

電気接点のダークブリッジの研究 (II)
-鉄、カーボン接点におけるダークブリッジの研究-

Study of Dark Bridge in Electrical Contacts (II)
-Study of the dark bridge in iron and carbon contact-

○久保田 啓義† 佐々木 俊介‡ 石田 広幸† 高木 相‡

○Hiromichi KUBOTA†, Shunsuke SASAKI‡, Hiroyuki ISHIDA†, Tasuku TAKAGI‡

†東北文化学園大学大学院

‡東北文化学園大学

†Tohoku Bunka Gakuen University Graduate School

‡Tohoku Bunka Gakuen University

キーワード：電気接点(electrical contacts)、ダークブリッジ(dark bridge)、非線形 V-I 特性(non-linear V-I characteristics)

連絡先：〒981-8550 宮城県仙台市青葉区国見六丁目 東北文化学園大学大学院 健康社会システム研究科
生活環境情報専攻 石田研究室 久保田 啓義, Tel:(022)233-1000, E-mail: re13btfc3s@gmail.com

1. はじめに

筆者らは前報 (I) -ダークブリッジの生成- において電気接点のブリッジ現象に関する従来の研究を概観し、筆者らのグループによって得られたダークブリッジ(Dark ridge)とは開閉電気接点に於いて開離速度が極めて遅く、熱平衡状態が保たれる速度(数 μ m/s 以下) のとき、接点間にできる光らない橋絡(ブリッジ)¹⁾ を意味することを述べ、このブリッジを生成するための精密な片持ち梁を用いた装置、及びダークブリッジの生成メカニズムと得られた電気的特性(電圧 V-電流 I) を示し、この V-I 特性は V が小さいところでは通常の直線関係(V-I 比例関係：一定の抵抗) が成立するが、ある大きさの電圧から非線形特性となるという極めて不可解な特性となったことを述べた(図 1 参照)²⁾。

本文ではダークブリッジの V-I 特性の解析を行った結果を述べる。解析は鉄の実験

と引き続き行ったカーボンの実験結果について行い、両者を比較検討する。なおこの解析は多くの実験をもとにしなければならないが、装置の改修を要することから、今後の実験結果によっては本文の数値的結果を変更すべきものが出ると考えられる。しかし、大局的見地からの変更の要はないものと考えて本文を作成している。

本文での検討結果を要約すれば以下のごとくである。

- 1) 電圧 V の低い範囲では通常の導電体の特性を示す： $I=GV$ ；G はコンダクタンスで一定値を取り (G:電気抵抗 R の逆数) V が小さい場合 G (R) は一定。いわゆるオームの線形法則が成立する)
- 2) V がある大きさに達すると V-I 特性は非線形になる。この非線形 V-I 特性

は指数関数関係で表される ($I = I_1 e^{\beta V}$ 、

$I_1 : \beta V = 1$ の時の I 、 β : 定数 (材料定数だが内容は明らかではない)。

- 3) 鉄では V-I 特性が一定にならない不安定領域が出た (この内容は目下検討中で次回以降の重要な話題)。

以下上記 1)、2) について説明することとする。3) についてはあとにゆずる。

*この V-I 特性実験で変数パラメータは電流 I であることを断っておかなければならない。つまり、電流をある値に設定してその時のブリッジ両端の電圧を測定してこれを V-I 特性としてプロットしたのが以下のグラフである。

2. 鉄、カーボンのダークブリッジ特性

2.1 微小ギャップでの接触抵抗 (直線群)

図 1 は前報 (I) の図 5 である。本文図 4 がこの度測定したカーボンのダークブリッジの V-I 特性である。

図 1 と図 4 を比較すると、まず両者のマクロ的な形はよく似ていることに気づく。両者の違いを眺めれば

- i) 両者のブリッジ電圧は同じ電流値に対してほぼ一桁異なる (カーボンのほうが大きい)
- ii) 微小な電極の開離による直線の傾斜の変化には同様な傾向がある (ギャップが開と傾斜が緩やかになる)
- iii) 同一電流時の両者のダークブリッジはカーボンでは鉄に比べてほぼ一桁抵抗が大きい。これは本来の材料と抵抗の違いによるものである。表 1 に大きさの比較を示す。

表 1 で initial とは接触力がほぼゼロとみなされる状態をいう。ゆっくりと接点を開離して、それぞれ表 1 に示す gap に設定して接触抵抗を測定したものである。なおこの測定は系統的ではない。前報 (I) にはいわゆる a-spot³⁾ の系統的測定結果がある²⁾。

表 1 ギャップと接触抵抗

gap(μm)	接触抵抗(m Ω)	
	材	料
	鉄	カーボン
Initial *	40	375
9.5	40	
19.5	62.5	
100.7		500
104.5		650

* ほぼ接触力 0 の接触状態 (感覚的)

2.2. 非線形特性の解析

2.2.1 図 1 (鉄) のカーブ A までの解析

図 1 (鉄) と図 4 (カーボン) の非線形特性を解析する。図中 A までと A~B の間の特性の性質を調べる。

鉄接点の V-I 特性

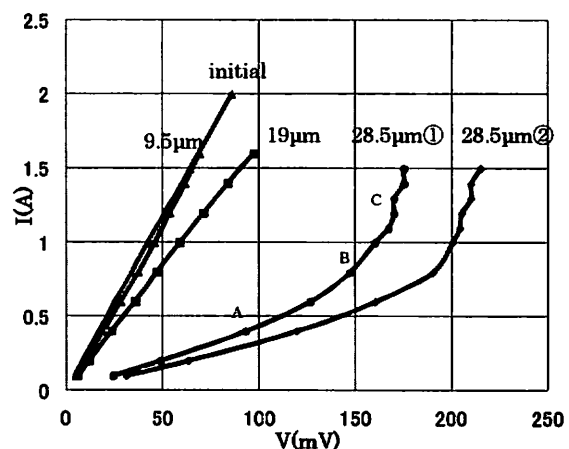


図 1 鉄接点の V-I 特性

目視での見当ではおよそ A までは直線的であるように見える。データの数が少ないが図 1 で A までの 3 点をつなぐ直線を解析した。この結果が図 2 である。図中の重相関係数 (R^2) から見てこれはほぼ 1 であることから、この結果は明らかに A までの間に完全に直線関係が存在するとの確信が得られる。図中の式

$$I = 0.0044V - 0.0086 \quad (1)$$

の係数 0.0044 の逆数が抵抗値を示すからこれを計算すると鉄のこの場合のダークブリッジの抵抗 R_F は

$$R_F = 227.3 \text{ m}\Omega \quad (2)$$

である。表 1 ではもともと $40 \sim 65 \text{ m}\Omega$ 程度であったものが突然 4~5 倍の抵抗になっている。この理由は電流集中による高密度電子の負の電界効果と考えられるが、この議論は次回以降に委ねる。

なお(1)式で -0.0086 は明らかに誤差である。電流ゼロでは電圧はゼロであるからこの項はゼロでなければならない。

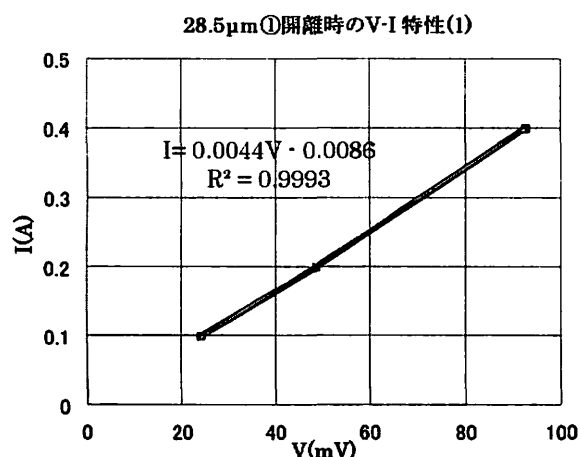


図 2 28.5 μm ①開離時の V-I 特性
(図 1 の A までの特性)

2.2.2 図 1 の A~B 間の解析

解析結果を図 3 に示す。

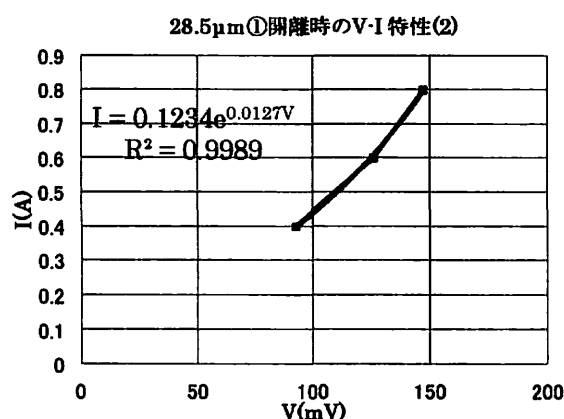


図 3 28.5 μm ①開離時の V-I 特性
(図 1 の A~B 間の特性)

ここでは明らかにこのカーブは指数関数で近似されることがわかる。 R^2 はほぼ 1 である。

2.2.3 図 4(カーボン)のカーブ A までの解析

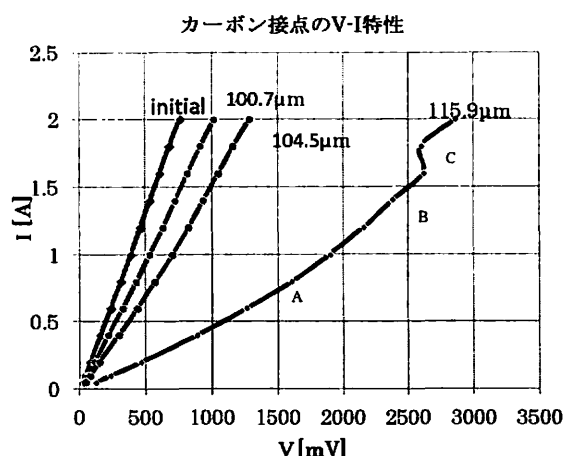


図 4 カーボン接点の V-I 特性

図 5 に結果を示す。この場合も極めて高い相関 ($R^2 = 0.9985$) でこの間は直線で近似でき、

$$I = 0.0005V - 0.0149 \quad (3)$$

である。ここでも (3) の第 2 項 -0.0149 は誤差である。そしてこの部分の抵抗 R_C は V の係数の逆数として求められ、

$$R_C = 2000 \text{ m}\Omega = 2 \Omega \quad (4)$$

である。表 1 と比べて見ると約 3~4 倍の抵抗となっている。

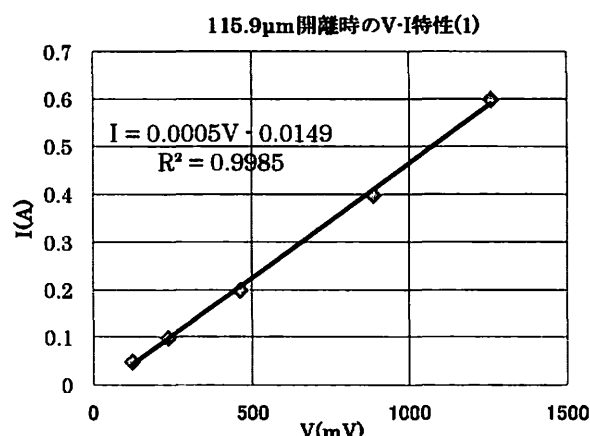


図 5 115.9 μm 開離時の V-I 特性
(図 4 の A までの特性)

2.2.4 図4(カーボン)のA～B間の解析 解析結果を図6に示す。この結果は

$$I = 0.2475e^{0.0007V} \quad (5)$$

となった。 $R^2 = 0.9962$ である。明らかにここも指数関数的であることがわかる。

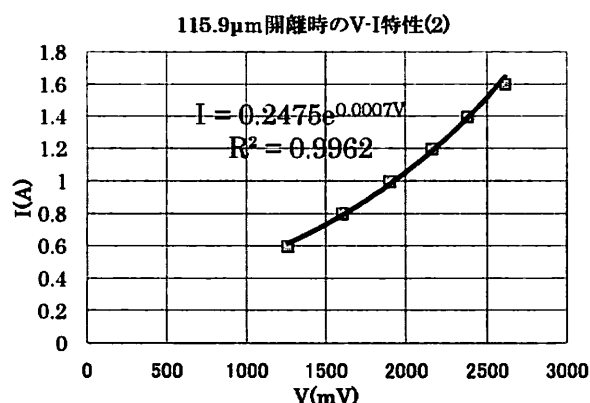


図6 115.9 μ m開離時の V-I 特性
(図4のA～B間の特性)

2.2.5 解析結果の考察とまとめ

-接触抵抗との関係-

以上実験で得た鉄とカーボンについてその電圧－電流（V－I）特性の非線形特性を解析した。この結果はいずれもVの小さい範囲では直線的関係であることが分かった。直線関係は電気抵抗が変化しないことを意味する。ここで注目すべきは2.1で考察した接触抵抗部（V-I特性が直線関係（線形）であるところ）の接触抵抗の値（表1）と非線形部の直線部から得られる抵抗値が大きく異なることである。つまり

- i) 図4のV-I特性の直線部（電圧の小さい範囲）はa-spot領域と考えられ、通常の接触抵抗論での解釈が成立すると考えてよい。
- ii) これに対して非線形部の初期の線形部は通常のa-spot論に加えてダークブリッジ自体の抵抗が加わったものと考えられる。

詳細は今後の観測に委ねなければならないが、当面の解釈を以上の如くして今後の調査の方向とする。

-V-I 指数関数部の発生について-

本文でも触れたところであるが、この非線形V-I特性は電子の高密度化が強制的になされることから起こることに疑いはない。負の電荷（電子は負（マイナス）の電荷をもつ）は負の電界を持つからプラス電圧（ブリッジ電圧）を打ち消す作用をする。これによって起こる現象が指数関数的であると考えられる。負電荷による負の電圧を‘反電圧’と仮に呼ぶこととする。

-鉄とカーボンの違いについて-

表1に見るように鉄とカーボンのダークブリッジ特性は値において大きく異なっている。常温での特性値は測定可能であるが、電気接点間の微小なところでの高温状態（ただし可視光が出る範囲よりは低温）での材料特性は明らかではない。ダークブリッジの温度の計測は今後の重要な課題であるが、本研究で近接場所の温度計測と間接的な温度推定の可能性を追求すべきである。

3. 非線形不安定領域（C）

図1、図4でCの領域を示した。まず図4のC部は特筆すべき不安定ではなくブリッジが変形した結果であると考えられるであろう。ダークブリッジの成長を促すため熱の伝達速度より遅い速度で開離するのであるが、途中でブリッジが瞬間的に切断する現象がある（瞬断という）。図4のC領域でのデータのズレはこのためと考えるのが至当であろう。カーボンで不安定領域が存在するか否かについては今後の研究に委ねなければならない。

しかし、図1のC部は明らかに不安定領域である。一定電流を流している状態で電流に変化がないにもかかわらずブリッジ電圧が一定値に留まることが出来ない。この原因は高密度電子による反電圧がブリッジ電圧より高くなってダークブリッジは負性抵抗を持つに至ったものと考えられる。この議論と調査は今後の興味ある課題である。成果を得た段階で逐次報告したいと考えている。

4. おわりに

本報告では電気接点間に生じるダークブリッジの特性解析を中心に述べた。ここで得られた知見は以下のようなものである。

- i) ダークブリッジの非線形部は直線と指数関数部及び不安定部（負性抵抗部）からなる。
- ii) 非線形部の中の線形範囲は a-spot 接触抵抗とダークブリッジ抵抗の和と考えられる。
- iii) 非線形 V-I 特性における線形部と指数関数部は精度の高い（重相関係数がほぼ 1）近似が成立する。

などを明らかにすることが出来た。

今後の課題を列挙すれば、

- i) 非線形 V-I 特性から電気抵抗の電流（または電圧）特性（I-R, V-R 特性）の導出
- ii) 金属材料特性（電気抵抗率、熱伝導率、硬度、など）と非線形特性の関係の究明。多くの材料での実験。
- iii) 実際のコネクタ接点でのダークブリッジの生成の可能性（実用コネクタのばねの疲労劣化でダークブリッジが生成する可能性がある）。
- iv) 負性抵抗の応用（電気振動回路（発振器））の可能性。

などである。

文献

- 1) Hiroyuki Ishida, Masanari Taniguchi, Tasuku Takagi: "Precise Measurement of Dark Bridge between Micro-gap Electrical Contacts in a State of Thermal Equilibrium Condition", IMTC-Instrumentation and Measurement Technology Conference, Ottawa, Canada, May 2005
- 2) 久保田啓義、佐々木俊介、石田広幸、高木相: "電気接点のダークブリッジの研究 (I) -ダークブリッジの生成-", 計測自動制御学会東北支部第 277 回研究集会 277-12 (2012, 12)
- 3) R.Holm : Electric Contacts, Theory and Applications, Fourth Edition, Springer (2000), p.11~16.