

ランダム結合回路

—トランジスターを用いた回路—

池田 長康, 北村 岩雄, 山崎登志成
高橋 隆一, 関根 佳宏

1. 序 論

電力用避雷器はシリコンカーバイドや酸化亜鉛の微粒子を焼結したもので、非線形の抵抗を示す特性に基づいている。この非線形特性は現象論としては多くの理論が提案されているが、本質的にはいまだ不明なところが多い。しかしながら、避雷器として、たとえば直径10cm, 厚さ5cm程度の円柱状のものを考えたとしても、焼結した微粒子の数は 10^{11} 個のオーダーとなり、莫大な数の微粒子とその周りの微粒子との接触、接合部からなる巨大なランダムに結合された電気回路になっている。しかも、シリコンカーバイドや酸化亜鉛は半導体特性をもちpn結合やnp結合に似た状況にあると考えられる。従って、この非線形特性は半導体特性をもつ巨大なランダム結合回路に原因しているものと予想される。

我々はこのような観点から、半導体特性をもちpn結合やnp結合からなるトランジスターを多数ランダムに結合した回路を用いて電力用避雷器の非線形特性をシミュレーションできないか検討をした。

2. 焼結避雷器のモデリング

焼結避雷器は図1に模式的に示すようにシリコンカーバイドや酸化亜鉛の微粒子をガラス系の結合剤で焼き固めたもので、特性は微粒子の大きさ、結合剤の量、微粒子同志の接触の仕方などにより微妙に違っている。しかも、焼結した微粒子とその周りの微粒子との接触、接合部では転移や格子欠陥があり、不純物も偏析しているものと考えられる。しかも、1粒子は周りの粒子と数点で接触、接合しており、pn結合やnp結合を数個持っている。従って、焼結避雷器の等価回路としてランダム結合した巨大な回路を形成していると考えられる。

焼結をこのように考えると、トランジスターをランダムに結合した回路を用いてこの非線形特性をシミュレーションできないかということである。

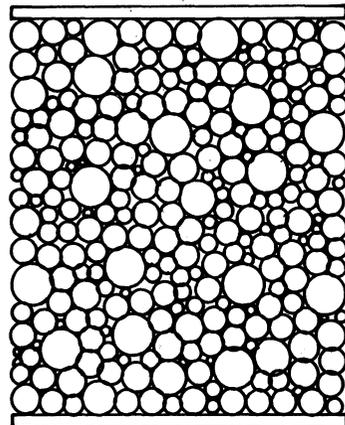


図1 焼結避雷器の模式図

3. トランジスタのランダム結合方法

トランジスタの種類とそのトランジスタのそれぞれの端子を結合する方法は人為的になされては結果が人為的なものになる恐れがある。ここではラムダネスを保証するため、すべて乱数により決めることとした。用いた乱数表は泉信一ら編、共立数学公式(1969)である。

我々は乱数表を用いて、以下に述べる3通りの方法でランダム結合の等価回路を形成した。

1) 3列平面の場合、

a) 乱数表の始め3列はランダム結合の等価回路それぞれの列のトランジスタの種類を決める。数字の01~49まではnpn型、50~99まではpnp型とする。隣との接続は乱数表の4列から7列まででトランジスタ結合回路の1列と2列、2列と3列の接続を示す。乱数表の数字01~33まではベース端子34~66まではコレクター端子、67~99まではエミッター端子をそれぞれ表すものとする。前段との接続は乱数表の8列から13列までで決める。乱数表の8列と9列はトランジスタ結合回路の1列目の接続、10列と11列は2列目の接続、12列と13列は3列目の接続の端子を決める。端子の決め方は隣との接続の場合と同じである。

図2にこの場合について、乱数表の数列とその意味を示す。また、この場合の3列10段平面ランダム接続の結線図を図3に示す。

この場合、図3から分かるように、トランジスタの端子で相手のない端子が多く現れる。このため、結合方法を改めた。

3列の場合

	トランジスタの種類			横との接続			前段との接続		
	1列	2列	3列	1列-2列	2列-3列	1列	2列	3列	
						前一現	前一現	前一現	
1 step	0 3 N	4 7 N	4 3 N	7 3 8 6 E-E	3 6 9 6 C-E	4 4 3 6 C-C	6 1 4 6 C-C	9 8 6 3 E-C	
2 step	9 7 P	7 4 P	2 4 N	6 7 6 2 E-C	4 2 8 1 C-E	1 4 5 7 B-C	2 0 4 2 B-C	5 3 3 2 C-B	
3 step	1 6 N	7 6 P	6 2 P	2 7 6 6 B-C	5 6 5 0 C-C	2 6 7 1 B-E	0 7 3 2 B-B	9 0 7 9 E-E	
.....									
N : npn	(0 ~ 4 9)			B : ベース	(0 ~ 3 3)				
P : npn	(5 0 ~ 9 9)			C : コレクター	(3 4 ~ 6 6)				
				E : エミッター	(6 7 ~ 9 9)				

図2 乱数表の数列とその意味 - 1) a) の場合 -

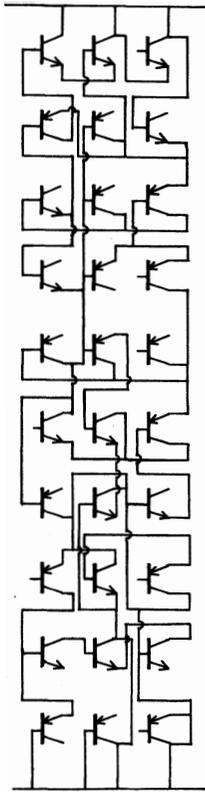


図3 3列10段平面ランダム
(a)接続の結線図

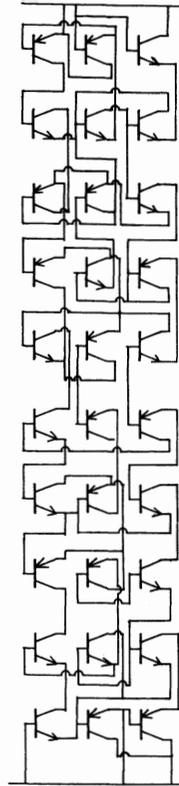


図4 3列10段平面ランダム
(b)接続の結線図

- b) トランジスタの種類を決める方法は a) と同じである。前段および後段との接続は乱数表の 4 列から 9 列の数字で決める。前段との接続端子はトランジスタ結合回路の 1 列目は 4 列, 2 列目は 6 列, 3 列目は 8 列の数字でそれぞれ決める。後段との接続端子は 5 列, 7 列, 9 列の数字でそれぞれ決めるが, 前段との接続に既に使った端子を除き, エミッター端子, コレクター端子, ベース端子 (この中のいずれかの 1 個の端子は前段との接続に使い, 使えない端子である) の順序で 0 ~ 49 と 50 ~ 99 の値でどちらかの端子を決める。隣との接続はそれぞれ残っている端子で行う。1 列目の残った端子は 10 列の数字で決められた 2 列目の端子と接続する。同様に, 2 列目の残った端子は 11 列の数字で決められた端子と接続する。ただし, この数字が偶数であれば, 左の 1 列目の端子を, 奇数であれば, 右の 3 列目の端子を選ぶことにする。3 列目の端子は 12 列の数字で決められた左の 2 列目の端子と接続する。乱数表の数字で選ぶ端子は a) の場合と同じである。

この場合はトランジスタの 3 端子は必ず結線され, 前段と後段との間にはトランジスタが必ず入ることになる。この場合の 3 列 10 段平面ランダム接続の結線図を図 4 に示す。

2) 3 列循環の場合

この場合も 1) b) の場合と基本的には同じであるが, 隣との接続において 1 列目の接続は 10 列から 12 列までの数字で 2 列目の端子, 3 列目の端子, 1 列目の端子である相手の接続端子をそれぞれ決める。前段との接続や端子の決め方は 1) b) の場合と同じである。

4. ランダム結合トランジスタ回路の電圧・電流特性

各段について電圧・電流特性を測定した。図5は1) a) の場合であるが、数mA以下では非直線的な特性を示すが、トランジスタの特性から数mA以上ではほぼ直線的な特性を示している。しかも、1段当たりの電圧の増加は必ずしも一定してはいない。

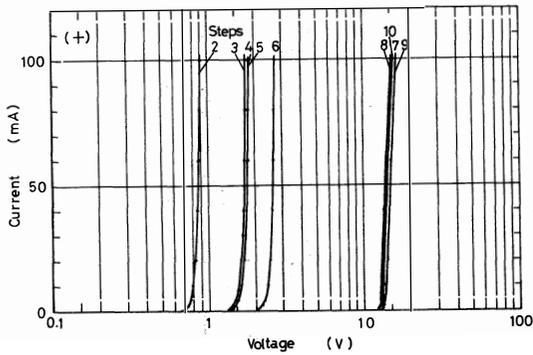


図5 ランダム結合トランジスタ回路の電圧・電流特性 (10段まで)

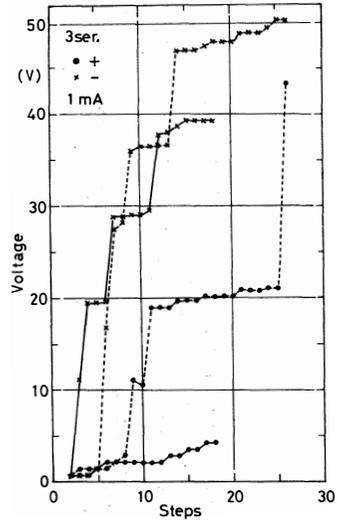


図6 電圧増加の段数依存性 - 1) a) の場合 -

図6は1) a) の場合で電流を1mAに固定した場合の段数による電圧増加を示す。ランダム結合トランジスタ回路を2度組み上げ測定を行った。電圧極性が正の場合は18段および26段で電流がoffになった。また、電圧極性が負の場合でも18段および26段で電流が流れなくなった。

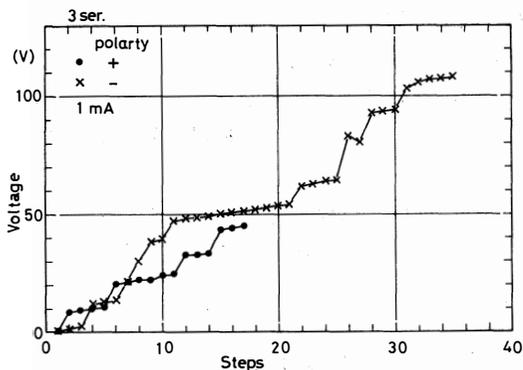


図7 電圧増加の段数依存性 - 1) b) の場合 -

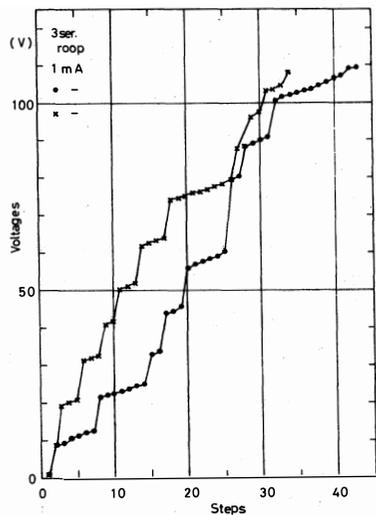


図8 電圧増加の段数依存性 - 2) の場合 -

図7は1) b) の場合で、同様に電流を1mAに固定した場合の段数による増加を示すが、この時も電圧極性が正の場合は17段で電流が off の状態になり、電圧極性が負の場合も35段で電流が流れなくなった。

図8は3列循環接続の2) の場合で、同様に電流を1mAに固定した場合の段数による電圧増加を示す。この時は電圧極性が正の場合、43段で電流が off の状態になり、電圧極性が負の場合は34段で電流が流れなくなった。この場合3列平面接続の場合に比べ、off の状態になるまでの段数が多くなる。この場合の電圧・電流特性は図9に示すように、やはり数10 μ A以下では非直線的な特性を示す。しかし、トランジスターの特性から数mA以上ではほぼ直線的な特性を示している。

5. ランダム結合回路の解析

このランダム結合回路において段数に対する電圧特性が何故ジャンプ特性を示すかを検討してみる。これは1個のトランジスターの端子の電圧・電流特性に関係していると考えられ、まず、これらの特性を調べる。

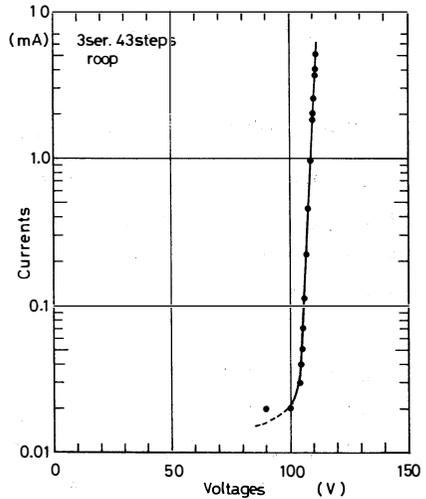


図9 ランダム結合回路の電圧・電流特性-2) の場合一

5.1 2端子素子としてのトランジスター回路の電圧・電流特性

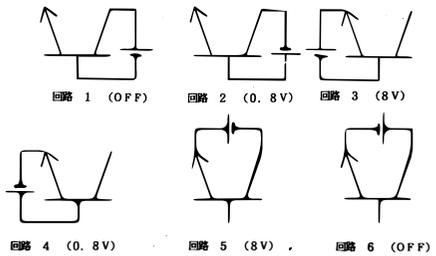
1個のトランジスターは2個の接合(ジャンクション)を持ち、エミッターとコレクターの間に順方向電圧が印加されて、エミッターとベース間接合に順方向電流が流れれば、ベースとコレクター間接合が逆方向であっても電流が流れる。

しかしながら、このランダム結合回路ではトランジスターを2端子の素子として扱っているため、必ずしもトランジスターの電流増幅作用は期待されない。

nnp型とpnp型の両トランジスターの端子について、それぞれ2端子を選ぶ選びかたは図10に示すように、12通りある。実際に用いたトランジスターはそれぞれSC1815と2SA1015であるが、これらを電流の導通状態で分類すると次の3通りになる。

- 1) エミッターとベース間接合およびベースコレクター間接合が順方向電圧の場合、この場合は0.7~0.8Vで電流が流れる。

nnpトランジスター



pnpトランジスター

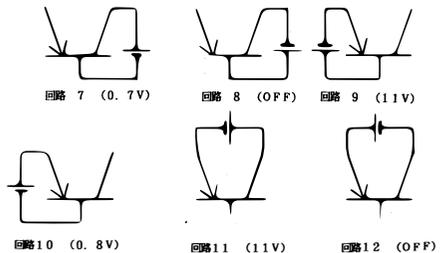


図10 両トランジスター2端子の選択方法

- 2) エミッターとベース間接合が逆方向電圧の場合、この場合はエミッターとベース間接合のツエナー電圧以上になれば流れる。
- 3) ベースとコレクター間接合が逆方向電圧の場合、この場合は十分な逆耐圧のため、導通状態にならない。

これら3通りの導通状態が起こる確率はすべて $1/3$ ($4/12$) であることが分かる。

5.2 ランダム結合トランジスタ回路の電圧・電流特性の解析

まず、電流がカットオフになるまでの段数の確率を調べる。ある段でカットオフの状態になることはその段で全くバイパス回路が無くなることを意味する。従って、あるトランジスタの隣や前後の接続の仕方に依存する。それ故、カットオフになるまでの段数の確率を調べるには、2通りのモデルが考えられる。

1) 並列モデルの場合

前段で1個でもトランジスタが導通状態であれば、次の段のすべてのトランジスタに導通状態で接続されていると考える場合である。3列の場合は

1段でカットオフになる確率 Pr_1 は

$$Pr_1 = 1/3 \cdot 1/3 \cdot 1/3 = 1/27$$

である。2段でカットオフになる確率 Pr_2 は

$$Pr_2 = (1 - 1/27) (1/3)^3$$

である。同様に、 n 段でカットオフになる確率 Pr_n は

$$Pr_n = (1 - 1/27)^{n-1} (1/3)^3$$

である。従って、少なくとも、 n 段目まででカットオフになる確率 Pr^p は

$$\begin{aligned} Pr^p &= Pr_1 + Pr_2 + Pr_3 + \dots + Pr_n \\ &= (1/3)^3 \{1 + (26/27) + (26/27)^2 + \dots \\ &\quad \dots + (26/27)^{n-1}\} \\ &= 1 - (26/27)^n \end{aligned}$$

となる。もし、 n が無限大となれば、必ずカットオフとなる。これを図11において実線で示す。

2) 直列モデルの場合

このモデルでは隣の列とは無関係に電流が流れると考える。このため、ある列でカットオフとな

ればもう回復は無いと考える。従って、各列は互いに独立である。それ故、1列が少なくともn段目まででカットオフになる確率 Pr^1 は

$$Pr^1 = (1/3) \{1 + (1/3) + (1/3)^2 + \dots + (1/3)^{n-1}\}$$

$$= 1 - (2/3)^n$$

となり、3列が少なくともn段目まででカットオフになる確率 Pr^s は、各列は互いに独立であるから、

$$Pr^s = \{1 - (2/3)^n\}^3$$

となる。これを図11において点線で示す。当然であるが、少ない段数でカットオフになることが分かる。

これから、このようなランダム結合トランジスタ回路のカットオフになる段数が20段前後に発生することが予測される。これは図6、7および8のカットオフになった段数とよい一致を示す。

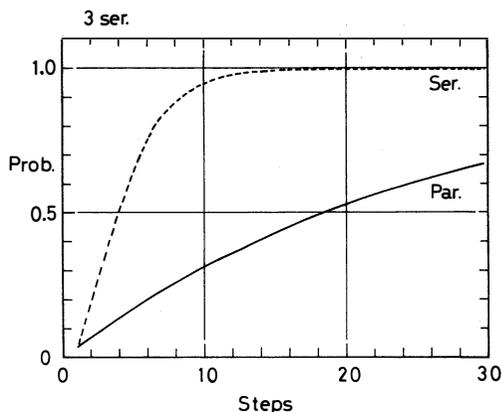


図11 カットオフになる段数の確率

5.3 非線形特性

このようなランダムに結合したトランジスタ回路からは電圧・電流特性の明確な非線形特性が得られ無かった。しかし、図12に点線で示すように、通常の抵抗は数 μA 程度の電流でも直線的な特性を示すのに対し、このランダム結合トランジスタ回路では非線形特性(実線)を示した。同図には焼結したシリコンカーバイドの実験的に求めた特性をも同時に一点鎖線で示す。

このような結果は用いたトランジスタ特性に依存しているものと推測される。

6. 結 論

シリコンカーバイドや酸化亜鉛の微粒子を焼結した電力用避雷器の非線形特性を半導体のもつ巨大なランダム結合回路に原因しているものと予想し、トランジスタを多数ランダムに結合した回路を用いてシミュレーションを行って見た。その結果は

1) 数10個のトランジスタのランダム結合では明確

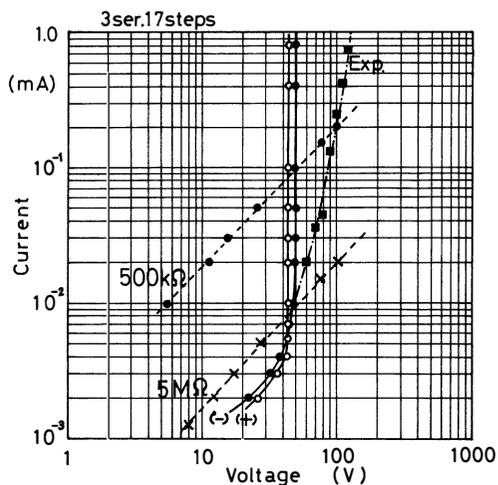


図12 実験との比較

- な非線形特性は得られ無かった。
- 2) しかしながら、避雷器の非線形特性は等価的にトランジスターのランダム結合回路で表せる可能性はある。

今回のトランジスターを用いたシミュレーションでは期待したような非線形特性はえられなかったが、今後、巨大なランダム結合回路についての有意義な知見を得るように、統計的にアプローチしたいと考えている。

参考文献

- 1) F. A. Schwertz et al. J. Appl. Phys. Vol. 24 (8)1017, 1953

Random connected circuit

-A case of simulation used transistors-

Nagayasu Ikeda, Iwao Kitamura, Toshinari Yamazaki,
Takakazu Takahashi, Yoshihiro Sekine.

An arrester for electric power system which protects the surge voltage due to lightning discharge etc. has a nonlinear characteristics. There are many phenomenological theories about it, but not fundamental ones. The sintered arrester consists of huge numbers of fine semi-conducting particles. One particle of them contacts with the neighbour particles at one or few points. It results in huge numbers of random connected circuit of semi-conducting particles. The nonlinear characteristics is expected to arise from such huge numbers of random connections. A simulation of random connected circuit with many transistors is carried out. Its circuit is connected by following severe rules controlled with random numbers. It is found from preliminary simulations that random connected circuits with transistors result in cut off states in any stage and the stages agree with the results from the analysis of probability theory. A certain result, therefore, can not yet get for the nonlinear characteristics.

[英文和訳]

ランダム結合回路

—トランジスターを用いた回路—

池田 長康, 北村 岩雄, 山崎登志成,
高橋 隆一, 関根 佳宏

雷放電などによるサージ電圧を防止する電力用避雷器は非線形特性をもつ。この特性に関して現象論的な理論は多くあるが、基本的なものは無い。焼結避雷器は莫大な数の半導体微粒子からなっており、それらの1粒子は周りの粒子と一点または数点で接触、結合している。その結果として、巨大にランダム結合した半導体微粒子の回路を形成している。非線形特性はこの巨大なランダム結合から起こるものと推測される。それ故、トランジスターをランダムに結合した回路を用いてこのシュミレーションを行った。これから、トランジスターを用いたランダム結合回路ではどこかの段で必ずカットオフになり、しかも、この段数は確率理論の解折からの結果と一致することが分かった。しかしながら、非線形特性を示す確かな結果はまだ得られなかった。