

# 熱イオン真空管回路の理論 THEORY OF THERMIONIC VACUUM TUBE CIRCUIT

by  
LEO JAMES PETERS  
©1927 McGraw-Hill Book Company, Inc.

出典;[www.tubebooks.org/Books/peters\\_theory.pdf](http://www.tubebooks.org/Books/peters_theory.pdf)

一部引用・翻訳  
間 幸久

## CHAPTER I

### 1 始めに

(引用・翻訳を省略)

#### 1a 三極素子の種類

前項では、三極素子を取り得る形式のいくつかを簡単に指摘しました。これらの素子のより詳細な説明は、次項で提示される理論を読者が検討するのに役立ちます。

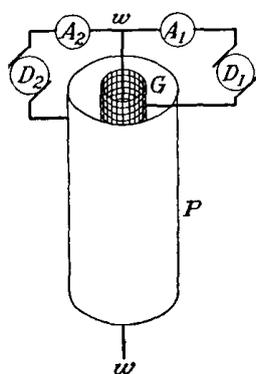


図 1: コロナ増幅器

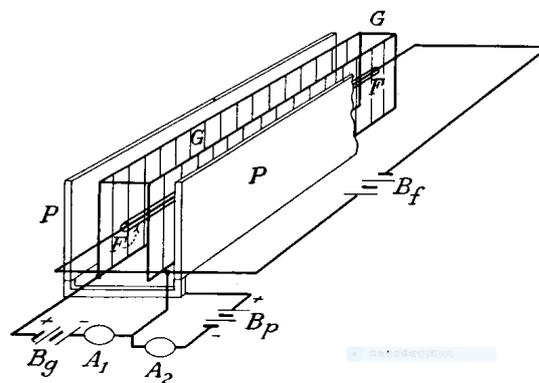


図 2: グローア発振器

図 1 は、実験的なコロナ増幅器の概略図を示しています。W は、円筒形の線グリッド G の軸に沿う長さ約 6 フィートのワイヤーを表します。グリッドの直径は約 1 インチです。さらに、プレートと呼ばれる金属製の円筒 P が囲んでいます。プレートの直径は約 6 インチです。これらの 3 つの部品は互いに絶縁されており、大気と同じ圧力のガスに浸漬されています。グリッドは、発電機  $D_1$  によって、ワイヤ W から約 8,000 ボルト高い電位まで充電されます。ワイヤの近くの高い電気強度により、空気がイオン化します。ワイヤの近くの空気のこのイオン化は、コロナ放電と呼ばれます。正の電荷は、発電機  $D_2$  によってプレート P 上に置かれます。この充電の大きさは、プレートの電位をワイヤーの電位より約 30,000 ボルト高くするようなものです。プレートとグリッ

ドの充電が、コロナワイヤーから負イオンを遠ざける電界を設定します。ほとんどの移動電荷はグリッドの開口部を通過してプレートに届き、これにより、プレートとワイヤーの間に電流が生じます。この電流は、電流計  $A_2$  で読み取ることができます。グリッドに引き寄せられた電荷は、電流計  $A_1$  を介してコロナワイヤーに戻ります。プレートとワイヤーの間を流れる電流は、グリッドの電荷を変更することによって制御できます。グリッドは、コロナ真空管の制御要素です。

コロナ増幅器で使われる電流の大きさを考えるために、以下の代表的な値を書留めます：

ワイヤーからのグリッドの電位.....7,400 ボルト  
 ワイヤーからのプレートの電位.....28,000 ボルト  
 プレートからワイヤーへの電流.....2 ミリアンペア  
 グリッドからワイヤーへの電流.....1 ミリアンペア

グリッドの電位が 500 ボルト増加すると、プレートからワイヤーへの電流が 1.25 ミリアンペア増加しますし、グリッドからワイヤーへの電流が 0.75 ミリアンペア増加します。プレートからワイヤーへの回路の電力の変化は、 $(28,000)(0.00125)=35$  ワットです。プレートからワイヤーへの回路でこの電力の変化を引き起こすために必要なグリッドからワイヤーへの回路での電力の変化は、 $(7.9)(1.75)-(7.4)(1)=6.43$  ワットです。上記で計算された電力変化は、グリッド部品の制御動作を示しています。

図 2 はグローア発振器の概略図です。F は、長さが約 2 インチの Nernst (訳注) の酸化物グローアを表します。加熱電流は、蓄電池  $B_f$  によってこのグローアを通過することができます。G は、グローアの両側約 1/8 インチに配置された線グリッドを表します。グリッドは、蓄電池  $B_g$  からグローアを充電することにより、所定のグローアからの電位に維持できます。P は、グリッドから約 1/4 インチ離れた 2 つの金属プレートを表します。プレートは、蓄電池  $B_p$  によってグローアからの所定の電位に維持できます。この素子は、大気圧の下で空気中で動作します。(訳注)1864 生まれドイツの物理化学者

グローア発振器の動作は次のとおりです。グローア要素を構成する加熱された酸化物が電子を放出します。これらの電子は、プレートとグリッド上の正の電荷に引き付けられ、プレートとグローアの間、およびグリッドとグローアの間を電流が流れることとなります。ほとんどの電荷はグリッドの開口部を通過してプレートに移動するため、プレートとグローア間の電流はグリッドとグローア間の電流よりも大きくなります。プレートとグローア間の電荷を変更することによって制御できます。グリッドはグローア真空管の制御要素です。

上記の寸法とほぼ同じであるグローア発振器の動作で使用される電流と電圧の大きさは、次の代表的な値を持っています。

グローアからのグリッドの電位.....85 ボルト  
 グローアからのプレートの電位.....350 ボルト  
 プレートとグローア間の電流.....0.43 ミリアンペア  
 グリッドとグローア間の電流.....0.04 ミリアンペア  
 プレートからグローアへの電流のボルト当たりの変化..... $1.25 \times 10^{-6}$  アンペア  
 プレートからグローアへの電流のボルト当たりの変化..... $6.7 \times 10^{-6}$  アンペア  
 グリッド・グローア間電圧のボルト当たりの変化..... $5 \times 10^{-7}$  アンペア

上記のデータを検討すると、プレートからグローアへの回路でのグリッドの制御に関して、次の重要な事実が明らかになります。グリッド電位の 1 単位変化は、プレートからグローアへの回路のプレート電位の 1 単位変化の 5.4 倍になります。グリッド電位の 1 ボルトの変化によるプレートか

らグローアへの電流の変化は、グリッド電位の単位変化によるグリッドからグローアへの電流の変化の13倍です。

コロナ増幅器とグローア発振器は、1917年にEdward Bennett教授によってウィスコンシン大学で研究されました。コロナ増幅器は増幅器として機能させることはできましたが、発振しませんでした。ただし、空気以外のガスに浸した場合の素子の可能性は調査されていません。露出したグローア発振器は、増幅器または発振器として機能します。

3電極の真空管は、三極管の中で最も重要です。それは、通常の白熱灯のフィラメントと同様の金属フィラメント、周囲または一部を囲む金属プレートおよびフィラメントとプレート間に挿入された線グリッドで構成されています。図3は、ガラス容器を取り除いた5ワットの電力管の写真です。この写真には、真空管の3つの要素が表示されています。図4は、最新の250ワットの電力管の写真です。

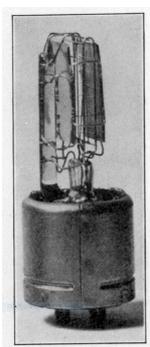


図 3: ガラス封器を外した5ワット電力管



図 5: 初期の二極管

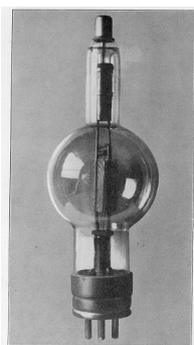


図 4: 250ワット電力管

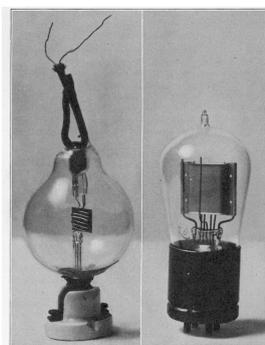


図 6: 左, 初期の DeForest 三極管 右, 1920年の受信管

図5は、無線信号の検波に使用された初期の二極管の写真です。図6の左側に描かれているのは初期のDe Forestの三極管で、右側に描かれているのは1920年頃に無線受信機で一般的に使用されていた真空管です。これらの3つの写真は歴史的関心から掲載します。

三極管では、フィラメントに電流を流してそれが白熱するまで加熱します。この加熱されたフィラメントは電子を放出し、これらの電子の動きは、プレートとグリッドに電荷を置くことによって制御されます。フィラメントによる電子の放出とこれらの電子の動きの制御についての議論は次項

で説明します。

## 1b 熱せられた物体からの電子の放出

前項で説明したすべての三極管では、真空管自体の電気伝導は、通常の条件下では非常に優れた絶縁体である媒体を介して行われます。最後の2つの素子においては、3つの電極の内の2つの電極上の帯電により起こされる中程度の帯電がされた電極の1つが、伝導を起こします。真空管内では、真空空間に帯電をさせる素子が熱せられた金属フィラメントです。この項の目的は、加熱された金属からの電子放出の主な特徴を基礎的な方法で説明することです。

物質の電子理論によれば、元素の各原子は、核と呼ばれる正に帯電した引力の中心で構成され、その周りを電子と呼ばれる1つ以上の負の電荷が回転します。電子の総電荷は、核の正味の正電荷に等しい隣接する原子系間の相互作用のために、一部の電子は、引き付けている原子核の制御から一時的に逃げる場合があります。このような電子は、原子間で再び負に帯電した気体小体のように振る舞い、それらが再び何らかの原子系に付着するようになります。銅には1立方センチメートルあたり1,000~5,000の自由電子が含まれていると推定されていますが、銅の自由電子の数は1立方センチメートルあたり $10^{19}$ のオーダーであると考えられています。ガス分子と同様に、これらの自由電子は、物体の温度の関数であるランダムな熱攪拌速度を持っています。

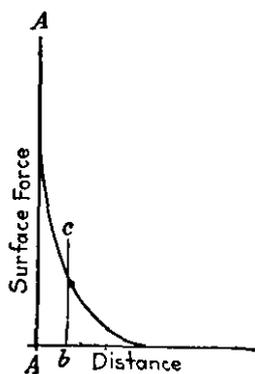


図 7: 電子が持っている表面力

自由電子は物質の内部を容易に移動しますが、物体の表面では、非常に大きな力を受けて、体内に留められます。図7では、AAは高真空における金属導体の表面を表します。曲線Cは、電子を体内に留めようとする表面力の距離による変化を表しています。この曲線は縮尺どおりには描かれていません。実際には、物体からの非常に短い距離で実際にはゼロに落ちます。この曲線の下での任意の距離bまでの領域は、電子の表面から表面力に対してbに移動するために電子に対して実行する必要がある作業を表します。ジュールで測定されたこの作業を $W_1$ で表すとします。電子の質量をグラムセブン( $10^7$ グラム)で表す $m$ とし、表面AAでの秒あたりのセンチメートル単位での熱速度を $v$ で表すとします。ここで

$$1/2mv^2 = W_1$$

だとすると、 $W_1$ が曲線Cの下での合計面積よりも小さい場合、電子は表面力によって導体から距離bで静止し、次に導体に引き付けられます。総運動を表す曲線Cの下での全体が $W$ ジュールに等しいとします。そして、電子が表面力に完全に打ち勝つならば、表面AAにおいて次のような熱速度が必要です。

$$1/2mv^2 > W$$

電子の1クーロンを金属の表面から表面力に逆らって真空空間に移動するために実行する必要がある作業は、金属の電子親和力と呼ばれます。この動作はジュールで測定されているので、電子親和力の寸法は起電力（ジュール/クーロン）の値に等しく、電子親和力はボルトで示されます。いくつかの純金属の電子親和力を以下に示します。

金属	ボルトで示す電子親和力	金属	ボルトで示す電子親和力
タングステン	4.52	トリウム	3.4
プラチナ	4.4	ナトリウム	1.82
銀	4.1	カリウム	1.53

電子がタングステンから真空空間に逃げるために持っている必要のない速度を計算することができます。電子の電荷は  $1.591 \times 10^{-19}$  クーロンです。電子の質量は  $9 \times 10^{-28}$  グラムです。速度は、電子の運動エネルギーが、クーロン単位の帯電電荷を掛けたタングステンの電子親和力に等しくなるようなものでなければなりません。ジュールで表した電子の運動エネルギーは

$$1/2(9 \times 10^{-28})10^{-7}v^2 = 4.5 \times 10^{-35}v^2$$

タングステンから逃れるためには、毎秒センチメートルの電子の速度は

$$v = \left( \frac{(4.52)(1.59 \times 10^{-19})}{4.5 \times 10^{-35}} \right)^{1/2} = 1.26 \times 10^8 \quad \text{毎秒センチメートル}$$

トリウムから真空に逃げるために電子が持っている必要のない速度は

$$v = \left( \sqrt{\frac{3.4}{4.52}} \right) 1.26 \times 10^8 = 1.09 \times 10^8 \quad \text{毎秒センチメートル}$$

したがって、タングステンからよりもトリウムから電子がより容易に脱出することは明らかであり、これは、現代の真空管におけるトリウム・フィラメントの使用を部分的に説明しています。

常温では、極わずかの電子だけが金属の表面から逃げるに必要な速度を持ちます。しかし、金属が高温に加熱されると制止する反発が生じないので、急速に電子を失います。

1つの電子が表面を通過して逃げた後、金属物体には正味の正電荷が残り、そして表面から逃げる次の電子は表面力に加えて正に帯電した物体の引力と反発力による脱出した電子による反発力に打ち勝つ必要があります。電子が物体から逃げ続けると、静電場が構築されます。静電場というのは最終的に電子が物体を離れるのと同じ比率で物体内に戻されよう働きます。したがって、加熱された金属体は電子に囲まれ、動的平衡は物体とそのような電子の気体との間に存在します。同じ速度で電子が物体から出て再び入るということです。物体の温度が上昇すると、平衡が破壊され、物体の周りの電子の気体の密度は、新しい平衡状態に達するまで増加します。

### 1c 真空中を通る熱イオン電流

図8では、Aは真空中で加熱された金属板を表しています。プレートAを接地してゼロ電位に維持します。この加熱されたプレートは、電子層によって囲まれているため、プレートの近くでは、この層によって電子がプレートに向かって反発されます。これと同じ領域では、プレートから離れる方向の力によって正の電荷が作用します。プレートから離れて測定したときに距離が正であると見なされる場合、プレートに近い電位勾配は負でなければなりません。さらに、プレートとプレートから遠く離れた距離はゼロでなければなりません。距離の関数として電位を与える曲線は、図8に示すような形状でなければなりません。

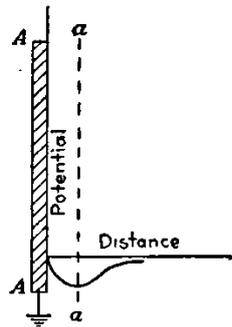


図 8: 熱板の近傍の電位分布

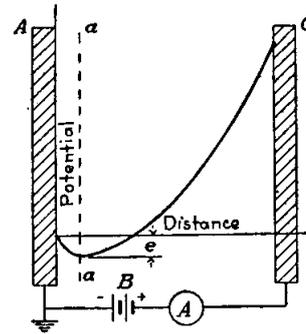


図 9: 熱板と帯電された冷板の間の電位分布

冷板を熱板に隣接して配置し、この冷板を蓄電池  $B$  によって熱板の上の  $E$  ボルトの電位に維持します。新しい構成を図 9 に概略的に示します。冷板の電位が高すぎない場合、熱板付近の電位分布は、図 8 に示すのと同じ一般的な形状になります。ただし、検討中の問題では、電位は冷板で値  $E$  でなければなりません。2つの板極間の電位分布は、図 9 の曲線で示される一般的な形状を持つ必要があります。この曲線の特徴は、平面  $aa$  の左側の負の電位傾斜と平面  $aa$  の右側の正の電位傾斜です。この平面の左側の領域では、電子への静電力は熱板に向けられ、この平面の右側への電子への力は冷板に向けられます。つまり、電子が冷板に到達するには、熱板から、その左側の領域の熱板に向かう静電力に抗して平面  $aa$  を通過するのに十分な運動エネルギーで放出される必要があります。

平面  $aa$  の負の電位を  $e$  で表し、電子の電荷を  $q$  で表すとします。すると、1 個の電子が冷板に到達するならば、 $1/2mv_n^2$  が少なくとも  $eq$  に等しい速度で熱板から放出される必要があります。ここで、 $v_n$  はプレート  $AA$  と直角への放出速度の構成要素です。すなわち、 $1/2mv^2$  が少なくとも  $v_n$  が板  $AA$  に直角である速度を構成要素とする等式と等しくならなければなりません。放出速度とは、高温の金属板の表面力に打ち勝った後の電子の速度を意味します。

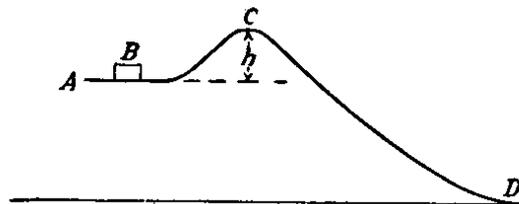


図 10: 図 9 における電気的条件の機構的变化

図 9 の電子が熱板から冷板に移動するために必要な条件は、摩擦が無視されたときに図 10 の区間  $B$  を丘  $ACD$  まで滑らせるために必要な条件と多少似ています。区間  $D$  に到達するには、 $A$  から開始して、少なくとも丘の頂上まで運ぶのに十分な速度である必要があります。丘の頂上を通過すると、重力が区間を移動するように作用します。 $C$  から  $D$  に移動します。点  $C$  の標高が  $A$  から  $h$  センチメートルの場合、区間  $D$  に到達するために、少なくとも  $hmg$  (訳注) に等しい運動エネルギーで  $A$  を離れる必要があります。(訳注) 気圧

電子は、ゼロから高い値までの範囲の速度で熱板から放出されますが、 $eq$  よりも大きい運動エネルギーを持つ電子のみが冷板に到達できます。熱板から冷板に移動するこれらの負の電荷は、私

たちの慣例では、真空空間を介して冷板から熱板に流れる電流を構成します。陽極  $C$  の電位を上げると、最大の負電位  $e$  は小さくなります。そこで、例えば冷板に到達するために必要な運動エネルギー  $e\phi$  で放出される電子の数が増え、電流が増加します。同様に、陽極の電位を下げると  $e$  が増加し、電流が減少します。陽極の電位が非常に低くなると、放出された電子のいずれかが所有するものよりも大きい平面  $aa$  に到達するために必要な運動エネルギー、空間電流はゼロに落ちます。陽極電位がさらに低下しても、空間電流には影響しません。陽極電位が、板極間の最小電位  $e$  がゼロに等しくなる値に増加すると、放出された電子はすべて冷板に到達し、陽極電圧を上げても空間電流の強さを大きくすることはできません。ただし、それは熱板が放射する電子の比率を上げると増加できます。熱板によって放射された電子の比率は熱板の温度を上げると増加できます。放出された電子がすべて冷板に流れる電流は飽和電流と呼ばれます。飽和電流は、熱板の温度の関数です。

Richardson は、気体の運動論から引き出された仮定と議論を利用して、加熱板と冷却板間の飽和電流について次の方程式を導出しました。

$$J = a\sqrt{T}\epsilon^{\frac{5}{2}} \quad \text{熱板と冷板間の立法センチメートル当たりのアンペア}$$

## 1d エネルギー関係

図 9 では、冷板  $C$  は、電池  $B$  によって熱板  $A$  の上の  $E$  ボルトの電位に維持されています。 $C$  が  $A$  から  $E$  ボルトの電位に維持されているという記述は、電界の力が  $A$  から  $C$  に転送された負電気の各クーロンで  $E$  ジュールの仕事をするとという記述と等価です。 $q$  がクーロンで表す 1 個の電子の負電荷を表す場合、熱板から冷板に向かって電子が通過することにより各電子に対する電界による仕事量は  $E_q$  ジュールです。完全な真空状態では、電子の運動は拘束されず、仕事  $E_q$  は電子の運動エネルギーの増加に変換されなければなりません。放出の速度が無視される場合、冷板プレートに到達すると、電子は次の式を満たすような速度でなければなりません。

$$1/2mv^2 = E_q$$

電子が冷板に到達したときに電子が取得した速度は

$$v = \sqrt{\frac{2E_q}{m}} \quad \text{秒あたりのセンチメートル}$$

これで、電荷と電子の質量の比は  $1.768 \times 10^{15}$  クーロン/グラムセブンになります。したがって、放出速度を無視して、電子が冷板に到達するときの電子の速度は

$$v = 5.95 \times 10^7 E^{1/2} \quad \text{秒あたりのセンチメートル}$$

熱板からの冷板の電位が 1,000 ボルトである場合、電子は  $1.87 \times 10^9$  センチメートル/秒の速度で冷板に到達します。

冷板に到達すると、電子はその運動エネルギーを冷板上の分子および電子に分割します。つまり、板間の領域の電気力によって電子に対して行われた仕事が熱に変換されます。

電力管では、電子の衝撃はプレートを白熱するまで加熱するのに十分な大きさです。プレートが容器の一部を形成するような、大量の電力を処理する真空管が構築されています。これにより、プレートを水に浸して冷却できます。

2 二極真空管の特性曲線

(引用・翻訳を省略)

2 三極真空管の特性曲線

(引用・翻訳を省略)

CHAPTER II

(引用・翻訳を省略)

CHAPTER III

(引用・翻訳を省略)