

高速しゅう動接点において生じる無線雑音の レベル推定式と電流依存性

正 員 藤原 修† 准 員 上林 真司† 正 員 雨宮 好文†

Level Estimation and Current Dependence of Radio Noise Caused by High Speed Sliding Contact

Osamu FUJIWARA†, Regular Member, Shinji UEBAYASHI†,
Associate Member and Yoshifumi AMEMIYA†, Regular Member

あらまし 高速しゅう動接点において生じる無線雑音の電流依存性は、電気車でそのそれに類似した特性をもつ。本論文は、接点開放電圧が大で接点部が完全には開放されない状態でのしゅう動接点において生じる雑音電流レベルを測定器の応答との関係において明らかにした。測定される雑音レベルはアークの開始あるいは消滅に伴う電流波形と測定器に対する雑音の衝撃回数（測定器の帯域幅で決まる応答継続時間内における雑音到来数）から決定し、接点装置に固有な平均のバウンス間隔（アークの開始から消滅まで、又、その逆の時間間隔）とアーク電圧だけ実測すれば推定できる。雑音レベルの電流依存性については、接点のバウンス間隔が接点電流の増大と共に延びることにより測定器に対する雑音の衝撃回数が減少し、電流が大の程雑音レベルは低下するという特性が得られる。

1. ま え が き

新幹線電車の走行に伴って発生する無線雑音については、沿線テレビジョン障害の軽減対策の面から種々の研究がなされている^{(1), (2)}。この種の雑音は、集電部の高速しゅう動による不規則な開閉とそれに伴う放電現象が複雑に関与して生じる。

一般に、電気車の雑音発生機構は集電部を一種の電気接点（しゅう動を伴わない開閉接点）とみなした研究⁽³⁾より大略解明されてはいるが、雑音レベルの電流依存性については電気接点のモデルだけでは十分に説明できず⁽⁴⁾、それ故定量的に論じた例をみない。

電気車から発生する雑音の電流依存性に関しては新幹線と在来線とは大きく異なることが知られている。すなわち、新幹線では力行時（集電電流が大）の雑音レベルはだ行時（集電電流が小）のそれより低く、在

来線ではこれと逆である⁽⁵⁾。

電気接点から発生する雑音に関しては、開閉器、継電器などによる誘導障害の立場から雑音レベルの電流依存性^{(6), (7)}、雑音レベル推定法⁽⁸⁾などの報告が既になされているが、すべてしゅう動を伴わない開閉接点を対象としたものであった。

筆者らは、高速しゅう動接点について実験を行い、雑音発生は上記開閉接点におけるのと異なった機構で行われることを知った。又、接点開放電圧が大きい場合には電流を大にする程雑音レベルは低下していき、接点開放電圧が小さい場合にはこれと逆の傾向を示すという結果も得た。前者の電流依存性は電気車でそのそれに類似した特性である。

本論文においては、電気車の集電部のモデルとしたしゅう動接点につき、接点開放電圧が大きい場合に測定される雑音のレベル推定式を導出し、前記の電流依存性もこれによって誘導し得ることを示す。

接点開放電圧が小さい場合には雑音発生機構は全く異なるので、その報告は別の機会に譲ることとする。

†名古屋大学工学部電気学科、名古屋市
Faculty of Engineering, Nagoya University,
Nagoya-shi, 464 Japan
論文番号：昭 57-論124[C-20]

2. 理 論

2.1 しゅう動接点回路モデルと等価回路

図1は電気車の集電部位のモデルであるしゅう動接点回路を示す。接点部 (Sliding contact) が集電部に 対応し、給電線 (Feeder line) が架線に対応する。 L_0 は集電部位の浮遊インダクタンスであり、 C_0 は 浮遊容量である。 Z_0 は給電線の特性インピーダンス である。 I_0 は給電線から接点部に供給される平均直 流電流であり、集電電流に対応する。

しゅう動接点から発生する無線雑音は接点部の高速 しゅう動による不規則な開閉とそれに伴う放電現象に 基づくが、結局は接点部において生じる高周波電流 (雑音電流) に起因する。それ故、本論文ではこの雑 音電流 i (図1参照) に注目する。又、接点開放電圧

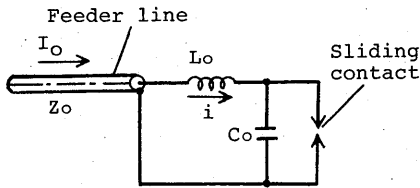


図1 しゅう動接点回路のモデル
Fig.1 - Model of a sliding contact circuit.

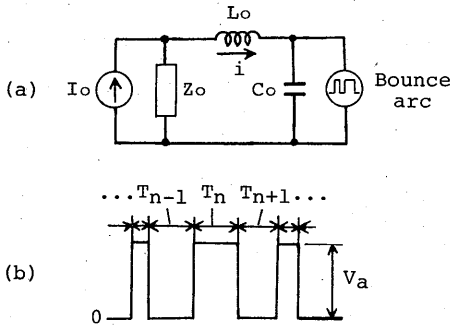


図2 しゅう動接点回路の雑音電流に 対する等価回路
Fig.2 - Equivalent circuit to calculate a noise current.

が大で、且つ接点部が大きくは跳躍しない場合を対象 とする。そのとき、接点間にはしゅう動に伴うアークの 開始消滅 (バウンスアーク) の状態が続き、接点部は 完全には開放されることはない。接点開放電圧が小さい 場合には、このことは成立せず、接点部が完全に開 放される状態も存在する。本論文においては、しゅう 動接点間にはバウンスアーク (Bounce arc) だけが生 じる場合を考える。図2(a)は図1の雑音電流 i に対す る等価回路を示す。バウンスアークは同図(b)に示すよ うな、波高値 V_a (アーク電圧) をもつ正のステップ 電圧と負のステップ電圧が交互に時間間隔 T_n で接点 間に加わったものとして置き換える。

2.2 測定される雑音レベル

本論文では、雑音測定器の入力となる無線周波雑音 を雑音入力と呼び、その測定値を雑音レベルと呼ぶこ とにする。

(1) 雑音測定器の応答

最初に、繰返し雑音入力に対する測定器の応答を 求める。図3は雑音測定器の基本構成を示す。測定器 の増幅器は狭帯域フィルタであり、中心周波数の周り に左右対称の振幅周波数特性をもつ。検波器 (Detector) はせん頭値検波方式のものを考える。す なわち、雑音レベルは狭帯域フィルタの出力包絡線の せん頭値として測定されるとする。

高周波増幅器 (Radio frequency amplifier) の中心 周波数を f_i 、中間周波増幅器 (Intermediate frequency amplifier) のそれを f_0 とし、混合器 (Mixer) は高 周波増幅器の出力を周波数 $f_0 - f_i$ だけ推移させるも のとする。そのとき、入力から検波器に至る全体の伝 達特性 $T(f)$ は中心周波数 f_0 の狭帯域フィルタ形の 振幅周波数特性をもつとしてよい。

孤立的な雑音入力 $f(t)$ のフーリエ変換を $F(f)$ とすれ ば、 $f(t)$ に対する中間周波数増幅器の出力 $h(t)$ は

$$h(t) = \int_{-\infty}^{\infty} F(f - f_0 + f_i) T(f) \cdot \exp(j2\pi f t) df \quad (1)$$

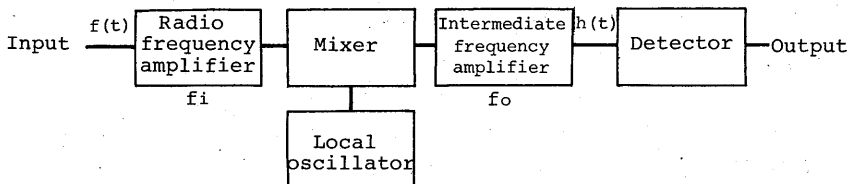


図3 雑音測定器の基本構成
Fig.3 - Simplified block diagram of a noise meter.

で与えられる。\$F(f)\$がフィルタの帯域幅の範囲で周波数に依存せず一定であるときには、出力 \$h(t)\$は式(1)より、

$$h(t) = 4 |F(f_i)| \int_0^\infty |T(f_0+f)| \cdot \cos[2\pi f t - \phi(f_0+f)] df \cdot \cos[2\pi f_0 t - \varphi(f_i)]$$

となる⁽⁹⁾。ここで \$\phi\$ は \$T(f)\$ の位相角であり、 \$\varphi\$ は \$F(f)\$ の位相角である。故に、出力の包絡線 \$A(t)\$ は

$$A(t) = 4 |F(f_i)| \int_0^\infty |T(f_0+f)| \cdot \cos[2\pi f t - \phi(f_0+f)] df \quad (2)$$

である。包絡線 \$A(t)\$ のせん頭値 \$A_p\$ は、 \$A(t)\$ のフーリエ変換を \$S(f)\$ とすれば

$$A_p = \int_{-\infty}^\infty S(f) df = \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty A(t) \cdot \exp(-j2\pi f' t) df' dt \quad (3)$$

で与えられる⁽¹⁰⁾。

\$T(f)\$ が周波数に対しガウス形の振幅特性と直線形位相特性をもち、 \$|T(f)| = \exp[-\pi(f-f_0)^2/B^2]\$、 \$\phi(f) = 2\pi(f-f_0)t_0\$ で与えられるとする。ここに、 \$B\$ は狭帯域フィルタのインパルス帯域幅(6dB垂下の帯域幅にはほぼ相当する)であり、 \$t_0\$ は応答の遅延時間である。そのとき、式(2)は

$$A(t) = 4 |F(f_i)| \int_0^\infty \exp[-\pi(f/B)^2] \cdot \cos[2\pi f(t-t_0)] df = 2B |F(f_i)| \exp[-\pi B^2(t-t_0)^2] \quad (4)$$

となる。

雑音入力 \$f(t)\$ が周期 \$T\$ で繰り返される場合には包絡線 \$A(t)\$ は

$$A(t) = 2B |F(f_i)| \cdot \sum_{n=-\infty}^\infty \exp\left[-\pi(BT)^2 \left(\frac{t-t_0}{T} - n\right)^2\right] \quad (5)$$

となる。故に、包絡線のせん頭値 \$A_p\$ は式(3)より

$$A_p = 2B |F(f_i)| \cdot \sum_{n=-\infty}^\infty \exp[-\pi(BT)^2 n^2] \quad (6)$$

となる。これが一定繰返し周期 \$T\$ をもつ雑音入力の周波数 \$f_i\$ において測定される雑音レベルである。

図4(a)は、繰返し周期 \$T\$ の入力に対して包絡線 \$A(t)\$ の時間 \$t\$ についての変化の様子を式(5)によって計

算して示したものである。縦軸は \$A(t)/2B|F(f_i)|\$、横軸は規格化時間 \$(t-t_0)/T\$ である。この波形のせん頭値を式(6)によって計算して示したものが同図(b)である。これらの図は \$BT\$ の大小に応じて包絡線のせん頭値が異なることを示す。例えば、帯域幅 \$B\$ が一定の場合に、雑音入力の繰返し周期 \$T\$ が大 (\$BT > 1\$) のときは包絡線のせん頭値は雑音の到来ごとに生じる。それ故、雑音レベルは \$BT\$ に依存せず孤立的な雑音入力の測定値(せん頭値)に一致する。雑音入力の繰返し周期 \$T\$ が小 (\$BT < 1\$) のときは、雑音の到来による測定器の応答波形が互いに重なり合い、雑音レベルは \$1/BT\$ に比例する。

\$1/BT\$ は測定器に固有な応答継続時間 \$1/B\$ における雑音の到来数に相当し、本論文ではこれを測定器に対する雑音入力の衝撃回数と名づける。

(2) しゅう動接点において生じる雑音のレベル

しゅう動接点において生じる雑音電流レベルも、バウンスアークに伴う過渡電流波形(その高周波成分が測定器への雑音入力となる)と測定器に対する雑音入

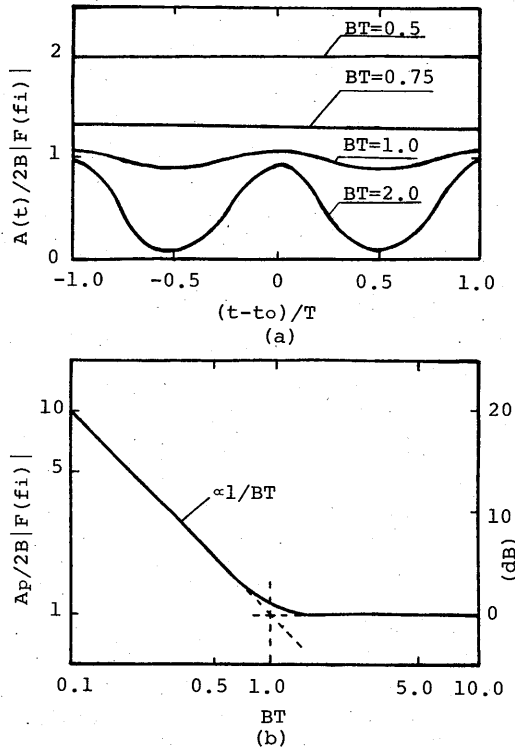


図4 狭帯域フィルタの出力包絡線(a)とせん頭値(b)

Fig.4 - Output envelope (a) and its peak value (b) of a narrow band pass filter.

力の衝撃回数から定まる。1回のアークの開始(図2(b)の波形の立上り)時ならびに消滅(同波形の立下り)時に生じる孤立的な雑音入力波形は、過渡電流波形が同じであるから同一である。この雑音入力がアークの開始から消滅まで(又、その逆)の時間間隔(以下、本論文ではバウンス間隔と名づける)をもって測定器を繰り返し衝撃した結果測定されるものが、しゅう動接点において生じる雑音のレベルである。

図2(a)の等価回路において、アーク開始時の過渡電流は接点間に波高値 V_a をもつステップ電圧が加わったものとして容易に求められ、そのフーリエ変換を $F(f)$ とするとき、

$$|F(f)| = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{f\sqrt{1+(f/f_R)^2}} \frac{V_a}{Z_0}$$

となる。ここに $f_R = Z_0 / 2\pi L_0$ である。

しゅう動に伴う平均のバウンス間隔を \bar{T} とするとき、雑音電流 i の周波数 f において測定される雑音レベル $G(f)$ は式(6)より、

$$G(f) = 2B |F(f)| \sum_{n=-\infty}^{\infty} \exp[-\pi(B\bar{T})^2 n^2] \quad (7)$$

で与えられる。

2.3 繰返しパルス雑音の測定例

図5は、繰返しパルス雑音のスペクトルアナライ

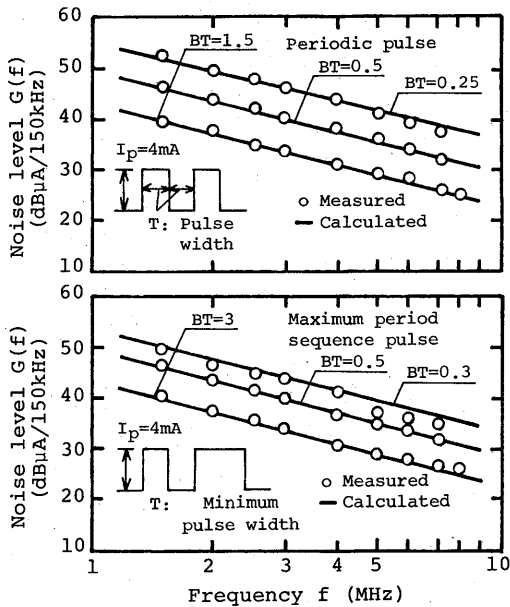


図5 繰返しパルス雑音の雑音レベル周波数スペクトル実測例
Fig.5 - Measurements of the frequency spectra of recurrent pulse noise levels.

ザ(せん頭値検波方式)による雑音レベルの周波数スペクトル実測例を示す。縦軸は帯域幅 $B = 150\text{kHz}$ (6dB 垂下) 当りの雑音レベル(実効値)であり、 $1\mu\text{A}$ を 0dB として表す。

パルス雑音としては、図中に示すように $2T$ の周期で繰返す方形パルス電流(Periodic pulse, パルス幅 T , Duty 50%)と $(2^5 - 1)T$ の周期で繰返す最大周期列の擬似ランダム方形パルス電流(Maximum period sequence pulse, 最小パルス幅 T)を用いた。両者のパルス波形は、正のステップ波形と負のステップ波形が交互に繰返されたものとみなすことができる。波高値が I_p である正負のステップ波形のフーリエ変換の絶対値は共に $I_p / 2\pi f$ で与えられ、測定器に対するステップ波形の衝撃回数は両者のパルス波形についていずれも $1/BT$ である。故に、繰返しパルス入力の周波数 f において測定される雑音レベル $G(f)$ は式(6)より

$$G(f) = (BI_p / \pi f) \cdot \sum_{n=-\infty}^{\infty} \exp[-\pi(BT)^2 n^2] \quad (8)$$

となる。図5の実線は式(8)による計算値を示す。図によって計算式は実測レベルをよく表すものであることが分かる。

3. 実験

3.1 実験装置と測定法

図6は実験に用いたしゅう動接点装置の構造を示す。直径10cmの黄銅円板(Brass disc)の円周上にはばねで支えた接点材(Contact material)を接触させる。ばねはねじに接続されており、これによって接点部の接触圧力を調節する。円板はベルトを介した整流子モータで回転させる。電流の集電はりん青銅(Phosphor-bronze)を径の異なる円周上に圧着して行う。接点材は直円柱形(直径5mmφ、長さ15mm)の黄銅である。

図7は、図1に対応する実験回路を示す。スライド抵抗器(Slide resistor)のインピーダンスは測定の対象とする周波数範囲において十分大きく、又、コンデンサ C_T のリアクタンスは十分小さいので、抵抗値 R_T は給電線の特性格インピーダンスに対応する。

接点開放電圧は電源電圧 V により与える。電流 I_0 は接点静止状態の通電電流(接点電流)であり、スライド抵抗器の抵抗値 R により定める。電流 I_0 は接点しゅう動状態の電流(集電電流)である。黄銅接点

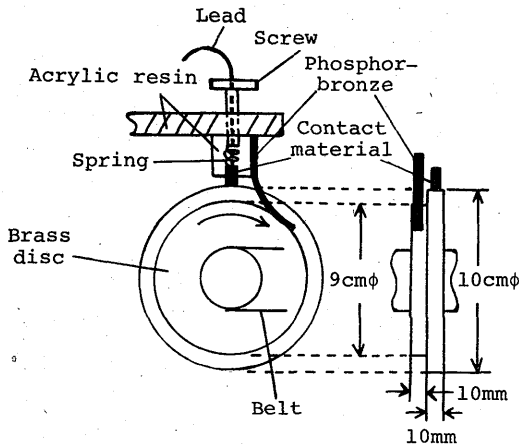


図6 しゅう動接点装置の構造
Fig.6 - Structure of a sliding contact apparatus.

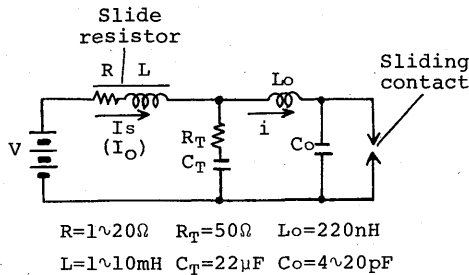


図7 実験回路
Fig.7 - Experimental circuit.

(最小アーク電圧約10V, 最小アーク電流200~300mA)のしゅう動に伴うアークが十分に維持できるように $V=20V$, $I_s=1\sim 5A$ の範囲で実験を行った。

雑音電流 i の測定は次のように行う。電流プローブを接点材に接続されたリード線(直径1mmφ)に直接クランプする。黄銅円板を約2,000rpm(しゅう動速度10m/s)で回転させ、そのとき接点材が適当に跳躍するようにばね圧を調節する(接触荷重20g以下)。雑音レベルの測定は電流プローブの出力をスペクトルアナライザ(せん値検波方式)の入力端子に導いて行う。電流波形を観測する場合には、これをストレージオシロスコープの入力端子に導く。

測定に使用した計測器の特性は次のとおりである。電流プローブ(ソニーテクトロニクス, CT-2型)の帯域幅は1.2kHz(3dB垂下)~200MHz(0.3dB垂下)である。スペクトルアナライザ(YHP, 141T, 8554B, 8552B)は1~1,250MHzまでの直読可能なスペクトルを指示し、その中間周波帯域幅(6dB

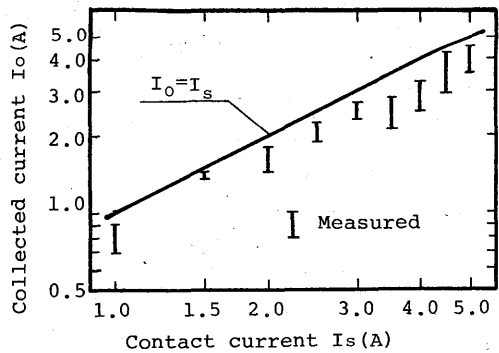


図8 接点電流と集電電流の関係
Fig.8 - Relationship between a contact current and a collected current.

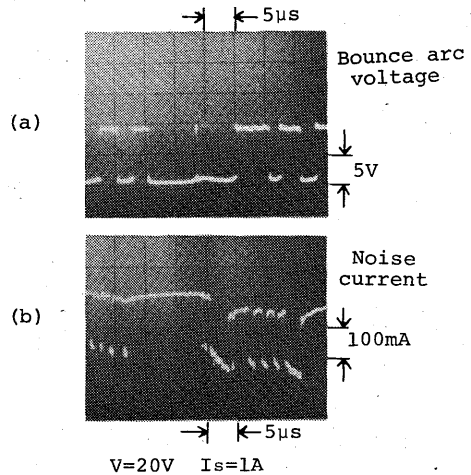


図9 接点のしゅう動に伴うバウンスアーク電圧(a)と雑音電流(b)
Fig.9 - Bounce arc voltage (a) and noise current (b) caused by the sliding contact.

垂下)は150kHzである。ストレージオシロスコープ(YHP, 1741A)の帯域幅(3dB垂下)は100MHzである。

3.2 実験結果と考察

図8は接点電流(Contact current) I_s と集電電流(Collected current) I_o の関係を示す。図より接点静止状態の電流 I_s は接点しゅう動状態の電流 I_o と並行性があることが分かる。

図9(a)は接点のしゅう動に伴うバウンスアーク時の電圧波形を示し、同図(b)はそのときに生じる雑音電流の波形を示す。接点部の開放電圧が高く電流も十分に供給されており、接点は完全には開放されることなく常にアークの開始消滅の状態を繰り返していることを

図は示す。

図10(a)はバウンスアークの電圧波形から実測したバウンス間隔 (Bounce interval) のヒストグラムである。これはストレージオシロスコープの管面からア

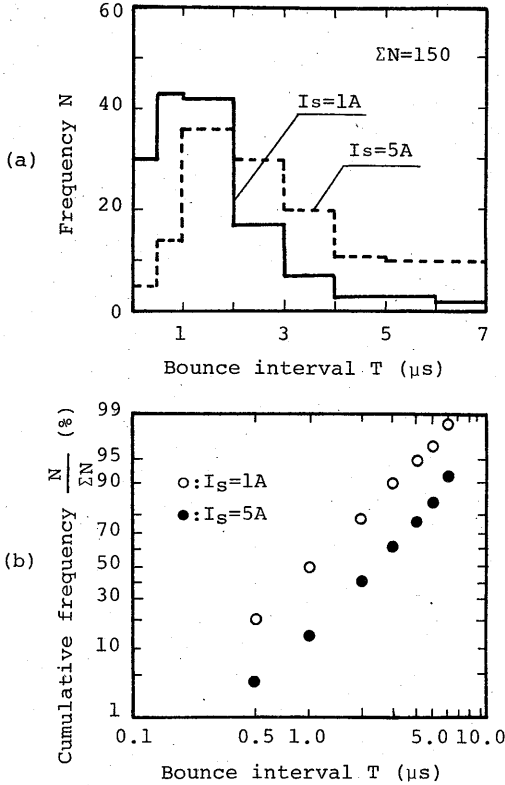


図10 バウンス間隔のヒストグラム(a)と累積度数分布(b)
Fig.10 - Histogram (a) of the bounce interval and its cumulative frequency distribution (b).

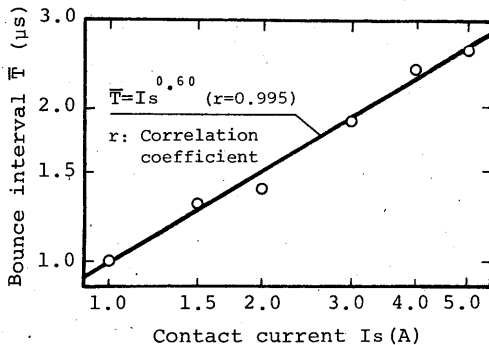


図11 バウンス間隔の接点電流依存性
Fig.11 - Dependence of the bounce interval on the contact current.

ーク継続間隔と無アーク間隔 (2.2の(2)項で述べたところにより、どちらもバウンス間隔) を無作為に、150回直読して求めたものである。図10(b)は同図(a)を累積して対数正規確率紙に示したものである。図よりしゅう動接点に伴うバウンス間隔はほぼ対数正規分布に従うことが分かる。

図11は、図10(b)の50%値を \bar{T} としてその接点電流依存性を示したものである。横軸は接点電流 I_s である。図はバウンス間隔 \bar{T} が電流 I_s の増大と共に延びることを示す。

図12は雑音レベルの周波数スペクトル実測例を示す。縦軸は帯域幅 $B = 150kHz$ (6dB垂下) 当りの雑音レベル (実効値) であり、 $1\mu A$ を0dBとして表している。図中の実線は式(7)による計算値である。図は計算値が実測値によく一致していることを示す。

図13は雑音レベルの接点電流依存性を示す。図は計算値と実測値がよく一致することを示す。雑音レベルが接点電流の増加と共に低下する理由は次のとおりである。電流の増大と共にバウンス間隔が延び、測定器 (スペクトルアナライザ) に対する雑音の衝撃回数は減少し、測定器の応答の重なりが減少し応答のせん頭値である雑音レベルは低下する。

雑音レベルの計算に必要な諸量は、あらかじめ実験のために設定した回路定数 (図7参照) および帯域幅

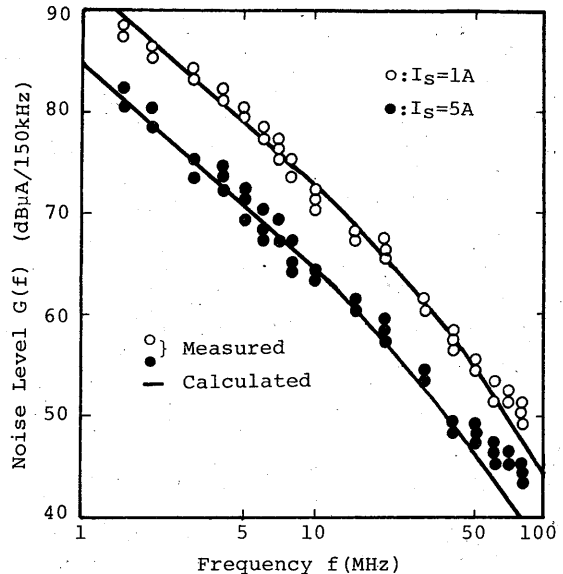


図12 雑音レベルの周波数スペクトル実測例
Fig.12 - Measurements of the frequency spectra of the noise levels.

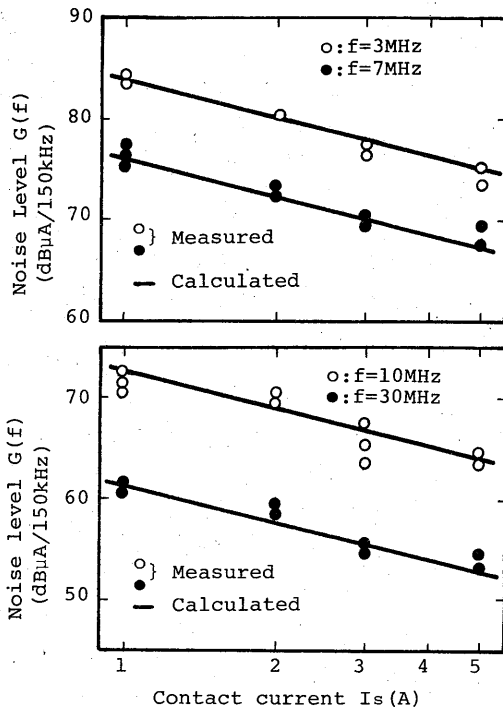


図13 雑音レベルの接点電流依存性
Fig.13 - Dependence of the noise level on the contact current.

Bのほかは、バウンス間隔 \bar{T} とアーク電圧 $V_a=10V$ という実測値だけである。なお、雑音レベルは接点部のしゅう動速度、接触荷重などに依存するが、しゅう動速度が $2\sim 20m/s$ の範囲で接触荷重が $10g$ 以下と $30g$ 以上の場合について種々の実験を行ったところ、いずれもバウンス間隔 \bar{T} を実測することによって雑音レベルを推定することができ、実測値ともよい一致をみた。

4. む す び

接点開放電圧が大で接点部が完全には開放されるこ

とのない状態でのしゅう動接点において生じる雑音電流レベルを測定器の応答との関係において明らかにし、測定器の帯域幅、接点装置の回路定数とバウンス間隔およびアーク電圧を含んだ雑音電流レベル推定式を得た。又、接点のバウンス間隔は接点電流の増大と共に延びることにより測定器に対する雑音の衝撃回数が減少し、電流が大の程雑音レベルは低下するという特性が得られることを示した。

なお、本論文では接点材として黄銅を用いたが、電気接点の場合⁽⁶⁾と同様、しゅう動接点においても接点材の種類により雑音レベルは著しく異なる。このことについては実験中であり、詳細は次の機会に報告する。

文 献

- (1) 栗田, 吉田, 佐川: “新幹線による電波障害と対策について”, 昭52電学大全, S7-4.
- (2) 川瀬, 雨宮: “高周波フェライトによる電車雑音の軽減効果”, 信学技報, NW78-57(1978-09).
- (3) 雨宮好文: “国鉄電車における無線雑音の発生機構”, 電学誌, 77,4, pp.426-433 (昭32-04).
- (4) 雨宮好文: “電気鉄道の電波雑音”, 電気学会技術報告, 89, pp.48-54 (昭52-02).
- (5) 雨宮好文: “電気鉄道の雑音”, 電学誌, 89,7, pp.1240-1243 (昭44-07).
- (6) 相田, 盛田: “接点開離アークによる無線雑音とその材料的考察”, 信学論(C), J61-C,3, pp.142-149 (昭53-03).
- (7) 相田, 盛田, 松田: “接点開離時における無線雑音の発生原因の検討”, 信学論(C), J62-C,1, pp.24-30 (昭54-01).
- (8) 内村, 相田: “銀接点開離アークよりの無線雑音周波数特性の一推定法”, 信学論(C), J63-C,9, pp.617-624 (昭55-09).
- (9) Geselowitz, D.B.: “Response of ideal radio noise meter to continuous sine wave, recurrent impulses, and random noise”, Trans. IRE, RFI, pp.2-11 (May 1961).
- (10) 蓑妻二三雄: “通信と雑音”, 共立出版, p.59 (昭31-02).

(昭和56年7月13日受付, 10月1日再受付)