

受信用真空管の I_{HK} ハム雑音について

Hum due to Leakage through Heater-Cathode Insulation

伊 藤 久*
Hisashi Ito

内 容 梗 概

受信用真空管 H-5799 (試作名: 高 gm 5 極管) のハム雑音の原因を検討し、グリッド誘導ハム雑音とヒータ陰極間漏洩電流によるハム雑音がほぼ同程度存在することが判明した。後者はほかの原因によるハム雑音に比べてその性質が著しく複雑である。この報告では、基礎資料としてヒータ陰極間漏洩電流によるハム雑音の性質を種々の観点から検討した結果を述べたものである。

1. 緒 言

受信用真空管のハム雑音の原因、機構については、一般論としてはかなり広く知られているものの^{(1)~(4)}, 具体的に特定品種のハム雑音の性質について詳細に調べた例は従来ほとんどなかった。

一般にハム雑音軽減の根本的対策は材質、構造などの検討にまたなければならないが、ハム雑音の原因となる現象乃至反応は非常に複雑なものである。特に I_{HK} ハムに関しては最近かなり基礎的な研究も進められているが⁽⁵⁾ まだまだ未知の部分も多いようである。この場合ヒータカソード間に起つている現象を物理的、化学的な観点から追究するのはもちろん重要であるが、それと同時にでき上つた真空管を外からみた場合どんな性質を示すかを検討することも大切で両者が総合されて初めて全貌を明らかにすることができる。

この後者の立場から特に I_{HK} ハムについて行つた実験の結果を取りまとめて報告する。

2. ハム雑音の種類

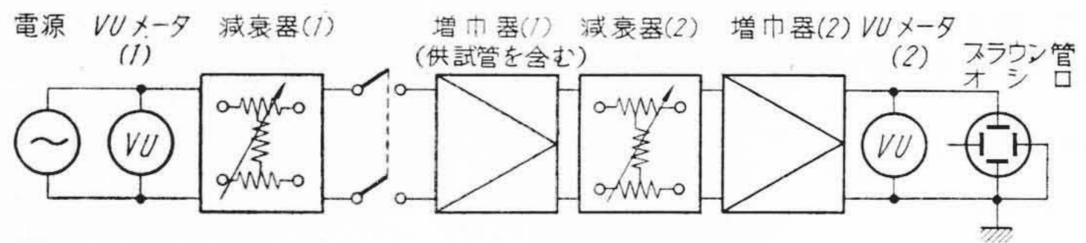
商用周波数の交流を利用する電子機器では一般に電源周波数およびその高調波の電圧があらゆる経路を経て回路内に誘起され出力に雑音として現れる。ハム雑音とはその電圧の総称であるが、この報告ではもつと狭い意味にとつて真空管のヒータを交流点火するために生ずるハム雑音(ヒータハム)だけを取り扱う、また対象を傍熱型真空管に限定する。

傍熱型真空管のヒータハムは種類が多く、その原因によつておのおの特長がある。そして、その特長を利用することによつておのおのハム雑音をかなりはつきりと分離することができる

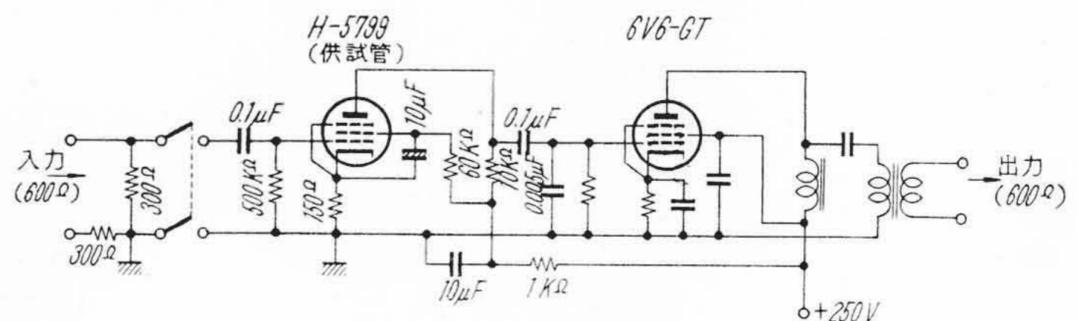
し、またハム雑音をある程度軽減することも可能である⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁶⁾。

傍熱型真空管のヒータハムの主なものを列挙すると次のようになる。

- (1) 漏洩電流によるもの (エミッションによるものを含む)*
 - (a) ヒータカソード間の漏洩電流によるもの (狭義の I_{HK} ハム)
 - (b) ヒータとグリッドあるいはプレートとの間の漏洩電流によるもの
- (2) 静電結合によるもの
 - (a) ヒータカソード間の静電容量によるもの ((1) (a) と合せて広義の I_{HK} ハムを形成する)
 - (b) ヒータグリッド間の静電容量によるもの
- (3) 電磁結合によるもの
 - (a) ヒータ回路とグリッドまたはカソード回路の間の電磁結合で生ずるハム
- (4) マグネチックハム
 - (a) ヒータ電流によつて生ずる交番磁界が電子流に作用する結果生ずるハム



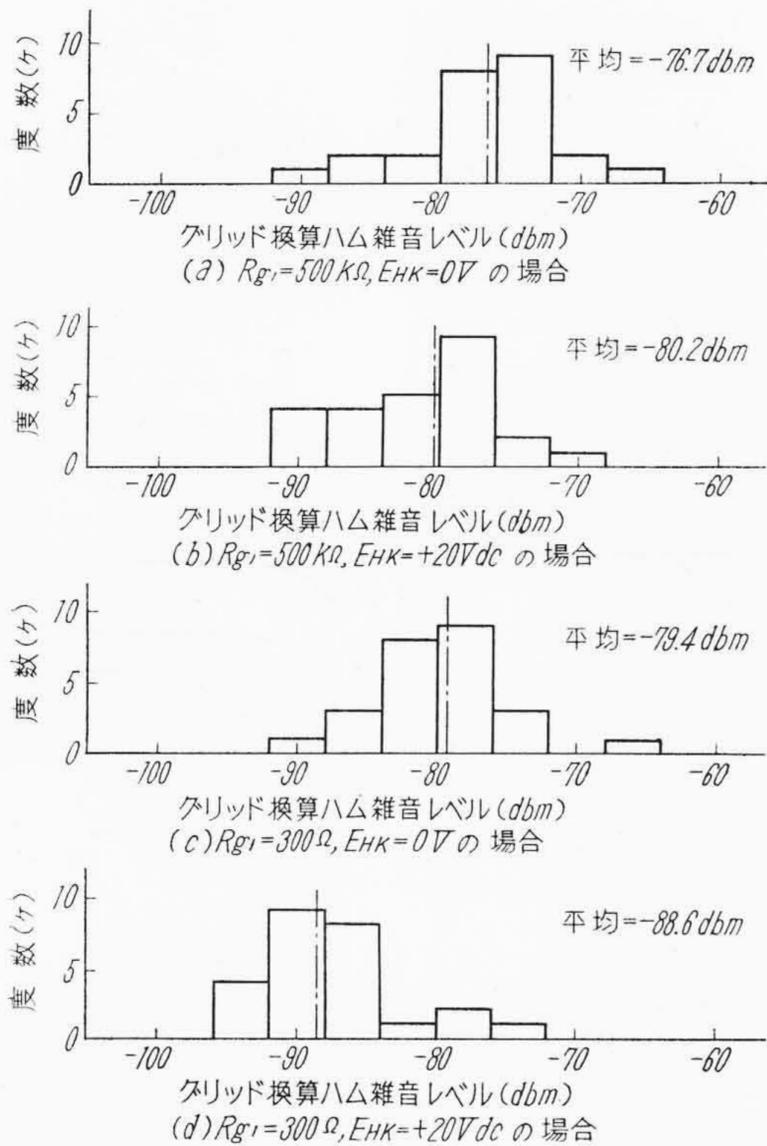
第1図 ハム試験回路のブロックダイヤグラム



第2図 ハム試験回路供試管部の回路構成

* 日立製作所茂原工場

* たとえばヒータから放射された電子がカソードそのほかに到達する場合がある



第3図 H-5799 の各種条件におけるハム雑音レベルの分布 (ハムバランスの midpoint 接地)

3. H-5799 のハム雑音

3.1 ハム雑音の測定条件

測定は第1図および第2図の回路によつた。なお供試真空管のヒータは中性点を接地し、50 c/s の交流で点火する。ハム雑音レベルの測定には、初め増幅器(1)に400 c/s, -30 dbm の入力信号を加え、増幅器(2)の出力が 0~+10 dbm になるように減衰器(2)を調整する。次に信号を除き増幅器(2)の出力が前と同じ値になるまで減衰器(2)の減衰量を減らす。この減らした量から S/N 比がわかり、また入力換算のハム雑音レベルが求められる。

3.2 H-5799 のハム雑音のレベル

第2図の回路によつて測定した H-5799 のハム雑音レベルの分布を第3図(a)に示す。次に第2図の回路で供試管のグリッド抵抗に並列に 300Ω の抵抗を接続したままにして、グリッド誘導ハムの影響を除いた場合の分布を同図(b)に、またヒータカソード間に 20V (ヒータを正にして)の直流電圧を印加した場合を(c)に、(b)と(c)の両方を併用した場合のハム雑音レベルの分布を同図(d)に示す。

そのほかの事実をもあわせて判断すると、H-5799 で

第1表 H-5799 の各種条件におけるハム雑音出力レベルおよび波形 (出力レベルはグリッド換算値)

条件 試料 No.	(a) 3.1に述べた条件 レベル 波形	(b) $CX=50\mu F$ その他(a)と同じ レベル (a)との差 波形	(c)ハムバランスなしヒータ 片線接地その他(a)と同じ レベル (a)との差 波形	(d) $E_{HK}=+10V$ その他(a)と同じ レベル (a)との差 波形
1	-84.9 dbm	-89.3 (-4.4)	-89.9 (-4.0)	-86.3 (-3.4)
2	-73.9	-88.2 (-14.3)	-83.1 (-9.2)	-86.0 (-12.1)
3	-81.9	-87.4 (-5.5)	-79.1 (+2.8)	-80.5 (-8.6)
4	-79.2	-88.2 (-10.0)	-83.1 (-3.9)	-88.4 (-9.2)
5	-73.0	-70.9 (+2.1)	-75.7 (-2.7)	-71.9 (+1.1)
6	-82.9	-92.2 (-9.3)	-76.7 (+6.2)	-92.6 (-9.7)
7	-77.3	-90.1 (-12.8)	-78.1 (-0.8)	-84.1 (-6.8)
8				
9	-79.0	-87.7 (-8.7)	-83.9 (-4.9)	-86.3 (-7.3)
10	-85.2	-86.3 (-1.1)	-86.9 (-1.7)	-85.4 (-0.2)
11	-79.3	-78.6 (-0.3)	-81.2 (-1.9)	-79.8 (-0.5)
12	-82.3	-90.6 (-8.3)	-76.0 (+6.3)	-93.1 (-10.8)
13	-80.2	-86.3 (-6.1)	-77.7 (+2.5)	-83.8 (-3.6)
14	-85.7	-88.1 (-2.4)	-84.7 (+1.0)	-87.5 (-1.8)
15				
16	-75.6	-90.3 (-14.7)	-78.0 (-2.4)	-91.4 (-15.8)
17	-88.0	-93.7 (-5.0)	-84.7 (+3.3)	-91.9 (-3.9)
18	-89.2	-88.5 (+0.7)	-87.2 (+2.0)	-86.9 (+2.3)
19	-84.9	-89.3 (-4.4)	-79.2 (+5.7)	-88.3 (-3.4)
20	-74.9	-82.8 (-7.9)	-73.4 (+1.5)	-83.8 (-8.9)

注1 直流点火時の出力雑音レベルはグリッド換算 -115~-120 dbm である。

はグリッド誘導ハムと I_{HK} ハムがほぼ等しい出力レベルを有することがわかつた。このうちグリッド誘導ハムはその機構も比較的単純であるが、 I_{HK} ハムは前述のように非常に複雑なものなので特にそれだけを取り上げて種々の角度から検討を加えた。そのため以下の実験は供試管のグリッド抵抗に並列に 300Ω の抵抗をつないだままで行つた。以下の報告は特に H-5799 という型名にこだわる必要はなくある程度一般性をもつたものと考えてさしつかえない。

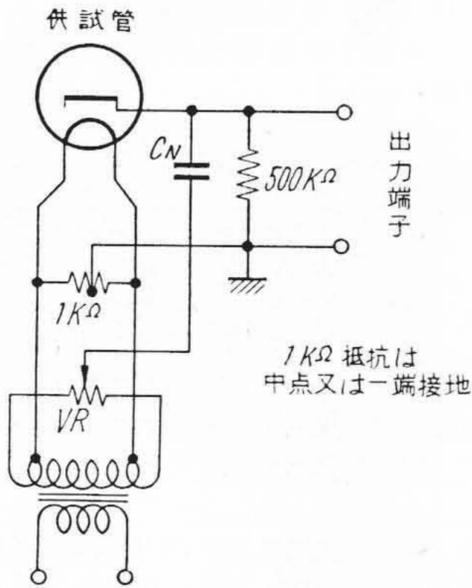
4. I_{HK} ハムの諸性質

4.1 ハム雑音出力の波形

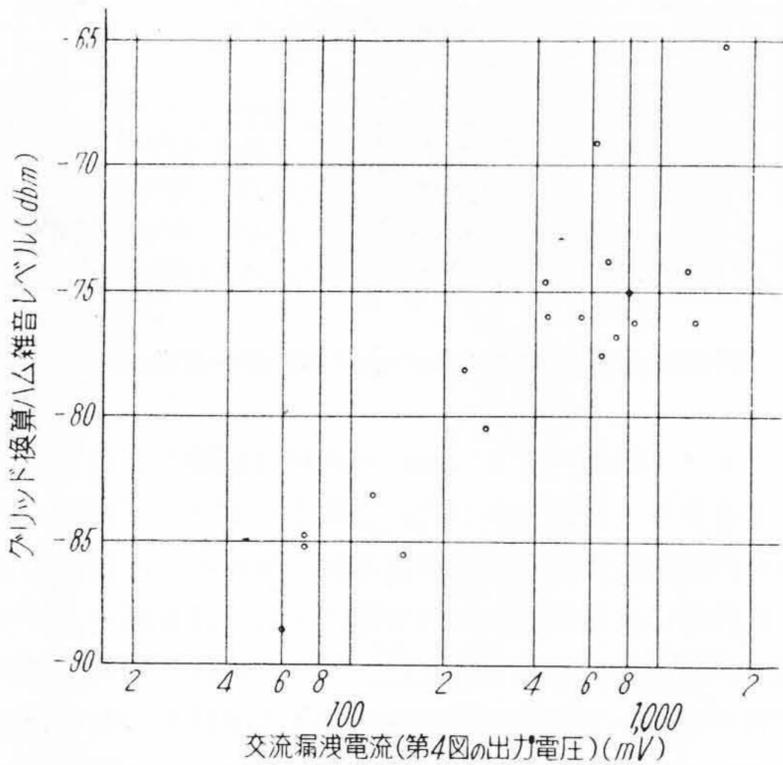
各種条件におけるハム雑音出力レベルおよび波形を一括して第1表に示す。カソード抵抗にバイパスコンデンサを付加するとハム雑音出力が減少するものが多い。これらの試料はヒータカソード間に直流電圧を印加してもやはりハム雑音出力が減少している。これらの事実は I_{HK} ハムの存在を裏づけるものである。

4.2 ヒータカソード間絶縁とハム雑音出力レベルとの関係

今までの検討の結果 H-5799 のハム雑音は大部分がいわゆる I_{HK} ハムによるものらしいことが推定されたが、さらに確認のためヒータカソード間の漏洩電流を直接測定してハム雑音出力レベルとの相関を調査した。この漏洩電流を直流的に測定することは、電流値が通常非



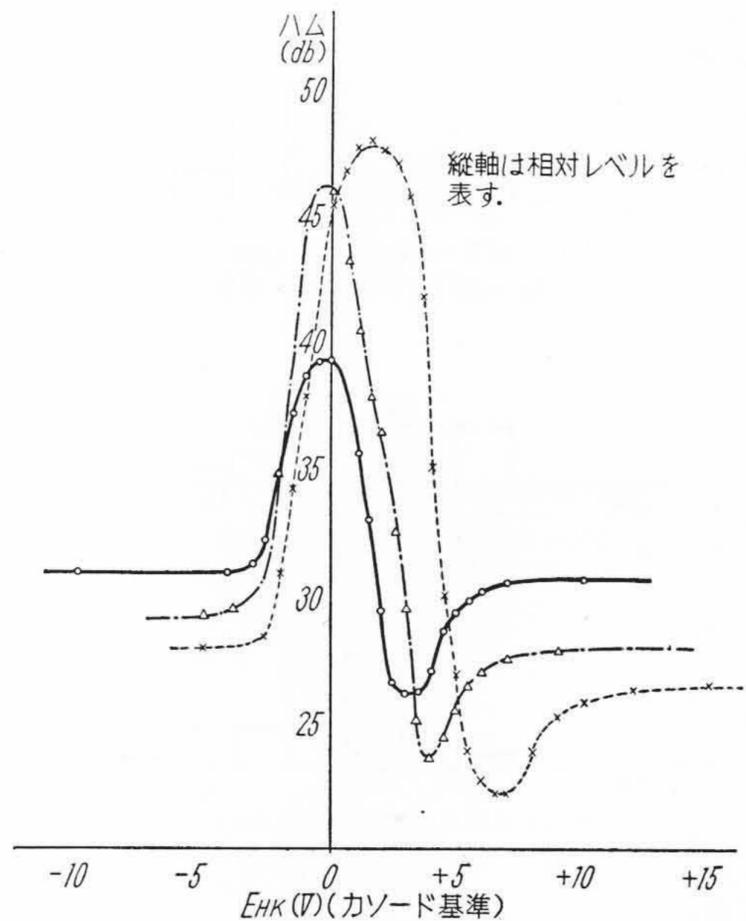
第4図 ヒータカソード間漏洩電流の交流的測定方法



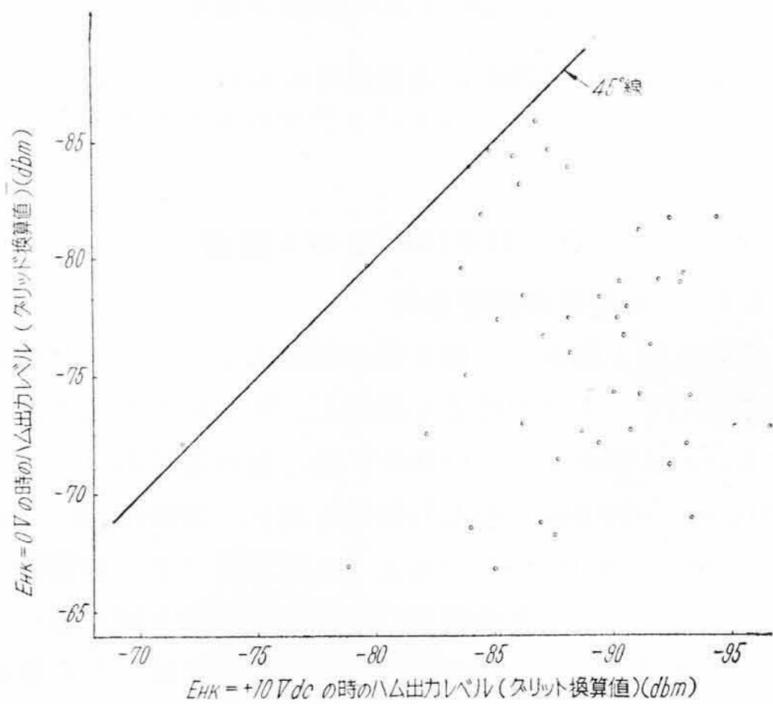
第5図 ヒータカソード間漏洩電流とハム雑音レベルの相関 (ハムバランスの midpoint 接地の場合)

常に小さい (10^{-7} A 以下) という困難を伴うほかに電流値が測定中変動するものがしばしばあるので (次第に減少するものが多い), 第4図のような方法で交流的に漏洩電流を測定した。その際ソケットや配線の漂遊容量などに起因する妨害電流は中和コンデンサ C_N によつて打消してある。すなわち供試管をはずした状態で出力電圧が最小になるよう VR を調整した。第4図で $1\text{k}\Omega$ の抵抗の midpoint を接地したときに出力端子に現れる交流電圧の値 (平均値) と, 3.1 で述べた規定条件でハムバランスの midpoint 接地のときのハム雑音レベルとの相関を求めたのが第5図である。ハムバランスの一端を接地した場合にもほぼ同様の結果を得た。両者の間にはよい相関がある。

なお, 同図において交流漏洩電流が一桁減つてもハム雑音出力が約 15 db 程度しか減少しないのは, 漏洩電流がある程度以下になるとほかの原因によるハムが無視できなくなつてハム雑音レベルの減り方が漏洩電流に比例



第6図 直流ヒータバイアスがハム雑音レベルに及ぼす効果



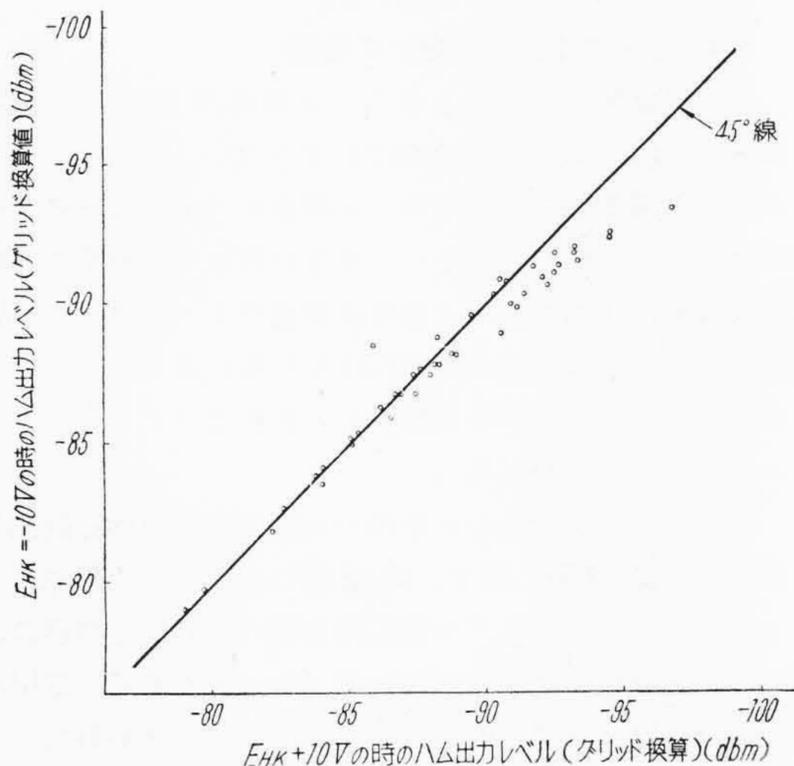
第7図 ヒータバイアス印加時と無印加時のハム雑音レベルの相関

しなくなるためであろうし, 漏洩電流測定の際の R_K は $500\text{k}\Omega$ でハム雑音測定時の 150Ω に比べてかなり違いヒータカソード間の電圧電流特性が非直線的であることなどの影響で両者の状態が必ずしも同一でないためであろう。

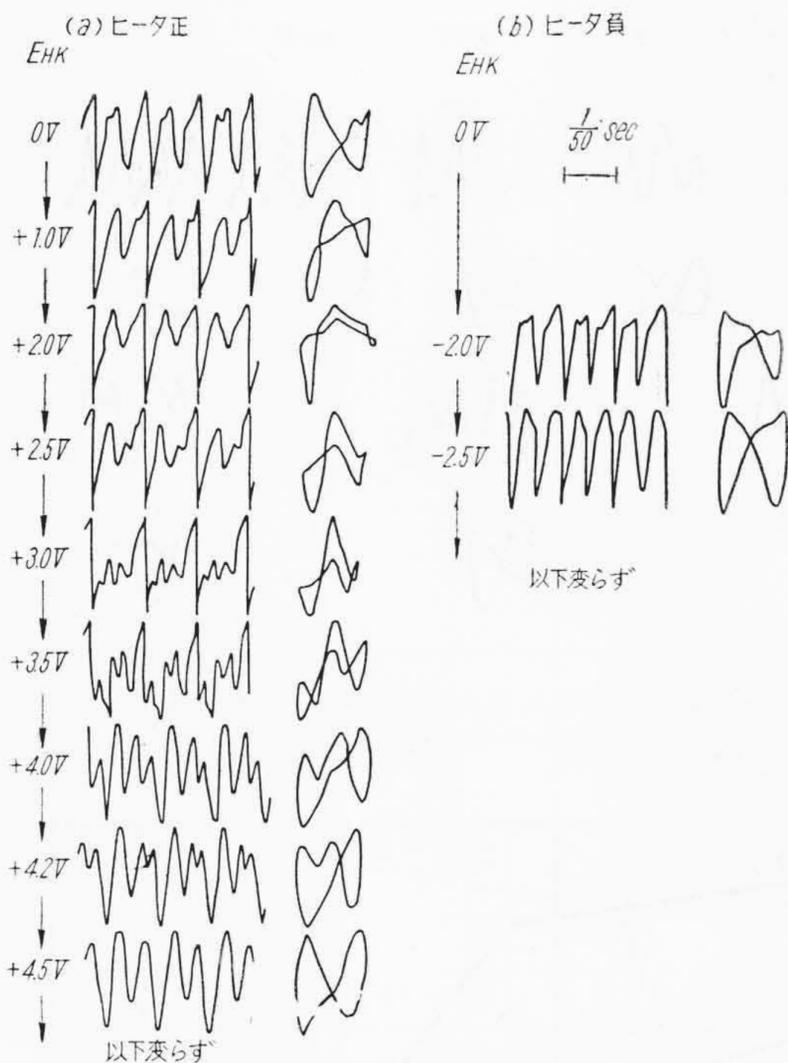
4.3 ヒータ直流バイアスの効果

4.3.1 ヒータ直流バイアス印加時のハム雑音レベル

第1表で直流バイアス電圧の印加によつてハム雑音

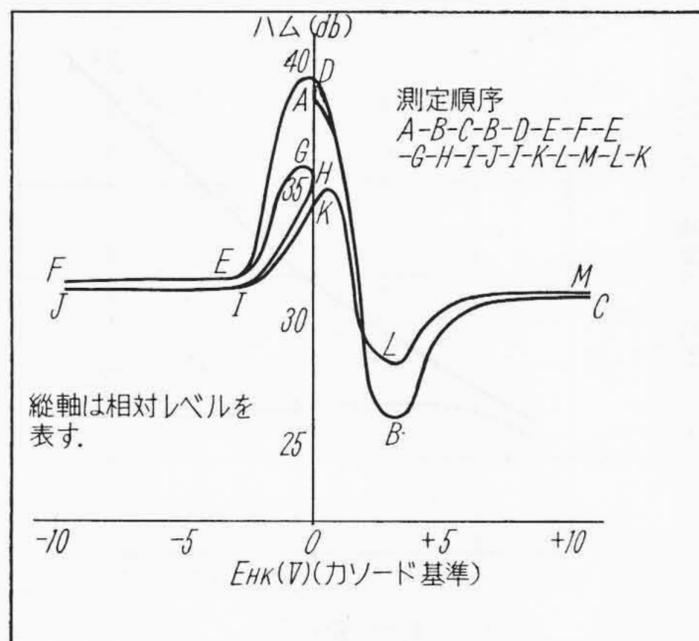


第8図 ヒータバイアス+10V dc と-10V dc のときのハム雑音レベルの相関

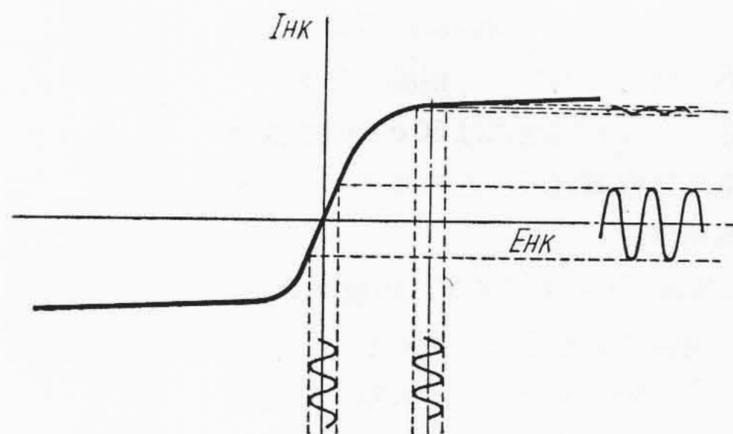


第9図 ヒータバイアス電圧の変化に伴うハム雑音出力波形の変化の一例

レベルが低下した試料3本を選びバイアス電圧がハム雑音レベルに及ぼす効果を調べた。結果を第6図に示す。わずか数ボルトのバイアス電圧の印加によりハム雑音レベルは相当改善される。ヒータが正になるような極性のバイアス電圧 (+ E_{HK}) を印加すると数ボルト付近にハム雑音出力レベルの極小点がある。ヒータ



第10図 ヒータバイアス電圧を変化させたときハム雑音レベルが示す履歴現象の一例



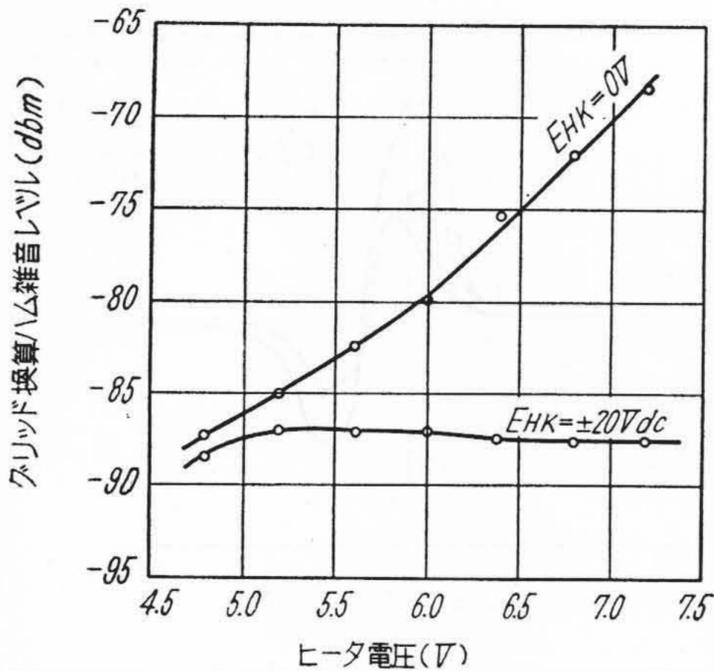
第11図 直流ヒータバイアスによつてハム雑音出力が減少することの説明の一例

負(- E_{HK})ではこの極小はみられない。極小点を生ずるようなバイアス電圧の値は試料ごとにかなり差があり、バイアス電圧をこの値に一致させてハム抑圧の効果を最大限に発揮させるのは実際上かなり困難で、むしろ10V程度以上のバイアス電圧を印加した方が安定した効果が期待できる。

ヒータバイアス電圧を印加したときのハム雑音レベルとバイアス0のときのその相関を調べた結果を第7図に示す。両者の間にはまったく相関が認められない。またバイアス電圧の値が+10Vのときと-10Vのときのハム雑音レベルの相関を調べた結果が第8図で、よい相関がある。ハム抑圧効果に関するかぎりヒータバイアス電圧の極性は正負いずれでもよく、10V程度以上の大きさが必要である。

4.3.2 ヒータバイアス電圧の値とハム雑音出力波形

ヒータ直流バイアスの値を連続的に変えると、ハム雑音出力波形は非常に複雑な変化を示す。特に正極性のバイアス電圧を印加した場合の経過は複雑である。その一例を第9図に示す。ヒータバイアス電圧を印加するとハム出力電圧が減少するが、第9図は常にブラ



第12図 ヒータ電圧(温度)がハム雑音レベルに及ぼす効果

ウン管面で同一振幅になるよう増幅器の利得を調整して観測したものである。なお同図には50 c/sの正弦波電圧(電源電圧)とのリサージュ図形を併記した。

4.3.3 ヒータバイアスの履歴効果

実験によるとヒータバイアス電圧の値を変化させるとハム雑音出力レベルには履歴現象が認められ、それも負のヒータバイアスの場合に特に顕著であつた。一例を第10図に示す。ヒータバイアス電圧を正の範囲に限ればどのように変化させても履歴現象は認められなかつた。

4.3.4 直流ヒータバイアスによるハム軽減の機構について

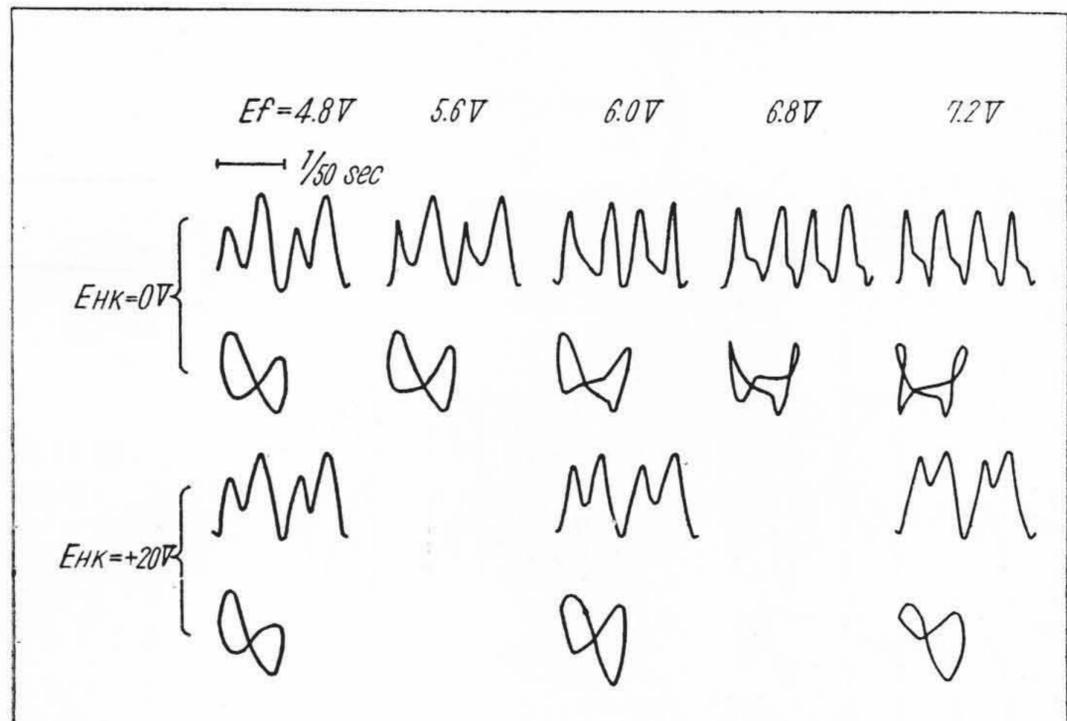
従来直流ヒータバイアスの印加によつてハム雑音出力が減少することの説明として第11図のように E_{HK} - I_{HK} 特性の傾斜(インクレメンタル抵抗)の変化が理由とされているが、わずか3~4Vのバイアス値でハム出力の減り方が飽和すること、ハム出力の極小点があることなどから判断すると上記以上に複雑な機構が存在するようである。 E_{HK} - I_{HK} 特性そのものも一定不変ではなく、測定方法や過去の履歴効果などで変化するので第11図のような説明はかなり実情から離れていると思われる。この問題は I_{HK} ハムの本質に触れ

るもので引続き検討を要する。

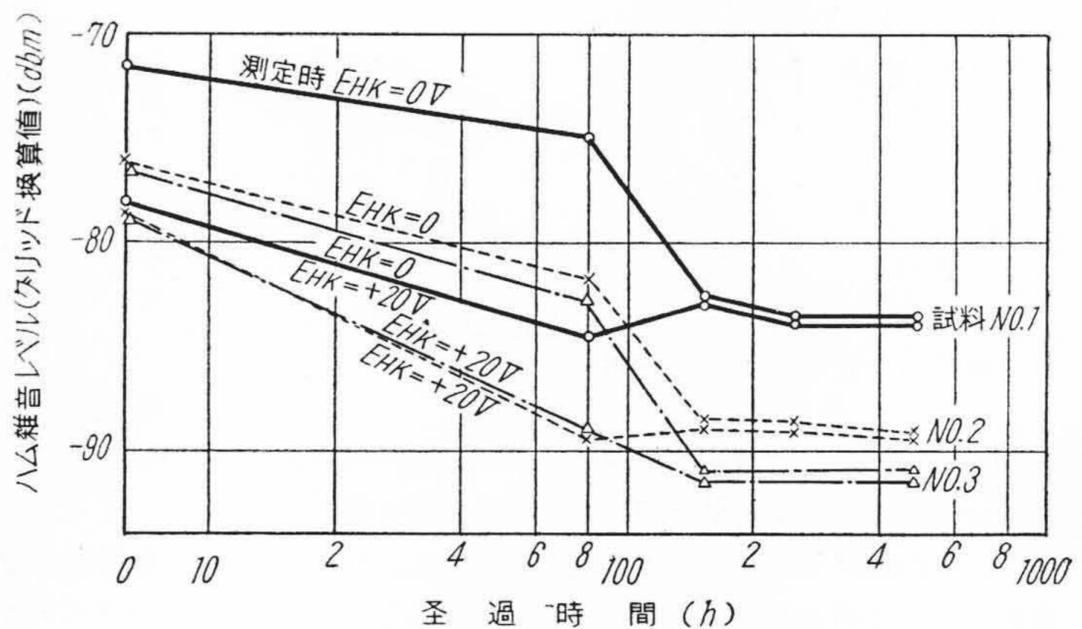
4.4 ヒータ電圧(温度)の効果

ヒータ電圧を変えたときのハム雑音出力の変化を第12図に示す。試料による差はあまりない。ヒータバイアス電圧を印加した状態でのハム雑音レベルはヒータ温度にはほとんど左右されない。すなわちヒータバイアス電圧印加時になお残るハム雑音は普通のヒータカソード間漏洩以外に原因を求めなければならないようである(ほかの実験事実などから判断するとこれはマグネチックハムであろうと思われる)。

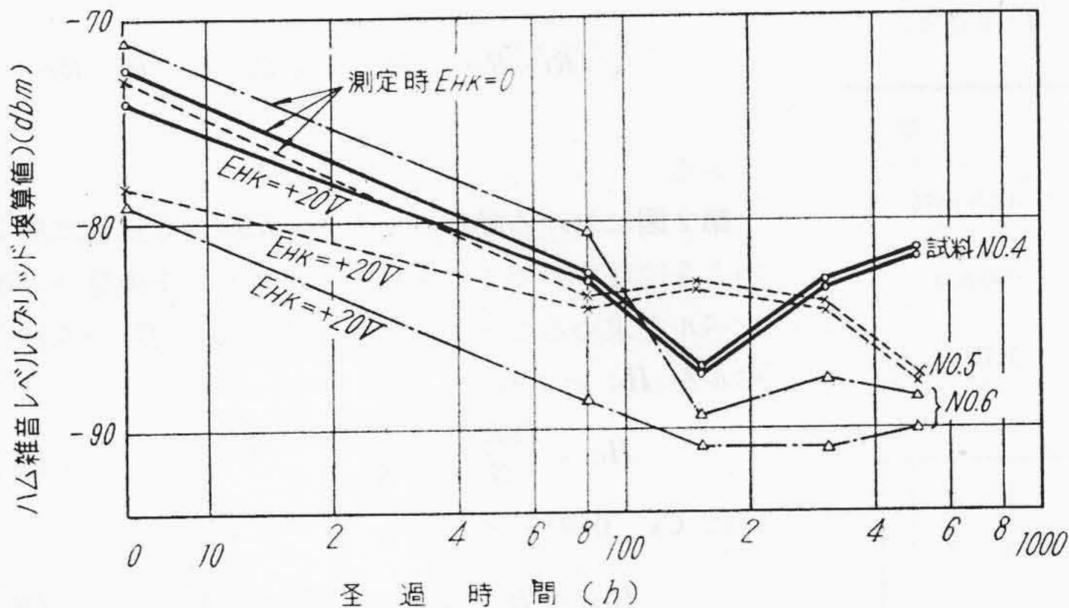
ヒータ電圧を変えたときのハム雑音出力波形を観測した結果を第13図に示す。第12図の結果から予想されるように、ヒータバイアス電圧印加時のハム出力波形にはほとんど変化が認められないが、ヒータバイアス電圧零の場合にはヒータ温度が高いほど鋭いピークが目立つようになる。なお同図には50 c/s正弦波(電源電圧)との



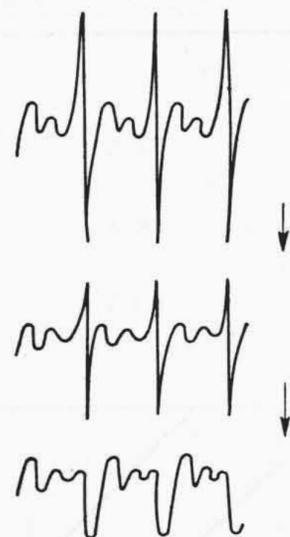
第13図 ヒータ電圧を変化したときのハム雑音出力波形の変化の一例(ハムバランス中点接地)



第14図 寿命経過に伴うハム雑音レベルの変化(寿命試験中 $E_{HK}=0$ の場合)



第15図 寿命経過に伴うハム雑音レベルの変化 (寿命試験中 $E_{HK}=100\text{ Vac}$ の場合)



第16図 過渡ハム雑音の出力波形の一例

リサージュ図形を併記した。

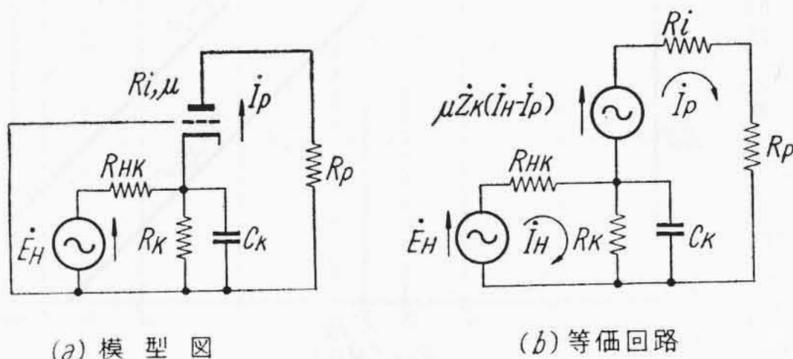
4.5 寿命経過に伴うハム雑音レベルの変化

寿命経過に伴いハム雑音レベルがどう変化するかははなはだ興味のある問題である。試料を2組に分け、一方はヒータバイアス電圧を零にし、他方は交流 100 V の E_{HK} を印加して寿命試験を行った。その場合陽極電流は流してある。比較的寿命初期の数百時間までの経過をまとめると第14, 15図のようになる。これで判明することをまとめると次のようになる。

- (1) 寿命試験中 E_{HK} が印加されていなくてもハム雑音レベルは最初の約100時間ほどで10 db 近く減少しそれ以後はほぼ一定のまま経過する。
- (2) 寿命試験中 E_{HK} を印加した場合と、印加しない場合とでは判然とした差は認められない。
- (3) 寿命試験時に直流の E_{HK} を印加した場合の経過は上記とはまた異なつたものになることが予想される。今後の検討にまちたい。
- (4) この結果は適当なエージングを行うことにより製品のハム雑音レベルをかなり改善できる場合のあることを示すものである。
- (5) 非常に長時間 (たとえば数千時間かそれ以上) 経過すると、 I_{HK} ハム雑音はふたたび増加していく場合がある。

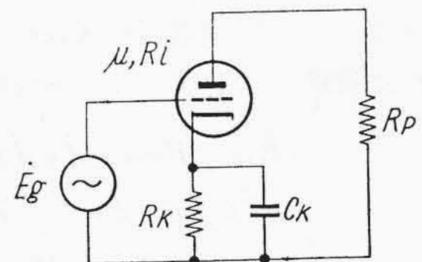
4.6 過渡ハム雑音

供試管の動作条件を急変すると、その瞬間一時的にハム雑音出力が非常に大きくなつてから徐々に減少して一定値に落ち着くという現象の見られる場合がある。たとえばヒータに負のバイアス電圧を印加しておいて急に0バイアスにすると (正バイアス電圧を急に0にしてもこの現象は見られない) とか、ヒータを直流で点火して熱的には十分定常状態に達してから急に交流点火に切り替えたときなどである。そのときのハム雑音出力波形の変



第17図 I_{HK} ハム雑音発生経過を示す模型図

化は一般に第16図のとおりで、過渡ハムの波形は定常状態の波形と相似ではない。波形中鋭いピークの部分が特に激しく変動している。過渡ハムの減少の時定数はほぼ数秒の桁である。この現象はヒータとカソードの間の導電のメカニズムに直接関係するものと考えられる。



第18図 陰極抵抗による自己偏倚を利用した増幅回路

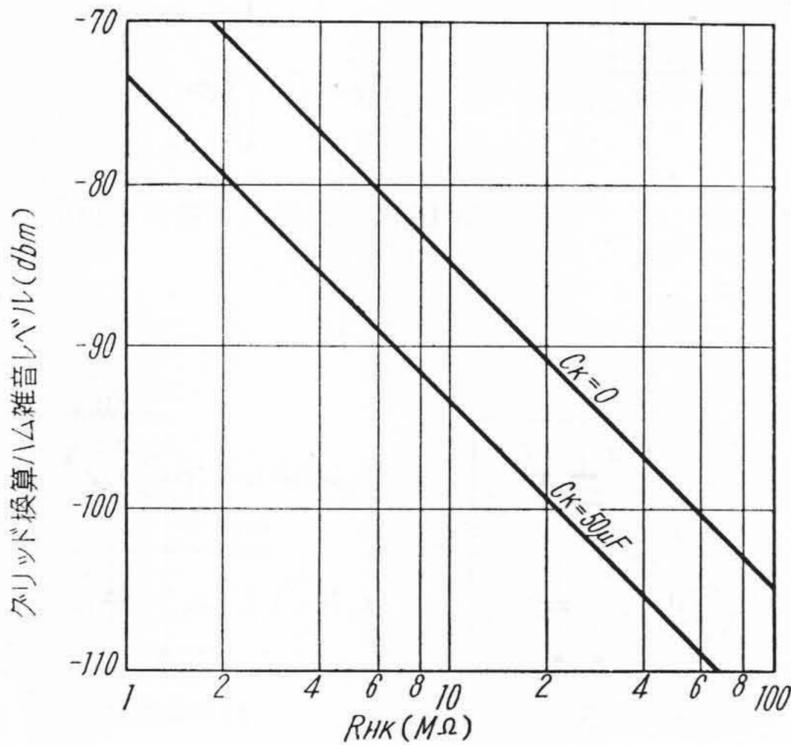
5. I_{HK} ハム雑音に関する若干の考察

グリッドへの誘導がまつたくない場合の I_{HK} ハム雑音の出力レベルを計算し、実験結果とよく一致することを確認し H-5799 のハム雑音がヒータカソード間漏洩電流によるものであることの裏づけを得た。

まず第17図(a) のような模型を考える。もちろん実際には R_{HK} は非直線素子なのであるが、それでは取り扱いが困難なので、一種の等価抵抗のようなものを想定してそれを R_{HK} で代表する。第17図(b) の等価回路によつて次の式 (1) がたてられる。この際厳密にはヒータカソード間のインピーダンスは R_{HK} のほかにヒ-

第 2 表 第 2 図の回路での H-5799 の動作点とその点における 3 定数の値

動作点		3 定数	
E_b	170 V	G_m	13.5 m $\bar{\sigma}$
E_{c2}	190 V	R_i	130 k Ω
E_{c1}	-1.4 V	μ	1,750



第 19 図ヒータカソード間の絶縁抵抗と I_{HK} ハム雑音レベルの関係 (計算値)

タカソード間静電容量 C_{HK} を考える必要があるが、これは省略してもさしつかえない。

$$\begin{cases} \dot{E}_H = (R_{HK} + \dot{Z}_K)\dot{I}_H - \dot{Z}_K\dot{I}_P \\ \mu\dot{Z}_K(\dot{I}_H - \dot{I}_P) = -\dot{Z}_K\dot{I}_H \\ \quad + (R_i + R_P + \dot{Z}_K)\dot{I}_P \end{cases} \dots\dots\dots (1)$$

ここに \dot{Z}_K は R_K と C_K を並列に接続したもののインピーダンスである。

この式を解けば \dot{I}_P が求められる。ハム雑音出力は $I_P R_P$ であり、グリッド換算値は、これを第 18 図の回路の利得で除して得られる。第 18 図の回路の利得を G とし、特に $C_K=0$ の場合の利得を G_0 とすると $1 + \mu \doteq \mu$ として

$$G = \frac{\mu R_P \sqrt{1 + \omega^2 C_K^2 R_K^2}}{\sqrt{(\mu R_K + R_P + R_i)^2 + \omega^2 C_K^2 R_K^2 (R_P + R_i)^2}} \dots\dots\dots (2)$$

$$G_0 \doteq [G]_{C_K=0} = \frac{\mu R_P}{\mu R_K + R_P + R_i} \dots\dots\dots (3)$$

となる。また $R_K + R_{HK} \doteq R_{HK}$ であることを考慮して

$$I_P = |\dot{I}_P| \doteq E_H \times \frac{\mu R_K}{R_{HK}}$$

$$\times \frac{1}{\sqrt{(R_i + R_P + \mu R_K)^2 + \omega^2 C_K^2 R_K^2 (R_i + R_P)^2}} \dots\dots\dots (4)$$

である。

第 2 図における動作点での H-5799 の 3 定数は第 2 表のようになるのでこれを利用してグリッド換算ハム雑音レベルを求めることができる。グリッド換算ハム雑音レベルを H_G とすると

$$H_G = \frac{I_P R_P}{G} = \frac{0.17}{R_{HK}} \text{ (V)} \dots\dots\dots (5)$$

特に $C_K=0$ のときには

$$H_{G_0} \doteq [H_G]_{C_K=0} = \frac{0.45}{R_{HK}} \text{ (V)} \dots\dots\dots (6)$$

となる。ただし (5), (6) 両式において R_{HK} は k Ω 単位で表わした値であり、また $E_H=6$ V としてある。

R_{HK} の値を仮定して H_G または H_{G_0} を求め 0.775 V を 0 dbm として dbm 単位で表わすと第 19 図のようになる。第 3 図あるいは第 1 表の結果と比較して R_{HK} は数メガオームの桁になるがこの値は 4.2 で述べたヒータカソード間の交流漏洩電流の値から求めたものとほぼ一致する。また第 19 図または (5), (6) 式から $C_K=50 \mu F$ を付加するとグリッド換算ハムレベルが約 8.5 db 減少することがわかるが、これは第 1 表で No. 5, 10, 11, 18 の 4 本を除いた残りの試料での平均値が 8.5 db の減少を示しているのとよく一致する。

6. 結 言

いわゆる I_{HK} ハムの諸性質について検討した結果を以上に報告した。 I_{HK} ハムはきわめて複雑な現象であつて、その機構の詳細はいまもつて不明である。この報告に記したような諸性質がヒータカソード間に起つている現象とどのように結びつくかはこの問題の解明に大きな意味をもつもので今後に残された問題である。

終りにあたりいろいろ有益な御助言をいただいた東京大学生産技術研究所星合教授に厚く御礼申上げる。またデータの測定には日立製作所茂原工場検査課岸野君の協力を得たことを記して謝意を表す。

参 考 文 献

- (1) W. Graffunder: Telefunken-Röhre 12 (Apr. 1938) (邦文外国雑誌 67, 765 昭 13-10)
- (2) Radiotron Designer's Handbook 538, 784, 1196 (1952 RCA)
- (3) A. F. Dickerson: Electronics 21-12, 112 (Dec. 1948)
- (4) 北野進: オーディオ回路の基礎 I, 78 (昭 30 共立出版)
- (5) The Advisory Group on Electron Tubes: Tele-Tech., 15, 56 (Jan. 1956)
- (6) I. Zakarias: Electronics 21-11, 170 (Nov. 1948)