

極微速度開離装置によって生成するコンタクトブリッジの 動的諸現象の観察

渡辺義智 石田広幸 谷口正成 (東北文化学園大学) 曾根秀昭 (東北大学)
井上浩 (秋田大学) 高木相 (東北文化学園大学)

Observation of Behavioral Phenomena of Contact Bridge Generated by the Very Slowly Separating System

*Y. Watanabe, H. Ishida, M. Taniguchi, (Tohoku Bunka Gakuen University), H. Sone (Tohoku University),
H. Inoue (Akita University) and T. Takagi (Tohoku Bunka Gakuen University)

Abstract - The authors have developed the very slowly separating system in order to investigate the bridge phenomena in which bridge grows in the micro-gap between electrical contacts. The behavioral phenomena of contact bridge were observed by means of video image acquisition and the bridge size is measured. This experiment is the observation for the first time done under the thermal equilibrium condition, and we obtained valuable results which support our recent theory on the thermal flow analysis on the bridge under thermal equilibrium condition.

Key Words: electrical contacts, bridge, micro-gap, thermal equilibrium condition

1 はじめに

電気接点に通電しながら開離する初期に、ギャップ間に微小な電極材料の橋絡(ブリッジ)が発生する。ブリッジは、電極表面にただれや電極材料の転移をもたらす。

ブリッジ現象の研究は古くからなされており、例えば F.L.Jones は、ブリッジの形状を初めて動画として撮影し、ブリッジの研究に新知見をもたらした[1]。我が国では窪野氏がブリッジについて実験的・理論的に詳しく調査し、接点ギャップとブリッジの大きさの関係について考察している[2]。笹本氏は窪野氏の研究と平行して基礎から実用に至る研究を行い、リードスイッチ用接点の設計理論をつくり、ブリッジ転移が平衡する長寿命のリードスイッチを開発した[3]。しかし、ブリッジ現象は未だ十分その挙動が明らかではないことから、著者らは微小ステップの開離装置と片持ち梁を用いた微小ギャップ開離装置を開発して実験を行ってきた[4][5]。二つの装置を用いて発生させたブリッジの観測結果から過渡的開離(実験では $0.5 \mu\text{m}$ づつのステップの開離)では明るく輝くブリッジが、一方、片持ち梁を用いた低速開離(定常状態)では暗く輝かない円筒状のブリッジが観察された[6]。ここで定常状態とは接点开離中熱平衡が保たれてブリッジが成長していると思われる状態をいう。筆者らはこの条件を満足する開離速度を推定するために理論的な解析をした[7]。熱平衡条件下では、ブリッジ長(接点ギャップ長)と直径の関係の理論的検討では直径が頭打ちになる傾向がみられ、一部の実験結果を報告した[9]。本論文は、片持ち梁を用いた極微速度開離装置でパラジウム(Pd)接点を開離し、接点ギャップが連続的に微小に開いていくときに成長するブリッジのイメージと接触電圧波形の観察、及び形状を測定した結果について報告する。

2 接点駆動装置

実験に用いた片持ち梁を Fig. 1 に示す。鉄製の片持ち梁で、梁の長さは 1 m である。梁はロッドから切り出され、土台にしっかり固定されている。この梁は精密な極微小変位の制御が可能である。

変位は片持ち梁の上部に取り付けたマイクロメータを時計式低速回転アクチュエータの軸回転によって与えられる。変位センサで変位が測定される。

接点電極を片持ち梁と固定側の下部に取り付けた電極ホルダに固定する。Fig. 2 に示すように接点ギ

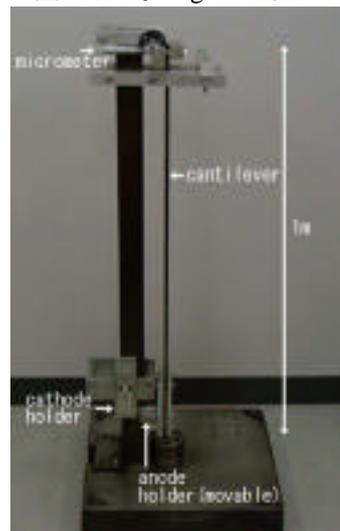


Fig. 1 Very slowly separating system

ャップ d と片持ち梁の先端変位 D との関係は (1) 式で計算される[10]。 $L = 1\text{m}$ である。

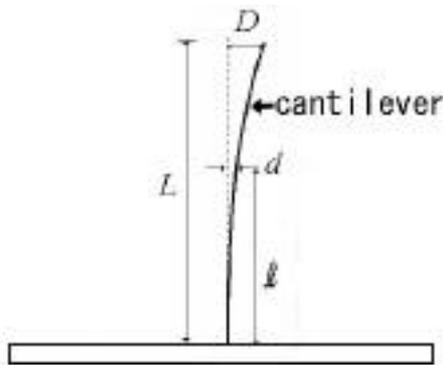


Fig. 2 The schematic image of the cantilever

$$d = \frac{3Ll^2 - l^3}{2L^3} D \quad (1)$$

Fig. 3 に変位センサで測定した装置の開離特性を示す。極めてゆっくりとした連続的开離が実現できている。接点开離速度は約 $0.07 \mu\text{m/s}$ である。

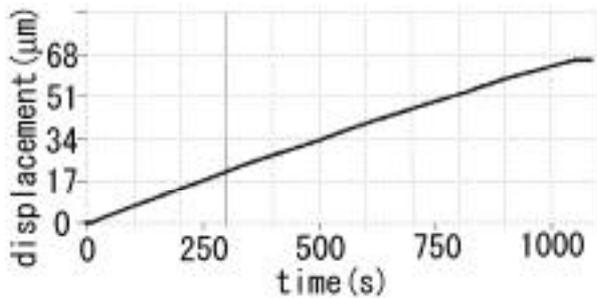


Fig. 3 Separating characteristics

3 供試接点と測定条件

接点としては 1mm の Pd を軸対向にして接触させる。ブリッジができる接点上の位置の違いは、ブリッジからの熱放散の違いに関連すると考えられることから、Fig.4 に示すように、異なる二種類の接点電極形状で実験することとした。Fig. 4(a)はペンシル状の形状で接触部を平面状に研磨 ($1500\#$ 紙やすり) したもので、及び(b)に示すような半球状の形状である。

測定条件は開離速度： $0.036 \mu\text{m/s}$ と $0.07 \mu\text{m/s}$ 、接点電圧 6.6VDC 、接点電流 2A とした。この設定は過去の実験からの都合と装置の関係から選んだが、接点電圧はアーク電圧以下として適当に選んだものである。

4 観測・測定方法

観測はブリッジを直接光学顕微鏡で撮り、接点ギャップが極微速で開き、接点間に生成するブリッジが成長する様子をブリッジが切断するまでビデオカメラで継続的に撮影する。倍率は顕微鏡により100倍、さらにビデオカメラで約8倍に拡大される。必要に応じてビデオカメラに光学フィルタを取り付けて撮影することとした。

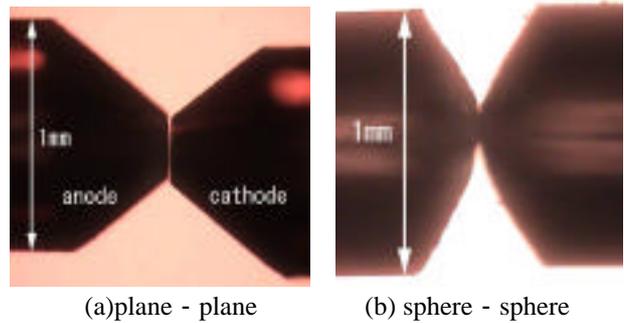


Fig. 4 Shapes of the contact electrode

ブリッジの形状はカメラの映像から知ることが出来る。ブリッジについての興味は成長に伴う長さや直径の測定の関係の測定である。この測定は Fig. 5 に示すようなブリッジ画像から測定することができる。

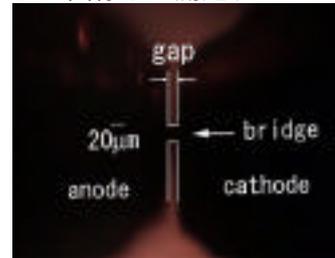
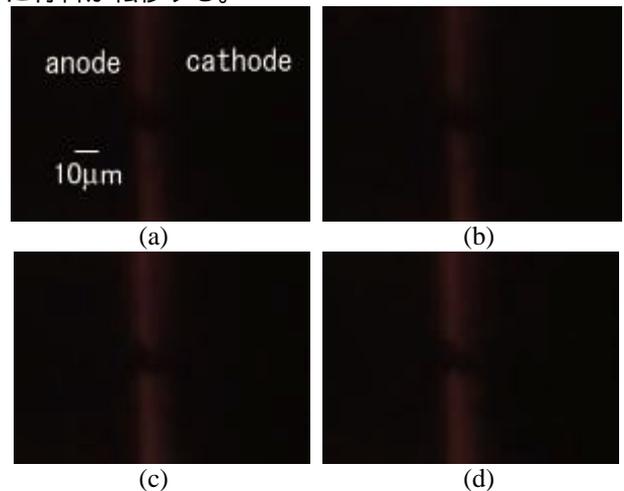


Fig. 5 The outline of the bridge

接点間電圧変化とギャップ変化はそれぞれオシロスコープで観察し、そのデータは記録計で記録される。

5 観察・測定結果

Fig. 6(a)-(e)に接点を極低速度 ($0.07 \mu\text{m/s}$) で開いたときに接点ギャップに成長していくブリッジ画像の例を示す。(a)から(e)にかけて接点ギャップが広がっていく。ブリッジが長くなるにつれてブリッジが太くなっていく様子がわかる。(f)は、ブリッジ切断後の画像である。これまでの観察から陰極から陽極に材料が転移する。



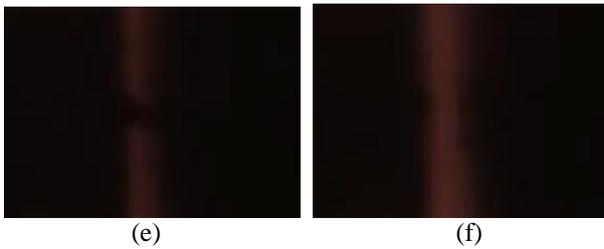


Fig. 6 Typical bridges growing in the micro-gap

Fig. 7に接点間の電圧波形（接触電圧波形）と可動側電極（陽極）の変位変化の例を示す。この電圧波形は、接点電極の形状を平面 - 平面（Fig.4（a））にして接点を 0.036_m/s（Fig.7の下波形より）で開離したときの接触電圧波形（ブリッジ電圧波形）である。

これまでの観察では、接点が開離し始める初期の段階では接触電圧は安定して上昇していくが、接触電圧が約 300mV に達すると（Fig.7中、(s)の時点）接触電圧波形に乱れが生じている。これはビデオ映像から見てブリッジの一部に放電が生じていることに対応している。電圧波形が安定したところ（Fig.7(a)）ではFig.8（a）に示すような鮮明なブリッジ

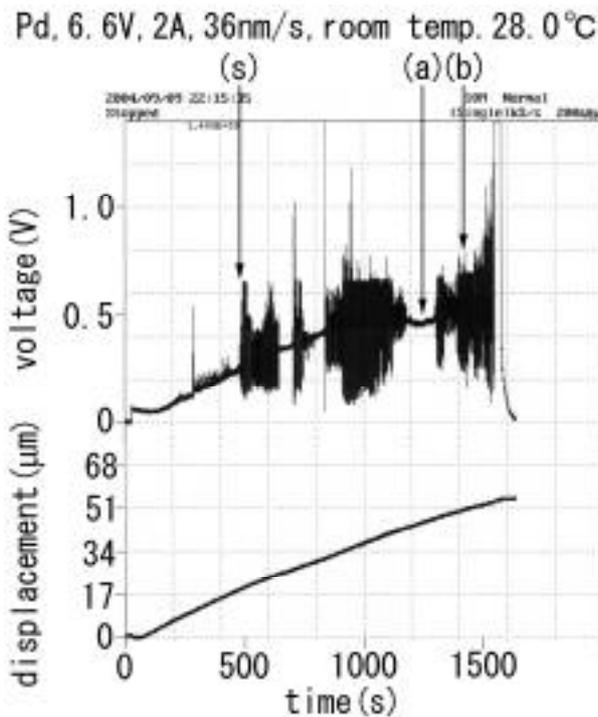


Fig. 7 Contact voltage waveform and displacement

がみられた。Fig. 7中の(b)に対応するブリッジ画像をFig. 8（b）に示す。

Fig.9に電極表面形状を平面 - 平面にしたときに測定したブリッジ長と直径の関係を示す。測定値のばらつきが大きい。

Fig. 10に電極表面形状を曲面 - 曲面としたときに測定したブリッジ長と直径の関係を示す。Fig.9と同

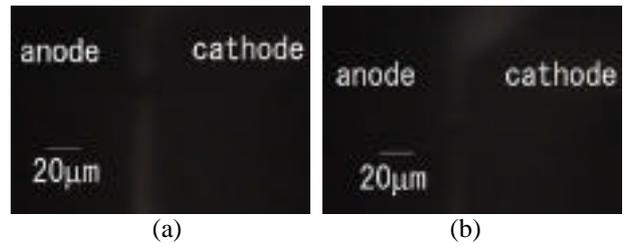


Fig. 8 Bridges corresponding to (a) and (b) in Fig.7

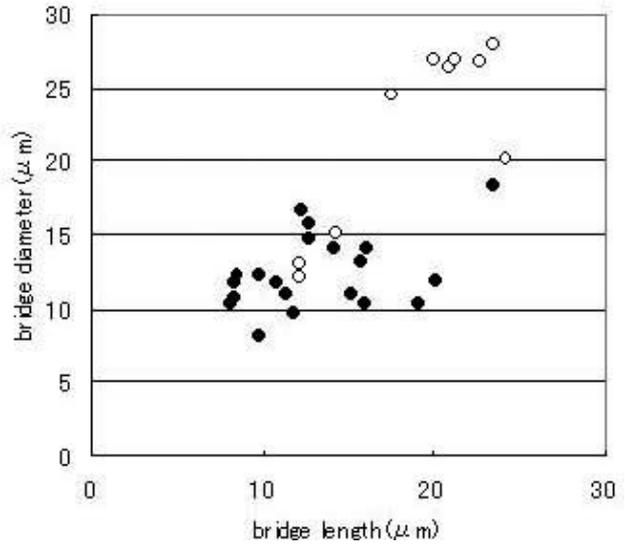


Fig. 9 Relationship between bridge length and diameter (plane - plane contacts (Pd , 6.6V , 2 A)

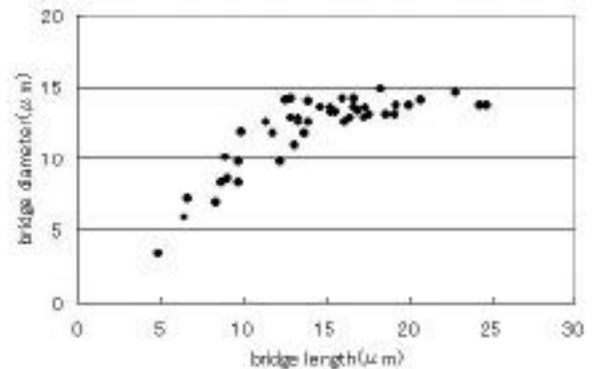


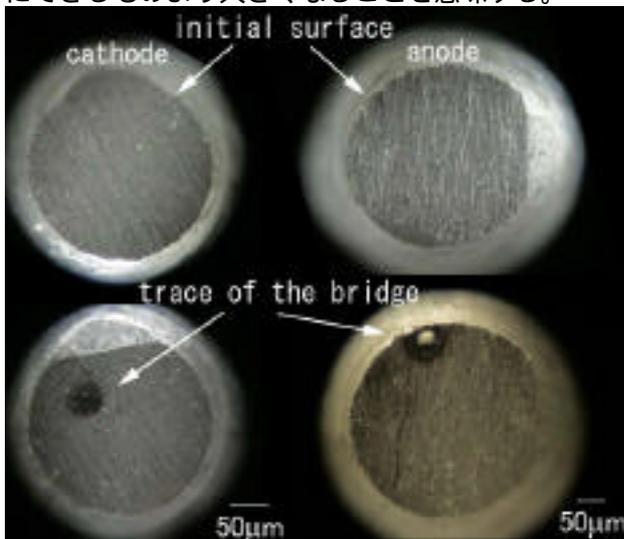
Fig. 10 Relationship between bridge length and diameter (sphere - sphere contacts)

じ Pd,電圧 6.6V , 2A である。測定値のばらつきは平面 - 平面(Fig. 9)のそれよりも小さくなっている。ブリッジは長さ 5 μm から見え始めており、平面 - 平面で約 10 μm から見えるのと比べると、曲面 - 曲面の方が開離の早い時点からブリッジの観察ができています。ブリッジが長くなるにつれて直径が大きくなり、直径が頭打ちになる傾向が、よりはっきりとみられる。

6 検討

Fig.9 (平面-平面) と Fig.10 (曲面-曲面) の違いは興味深い。すでに筆者らのブリッジからの熱伝導に着目した研究 [7][8] から容易に推論されるように、ブリッジの成長は温度に依存する。温度は熱放散に依存する。熱放散が悪くなると温度が上がりブリッジは太くなる。この推論を Fig.11 は定性的に証明している。Fig.9 をみると以下のことが云えるであろう。即ち、Fig.9 の 印のデータが特異であり、これは電極表面の中央付近でできる典型的なブリッジ痕跡よりも直径が大きい。Fig.9 の 印に対応するのは、Fig.11 である。これはたまたま電極の端でブリッジが形成されたものである。

熱伝導の見地から見ると、Fig.11 の場合、熱は電極金属内の流れのほか、熱抵抗の大きい外気へ放散する熱量が多くなる。このことはブリッジの温度が高くなることを意味し、そのためブリッジは中心部にできるものより大きくなることを意味する。



Plane-plane contacts on which the bridge grew at the edge (special case)

Fig. 11 Initial surface and trace of the bridge(cathode ; left side, anode ; right side)

ブリッジが切れるまでの電極の変位は、Fig.7 から約 $50\mu\text{m}$ である。一方、Fig.9 と Fig.10 から、ブリッジが切れるブリッジ長の測定値が約 $25\mu\text{m}$ 以下である。接点電極の変位とブリッジ長に相違がある。この相違は、ブリッジに電流が流れている間は電極の熱膨張により接点ギャップが狭くなるが、ブリッジが切断して電流が流れなくなると、電極は冷却してギャップが広がるためである。ブリッジそのものと電極の温度を測定することが今後の解析に欠かせないことが理解される。

本実験で採用した接点开離速度条件は十分に熱平衡条件を満足していると考えられる。接点开離速度と熱平衡条件との関係については、筆者らの Pd 接点を対象にした計算で $2\mu\text{m/s}$ で 0.1% の誤差となるという結果を得ている [7]。本実験はこれより十

分小さい速度であることから、十分に熱平衡条件下の実験であると思われるが、今後熱平衡条件と開離速度の関係を実験的に明らかにする必要がある。

7. まとめ

梁のたわみを利用した極微速度開離装置を用いて接点を極微速度で開離し、接点ギャップが広がるとともに成長するブリッジをビデオで観察し、ブリッジの大きさ、接触電圧などを測定した。Fig.10 の測定結果はすでに導出した理論予測 [7] と同じ傾向である。

本実験から熱流のブリッジ形成に及ぼす影響についての示唆が得られたことは、今後接点現象の熱解析の参考になるものと考えられる。

参考文献

- [1] F.LLEWELLYN JONES: "The Physics of Electrical Contacts", Oxford at the Clarendon Press (1957)
- [2] 窪野隆能: 「コンタクトの転移現象に関する研究」, 東北大学博士学位論文 (1973)
- [3] 笹本猛: 「リードスイッチにおけるコンタクトのブリッジ転移の研究」, 東北大学博士学位論文 (1979)
- [4] Hiroyuki Ishida, Tasuku Takagi : "Experimental Study on the Relationships Between Bridge-Voltage and Gap Length in Slowly Opening Ag Contacts", Proc. of the IS-EMD 2001, EMD2001-64, pp.53-56 (Sep. 2001)
- [5] Yoshitomo Watanabe, Hiroyuki Ishida, Masanari Taniguchi, Tasuku Takagi: "Observation of Bridge Size in Micro-gap by Using Cantilever Used Gap Control System", IS-EMD 2003, EMD2003-62, pp.15-18 (Nov.2003)
- [6] Hiroyuki Ishida, Yoshitomo Watanabe, Masanari Taniguchi, Hiroshi Inoue, Tasuku Takagi: "Observation of Contact Bridge Phenomena at Transient and Steady State", Proc. of the 22nd International Conference on Electrical Contacts Together with the 50th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, pp.519-522(Sep. 2004)Seattle
- [7] Tasuku Takagi, Masanari Taniguchi, Hiroshi Inoue, Hiroyuki Ishida: "Bridge Phenomena in Slow Opening Electric Contacts in a State of Thermal Equilibrium Condition", 電子情報通信学会機構デバイス研究会技術研究報告書, EMD2004-29, pp.45-48(Sep. 2004)
- [8] Tasuku Takagi, Masanari Taniguchi, Hiroshi Inoue and Hiroyuki Ishida: "Thermal Flow Analysis From Bridge Between Contacts", 電子情報通信学会機構デバイス研究会技術研究報告書, EMD2004-13, pp.1-4(June 2004)
- [9] Hiroyuki Ishida, Masanari Taniguchi, Hideaki Sone, Hiroshi Inoue, Tasuku Takagi: "Relationship Between Length and Diameter of Contact Bridge Formed under Thermal Equilibrium Condition", Proc. of the IS-EMD2004(Technical Report of IEICE), EMD2004-78, pp.47-53(Oct.2004) Chitose
- [10] Tadashi Murakami, Torazou Yoshimura: "Statics of Structures", Corona Publishing Co., Ltd(1968)