

図解&シム

真空管回路の 基礎のキン

回路シミュレータで
実践的にらくらくマスター!

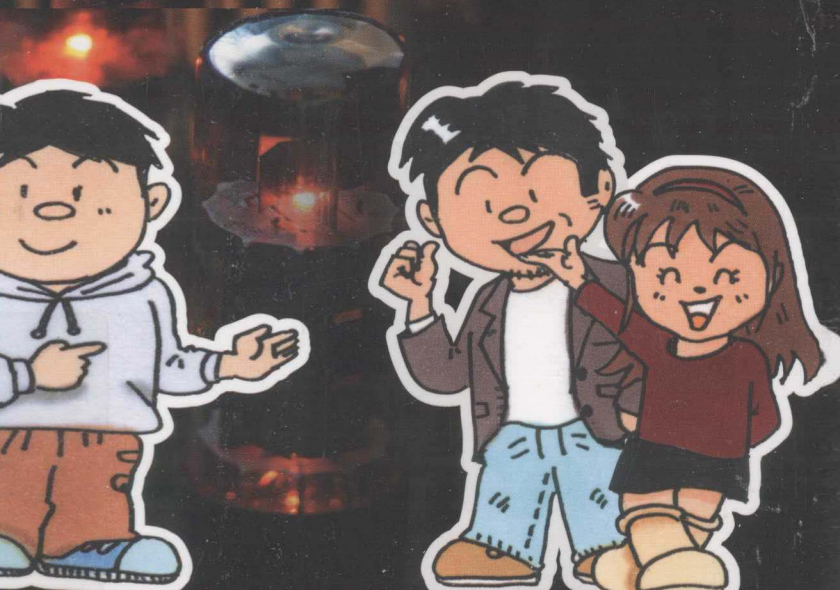
米田 聡

Science i



サイエンス・アイ新書

SoftBank Creative

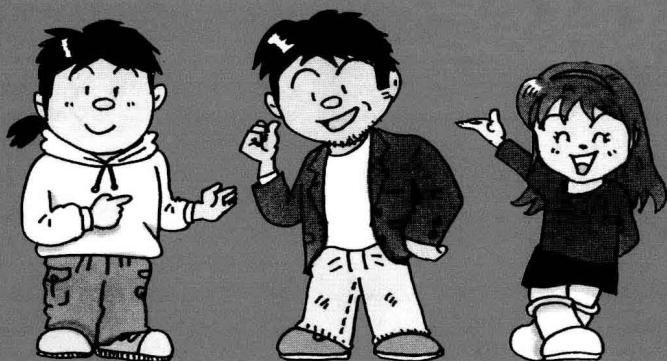




図解&シム

真空管回路の 基礎の基礎 回路シミュレーション実践から楽しくマスター! 蔵書章

米田 聡



science-i



サイエンス・アイ新書

SIS-095

<http://sciencei.sbcr.jp/>

ずかい
図解&シム

しんくう かんかい ろ き そ
真空管回路の基礎のキソ
かい ろ しっせんてき
回路シミュレータで実践的にらくらくマスター!

2008年12月24日 初版第1刷発行

著 者 よねだ さとし 米田 聡
発 行 者 新田光敏
発 行 所 ソフトバンク クリエイティブ株式会社
〒107-0052 東京都港区赤坂4-13-13
編集：サイエンス・アイ編集部
03(5549)1138
営業：03(5549)1201
装丁・組版 株式会社ビーワークス
印刷・製本 図書印刷株式会社

乱丁・落丁本が万が一ございましたら、小社営業部まで着払いにてご送付ください。送料小社負担にてお取り替えいたします。本書の内容の一部あるいは全部を無断で複写（コピー）することは、かたくお断りいたします。

©米田 聡 2008 Printed in Japan ISBN 978-4-7973-5045-6

science i



「科学の世紀」の羅針盤

20世紀に生まれた広域ネットワークとコンピュータサイエンスによって、科学技術は目を見張るほど発展し、高度情報化社会が訪れました。いまや科学は私たちの暮らしに身近なものとなり、それなくしては成り立たないほど強い影響力を持っているといえるでしょう。

『サイエンス・アイ新書』は、この「科学の世紀」と呼ぶにふさわしい21世紀の羅針盤を目指して創刊しました。情報通信と科学分野における革新的な発明や発見を誰にでも理解できるように、基本の原理や仕組みのところから図解を交えてわかりやすく解説します。科学技術に関心のある高校生や大学生、社会人にとって、サイエンス・アイ新書は科学的な視点で物事をとらえる機会になるだけでなく、論理的な思考法を学ぶ機会にもなることでしょう。もちろん、宇宙の歴史から生物の遺伝子の働きまで、複雑な自然科学の謎も単純な法則で明快に理解できるようになります。

一般教養を高めることはもちろん、科学の世界へ飛び立つためのガイドとしてサイエンス・アイ新書シリーズを役立てていただければ、それに勝る喜びはありません。21世紀を賢く生きるための科学の力をサイエンス・アイ新書で培っていただけると信じています。

2006年10月

※サイエンス・アイ (Science i) は、21世紀の科学を支える情報 (Information)、知識 (Intelligence)、革新 (Innovation) を表現する「i」からネーミングされています。

本文デザイン・アートディレクション：株式会社ビーワークス
イラスト：かまたさとし

はじめに

真空管はかつての電子デバイスの花形ですが、筆者が電子工作を始めたころには、すでにテレビがトランジスタ化され、身のまわりからは姿を消しつつありました。ですから、若い世代の人のなかには、真空管は古典デバイス、あるいはキワモノの一種としてとらえている方もいるのではないかと思います。

しかし、オーディオやギターでは、依然として真空管アンプに人気があり、根強い利用者がいるのもまた事実です。真空管には半導体では得にくい特性があり、これからも当分は使用され続けるでしょう。そのため、現在でも多くの真空管アンプの解説書が出版されています。

そうした中には良書がたくさんあるのですが、文章や数式で示された内容を、すんなりと理解できる方は多くはないでしょう。真空管にかぎりませんが、実際に回路を動かして、測定して、初めて「なるほど、そういうことだったのか」と、書籍に書かれたことを納得し、理解するという経験を、筆者も繰り返してきました。

残念ながら電子工作は、一般に敷居が低くはなく、さらに測定を行うともなると、簡単ではありません。文章

から得られる理解よりも、実際に体験を通して得た理解のほうが、はるかに身につくはずですが、その体験を得るまでの敷居の高さが、真空管などを理解するうえでの障害になっています。

そこで、電子回路シミュレータを用いて、真空管アンプへの理解を深めることを本書では試みました。リニアテクノロジー社が無償で公開している「LTspice IV」、そして中村 歩氏がネット上で公開してくださっているすぐれた真空管モデルを用いることで、現実の真空管アンプに近い動作がパソコン上でシミュレートでき、現実の世界では難しい測定も可能です。シミュレータでの体験を通して、文章や数式だけでは難しい理解が得られるのではないかと考えています。

あらかじめ記しておきますが、本書は真空管アンプの製作すべてを扱うことを意図した書籍ではありません。紙面の都合からアンプ回路だけに絞り、電源回路や実装技術といった、実際にアンプを製作するうえで欠かせない内容は割愛しています。また、本書で扱うアンプはシングル回路に絞っていて、プッシュプル回路は解説していません。

内容を絞った代わりに、シングルアンプ回路に関して

は、自力で設計するための最低限の内容は盛り込んだつもりです。シングルアンプといえども、しっかりと設計するには多くの知識が必要ですが、適宜シミュレーションを援用すれば、本書の内容だけでオリジナルアンプの設計に取り組んでいただけるでしょう。真空管アンプ製作への取りかかりとして、あるいはほかの真空管解説書の副読本として活用していただければと思います。

なお、本書を読み通すために特別な前提知識は必要ありませんが、オームの法則だけは把握しておいていただく必要があります。また、LTspice IVに関して必要な操作方法は解説していますが、操作をおもにしているわけではありませんので、ソフトに慣れない方はLTspice IVのヘルプや、ネット上のドキュメント、あるいは拙著『電子回路の基礎のキソ』などを参照していただければ幸いです。本書は『電子回路の基礎のキソ』の姉妹編として企画しており、同書に掲載しきれなかったモデルの利用法や、SPICEコマンドの解説を加えることで、LTspice IVの一步進んだ使い方を意図的に解説していることも、付記しておきます。

真空管回路の基礎のキソ

CONTENTS

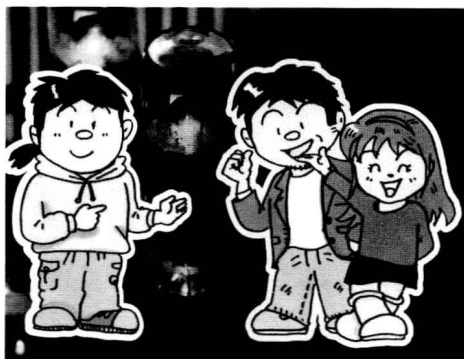
はじめに	3
------------	---

第1章 真空管ってどんなもの？	9
------------------------------	---

01 真空管で遊ぼう	10
02 真空管の歴史とキホン	12
03 三極管は真空管のキホン 電極の名前を覚えよう	14
04 シミュレータを使おう	17
05 三極管をシミュレートする デバイスモデルを使おう	20
06 真空管を使った実験回路を描こう	24
07 三極管の基本動作を確かめよう	27
08 三極管はユニークなデバイス	30
09 Eb-lb特性曲線を描く	33
10 三極管の三定数	37
11 三定数は真空管のオームの法則	39

第2章 三極管増幅回路を 動かしてみよう	41
---------------------------------------	----

01 三極管増幅回路のキホン	42
02 自己バイアス回路の 抵抗の値を決めよう その①	45
03 自己バイアス回路の 抵抗の値を決めよう その②	49
04 自己バイアス回路のシミュレーション	51
05 三極管増幅回路の増幅率	54
06 カソード抵抗を消す術？	57
07 周波数特性を見てみよう	59
08 より実用に近い回路をめざして	63
09 グリッド抵抗の上限と グリッドリーク電流	66



第3章 多極管を使ってみよう69

- 01 五極管と四極管70
- 02 五極管の実験回路73
- 03 五極管の E_b - I_b 特性曲線76
- 04 スクリーニンググリッドを調べる81
- 05 五極管増幅回路を動かしてみよう85
- 06 スクリーニンググリッド電圧の与え方88
- 07 五極管増幅回路をシミュレートする91
- 08 三極管接続94

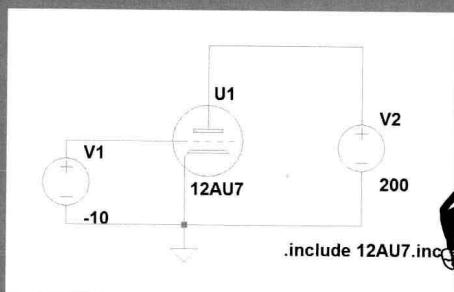
第4章 シングル出力回路を動かしてみよう97

- 01 真空管と出力トランス98
- 02 出力トランスをシミュレートする101
- 03 三極出力管2A3の E_b - I_b 特性曲線を調べてみよう108
- 04 負荷抵抗の決定111
- 05 三極管シングル出力回路のシミュレーション115
- 06 直熱管の使い方119
- 07 多極出力管を使った出力回路を設計しよう121
- 08 EL34シングル出力回路を実験しよう124

第5章	三極管シングルアンプの シミュレート	127
01	三極管シングルアンプを 設計してみよう	128
02	12AX7を用いた初段の設計	131
03	初めてのシングルアンプ	133
04	いろいろな測定をしてみる	138
05	異常を発見?	143
06	カソードフォロア	147
07	カソードフォロアを利用する	150
08	定電流負荷を使う	155
第6章	五極管シングルアンプの シミュレート	159
01	アンプの出力インピーダンスを考える	160
02	まずは基本を実験してみる	165
03	負帰還とは?	170
04	負帰還の難しさ	174
05	アンプの健康診断	183
06	負帰還アンプを調べてみよう	187
07	負帰還のバリエーション	189
08	ギターアンプへの展開	194
09	ボリュームをシミュレートして 歪み方を見てみよう	198
	参考文献	204
	索引	205

第1章

真空管ってどんなもの？



ユニークな真空管の基本的な構造と、
それをシミュレートする LTspice IV の
使い方をご紹介します。



真空管で遊ぼう

「真空管」は、いまや絶滅寸前の電子デバイスです。私たちのまわりからはほとんど姿を消していますが、30年くらい前までは、テレビなどに盛んに利用されていました。

現在、真空管が利用されていて比較的、特殊ではない分野は、オーディオとギターアンプにかぎられるでしょう。特に後者は、初心者向けの機種を除くと、多くの製品に真空管が用いられており、その意味では現在でも真空管が主流の製品とっていいかもしれません。ギターアンプに使用される理由はおおいに説明していきますが、ギターの世界では「アンプも楽器の一部」と見なされており、真空管を用いたギターアンプは、楽器としてすぐれているといわれています。

また、身のまわりにも特殊用途では依然として真空管が残っています。その代表は、電子レンジに使用されている「マグネトロン」でしょう。マグネトロンは、マイクロ波（電子レンジでは2.45GHzが使用されています）を発生させる特別な真空管です。マグネトロンに代わる半導体デバイスは、いまでも存在しませんから、今後も使用され続けると考えられる真空管といえます。

このように、真空管はいまでも一部で使用されているとはいえ、一般用途では事実上、絶滅したも同然ですから、なぜいまさら「真空管の回路設計」なのか、という点に触れておくことにしましょう。

もちろん、ギターアンプやオーディオアンプを作りたい、自分で設計したいというのは、強力な動機になるハズで、そうした方は目的をもって学べるはずですが、そうでなくても真空管を学ん

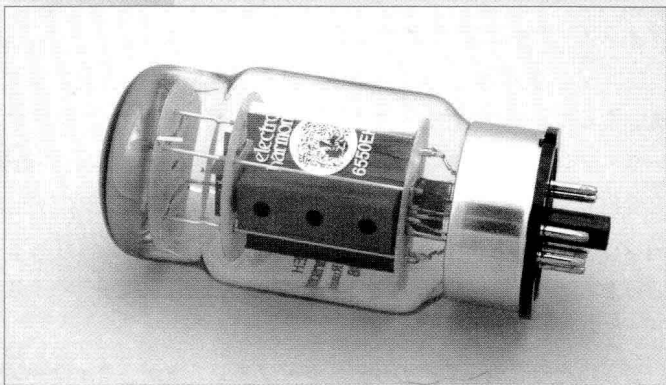
でみる価値はあると筆者は考えています。

現在の主流の電子デバイスは、いうまでもなく「半導体」ですが、半導体がどうして機能するのか、またその特性を原理まで理解するには、実は量子力学のお世話になる必要があります。使ううえで量子力学のお世話になる必要はないのですが、量子力学なしには「ブラックボックス」と考えても間違いではありません。

一方、真空管は、ほとんどの特性を電気磁気学……電磁場の相互作用の範囲で導くことができます。量子力学以降を現代物理、それより以前を古典物理と区別することがありますが、その意味では、真空管は古典物理レベルのデバイスといっても差し支えないかもしれません。

要するに、「半導体よりわかりやすい」ことが真空管の特徴であり、もやもやを残すことなく学べるという点で、半導体よりとっつきやすい側面があるわけです。

真空管



大型の五極ビーム管6550



真空管の歴史とキホン

では、具体的に真空管とはどのようなものを、説明していくことにしましょう。

真空管が発明されるきっかけは、有名な発明王エジソンが、白熱電球の実験中に発見した「エジソン効果」と呼ばれる現象にさかのぼります。エジソンは、フィラメントに電流を流して白熱させたときに、電球の管壁にススがついてしまうのを抑えるために、フィラメントから少し離れた位置に別の電極を封入して、電圧をかける実験をしていたところ、フィラメントから電極の間に電流が流れる現象を観測しました。これが、エジソン効果です。

エジソンは、エジソン効果の理由を説明できず、実用も思いつかなかったことから、効果を発見したのみにとどまりました。離れたフィラメントと電極の間に電流が流れた理由は、熱せられたフィラメントから「熱電子」が飛びだし、電極に電子が移動したためです。電子はマイナスの電荷を持ちますから、電流が電極からフィラメントへと流れたわけです。

エジソン効果では、電流は電極→フィラメントの一方向にしか流れません。この特性を利用する「二極管」が、ジョン・アンブローズ・フレミングによって発明されました(1904年)。当時、電波を受信して検波する(音声信号に変える)素子が求められており、彼は電流を一方にしか流さないという二極管の作用(整流作用といいます)が、検波に利用できることを見いだして、電子デバイスとして利用したのです。

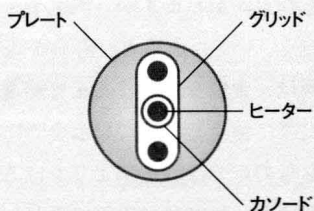
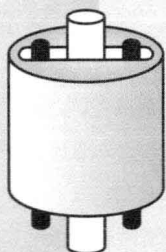
さらにその直後、米国のリー・ド・フォレストが、フィラメントと電極の間にもう1つ別の電極(これをグリッドといいます)を

入れた真空管「三極管」を発明します(1906年)。

電子はマイナスの電荷をもちますから、グリッドにマイナスの電圧をかけると、電子の流れがじゃまされて電流の流れが減少します。逆に、グリッドにプラスの電圧をかけると、電子の流れが加速されて電流が増加します。このように、グリッドの電圧で電子の流れを制御できることが、「増幅作用」につながっていきます。

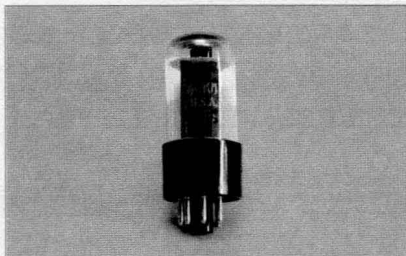
実は、リー・ド・フォレスト自身は当初、増幅作用には気づいておらず、たんに新しいタイプの検波用デバイスとして三極管を発明したようです。ですが、この増幅作用をもつ三極管の発明によって高度な電子回路への扉が開かれ、エレクトロニクス時代が始まることになったのです。

三極管の構造



○ 代表的な三極管

テレビ垂直出力管6CK4。一時
期オーディオに使われたため、
入手困難になりつつあります





三極管は真空管のキホン

～電極の名前を覚えよう

二極管、三極管は真空管の基本的な形態ですが、二極管は「ダイオード」と置き換えが可能で、近年ではあまり利用する機会もないので、本書でもくわしくは扱いません。まず、三極管から説明をしていくことにしましょう。

三極管にかぎらず、真空管には「直熱型」と「傍熱型」という2つのタイプがあります。直接型は、白熱電球と同じように、フィラメントから熱電子を飛ばすタイプで、真空管のプリミティブな形を保ったタイプと考えればいいでしょう。

一方、傍熱型はヒーター（文字どおりのヒーターです）を電極で囲み、電極を温めて、電極から熱電子を放出させるタイプです。

直熱型はシンプルで、電源を入れるとほぼ瞬時に熱電子の放出が始まる利点がありますが、熱電子を放出し続けることができる時間が短く、いいかえると、寿命が短いという欠点があります。

傍熱型は、金属板が温まるまで熱電子が飛ばないため、電源オンから実際に使えるようになるまでに時間がかかる難点があるものの、寿命の点では直熱型よりもはるかに有利になります。そのほかにも利点・欠点はあるのですが、真空管時代の後期には傍熱型が主流になりました。

では、真空管の各電極の名前を覚えていくことにしましょう。図の左が傍熱型、右が直熱型で、電極の名前が違う個所があるので、注意してください。

右ページに、三極管の回路記号を示しています。円が「ガラス管」を表していて、傍熱型三極管では3個の電極、そしてヒーターが封じ込められています。端子の数は、ヒーターで2個、それに3