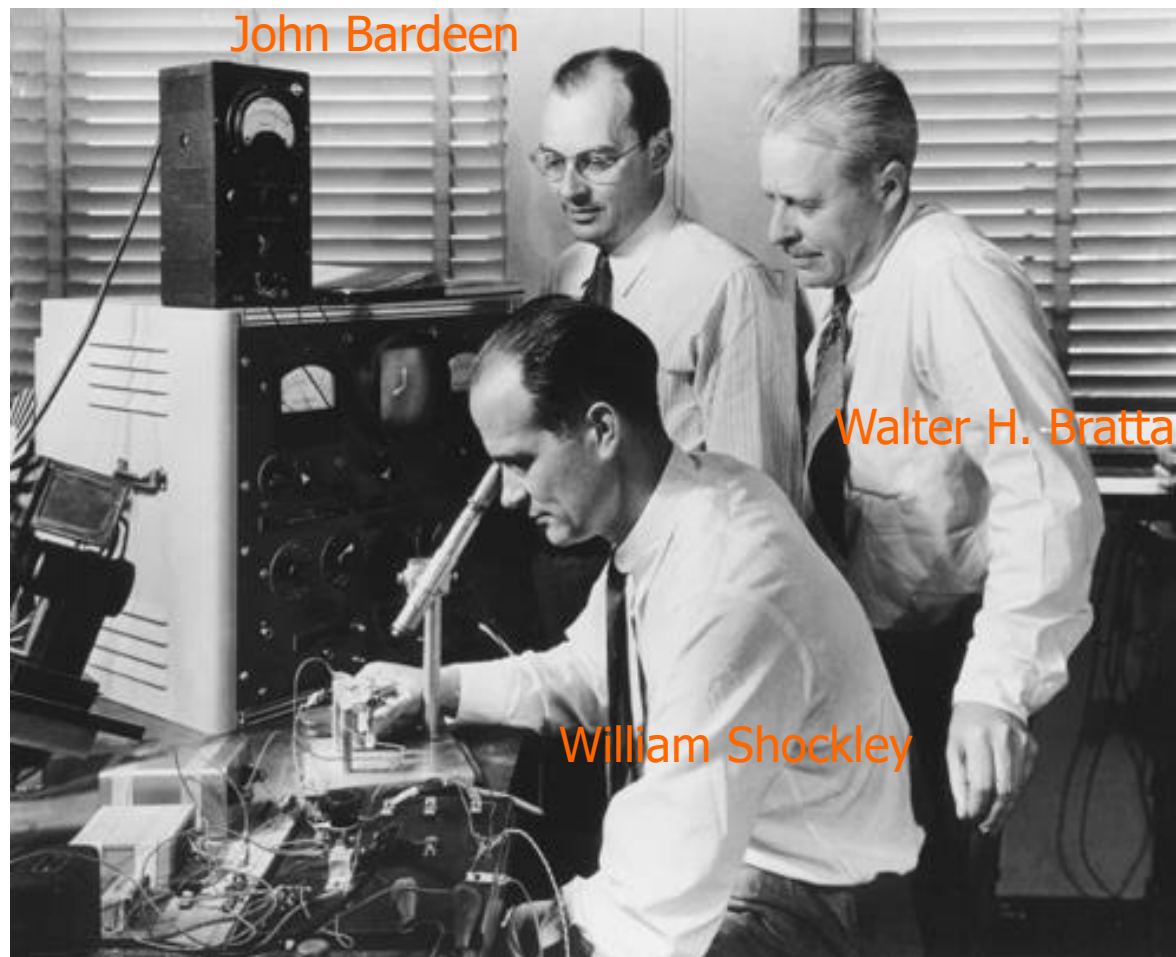
真空管 17,468 本  
抵抗 70k 個  
コンデンサ 10k 個

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





John Bardeen

Walter H. Brattain

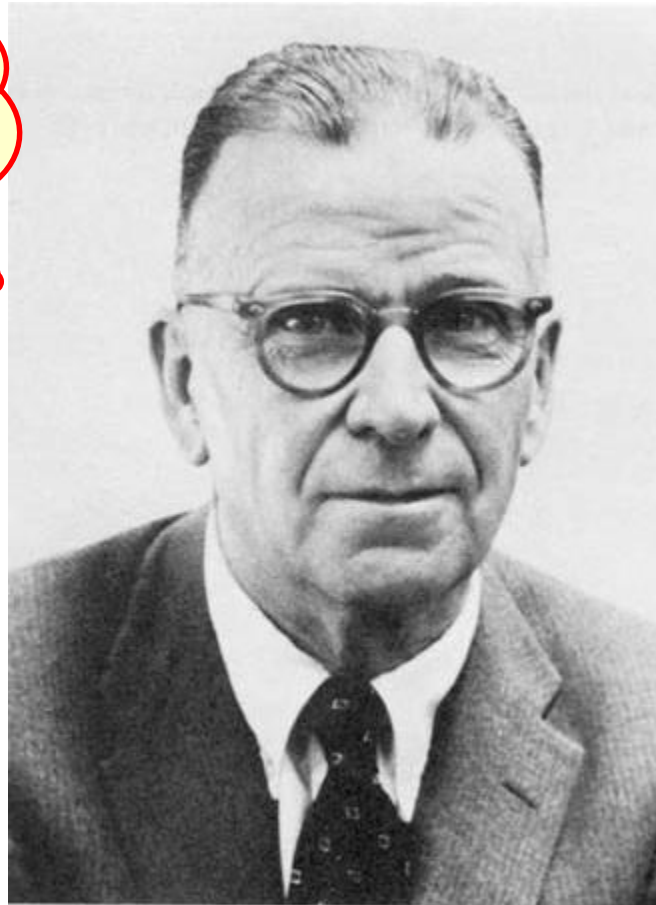
William Shockley

<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。

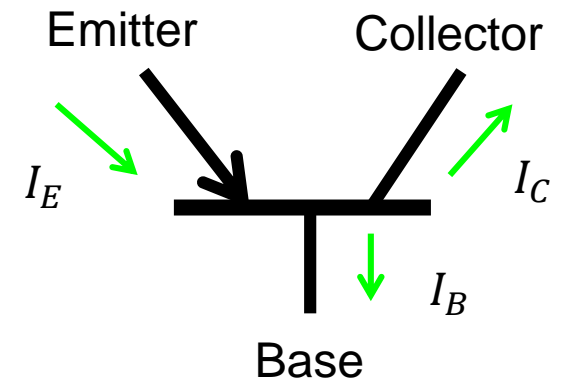


Mervin Joe Kelly (1894-1971)

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

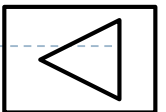
# 最初のトランジスタ

1947年12月23日に発明された最初のトランジスタ（複製品）



$I_B$ の $\beta$ 倍が $I_C$ になるという  
電流増幅素子である。

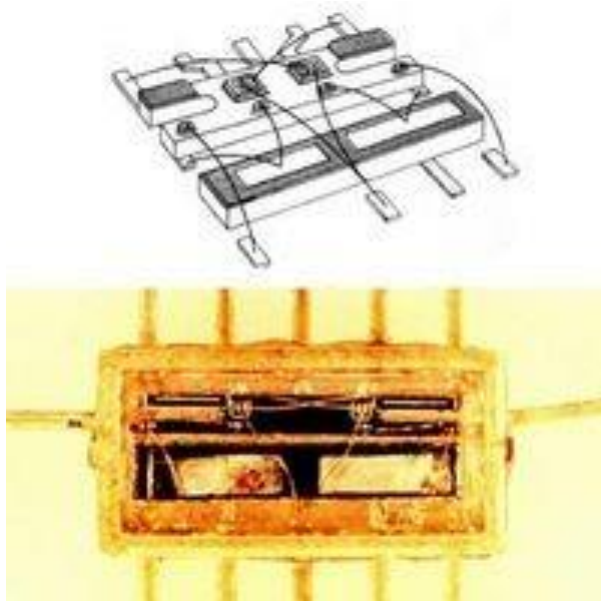
<https://clintonwhitehouse4.archives.gov/Initiatives/Millennium/capsule/mayo.html>





# ICの発明

---



Texas Instruments  
Type 502 Bistable Multivibrator Solid  
Circuit (1960)

Jack Kilbyの発明は、個別チップを金線で接続するというものであった。



Fairchild Semiconductor Type  
“F” flip-flop (1960)

Robert Noyceは、Fairchildで開発されたばかりのプレーナー技術を用いて、分離された素子ばかりでなく、配線も一つのダイに作り上げることを発明した。これが、現在につながるIC技術の源流である。

<https://www.computerhistory.org/atcm/who-invented-the-ic/>

# Planar技術

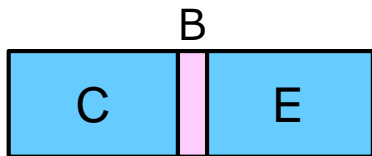
March 20, 1962

J. A. HOERNI

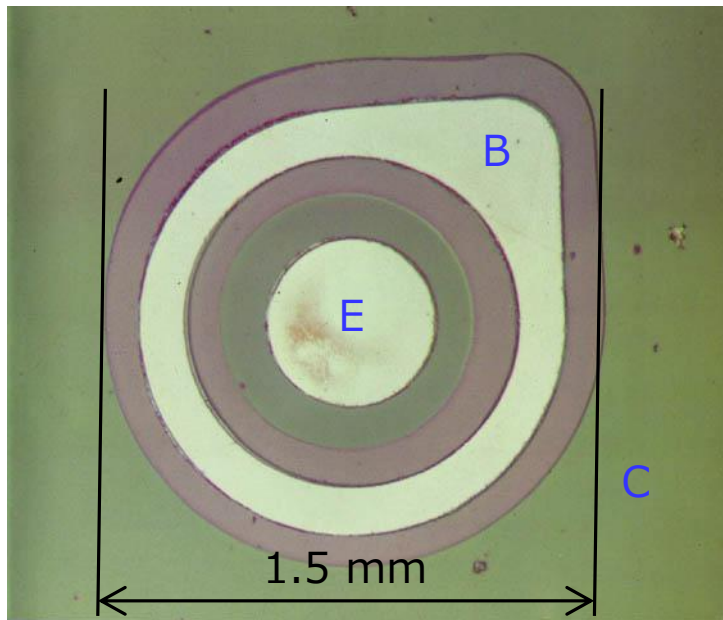
3,025,589

METHOD OF MANUFACTURING SEMICONDUCTOR DEVICES

Filed May 1, 1959

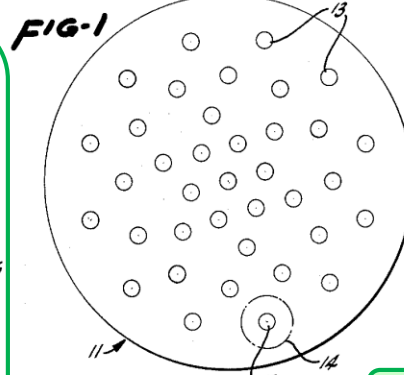
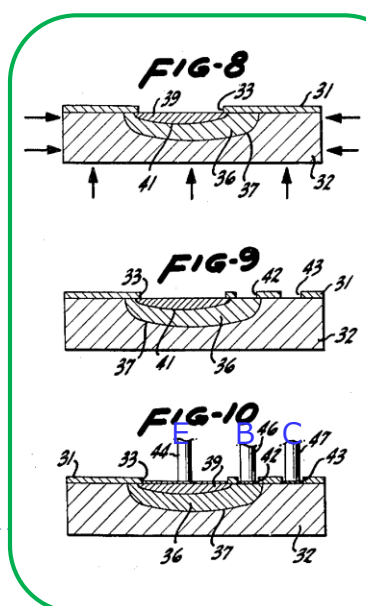
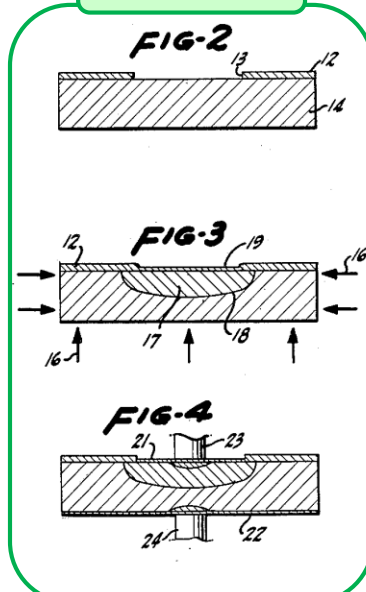


接合Trを電流が流れる向きに図式化すると上図のようになる。このとき、ベース厚が薄い程性能の良いTrになるが、どうやってベース電極をつなぐかという問題が生じる。この課題に対するfinal answerが planar technologyである。

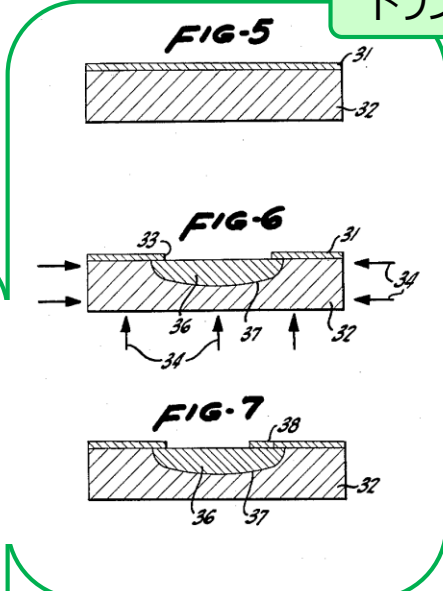


<http://smithsonianchips.si.edu/augarten/i8.htm>

## ダイオード



## トランジスタ



INVENTOR.  
JEAN A. HOERNI

BY  
Lippincott & Ralls  
ATTORNEYS

