

令和元年6月17日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(B) (特設分野研究)

研究期間：2016～2018

課題番号：16KT0107

研究課題名(和文)断線を自ら診断し自己修復する金属配線

研究課題名(英文)Metal interconnect with self-healing and self-diagnosis abilities for crack

研究代表者

岩瀬 英治 (Iwase, Eiji)

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：70436559

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、金属配線と金属ナノ粒子を含む液体のハイブリッド構造を利用することにより、断線の自己診断能および選択的修復能を併せ持つ電気配線の実現およびそのデバイス実証を行った。まず、自己修復の際の電流電圧条件に着目した結果、高電圧・小電流条件において、大きな幅の断線を修復できることを明らかにした。また、自己修復配線の電子デバイス応用として、伸展可能なフレキシブルLEDデバイスの実証実験を行い、27%の伸展において断線した配線を3.4秒後に修復できることを確認した。これら研究結果から、自己修復配線の電子デバイスへの応用を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により可撓性だけでなく伸縮性・自己修復性を有するデバイスという新たな領域が一気に開拓することができる。例えば、湿布状の皮膚貼付け型フレキシブルセンサシートや伸縮可能なフレキシブルディスプレイが実現可能となると考えている。高伸縮耐性という性質は、使用時に伸縮性が必要な場面に用途が限定されるわけではなく、例えば自由曲面に貼り付ける用途には必要となるため産業上の波及効果が大きく、社会的意義の高いものであると考えている。また、産業応用や社会的意義だけでなく、水着や飛行機の翼面、野球のボールの表面などに流速センサを貼り付け、流体からの力を計測するなど学術的な現象解明のための利用も大いに考えられる。

研究成果の概要(英文)：In this project, we have developed a self-healing electric interconnect using a solid metal electrode and a solvent with metal nano-particles to realize selective self-healing. First, we focused on a voltage-current condition at self-healing. As a result, we clarified that wide crack can be healed by high voltage and small current condition. Then, as of the self-healing application, we assembled stretchable LED device with the self-healing electric interconnect. We confirmed that the electric interconnect was cracked at 27% stretching deformation, and could be healed then after 3.4 seconds. In conclusion, we have shown that the self-healing electric interconnect can be applied electronic devices.

研究分野：マイクロマシン・MEMS

キーワード：フレキシブルデバイス 自己修復

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

これまでの伸縮配線としては、導電性材料をゴム材料やゲル材料に混ぜた導電性ゴムが研究されている。しかしながら、導電性ゴムの導電率は金属に比べて  $10^3$  以上低く、ジグザグ形状にした金属は伸縮性に限界があるだけでなく、伸縮の繰り返しによる疲労破壊の懸念がある。高導電率を考えると金属材料を利用するのが良いが、金属を用いて高伸縮耐性(すなわち伸縮による破断および伸縮の繰り返しによる疲労破壊がないこと)を解決できている報告はこれまでになかった。

また、「自己修復」という用語としては、自己修復性高分子の研究が多く行われている。これは、高分子の分子構造が元に戻ることを目指したものである。これに対し本研究提案は、構造よりは導電性という機能が元に戻ることを目指したものであるため「自己修復」の意味が異なる。自己修復性高分子に導電性材料を混ぜた「自己修復性導電性ゴム」もあるが、やはり導電性が低いという課題があった。

### 2. 研究の目的

そこで本研究では、金属配線と金属ナノ粒子を含む液体またはゲルのハイブリッド構造を利用することにより、断線の自己診断能および選択的修復能を併せ持つ電気配線の実現およびそのデバイス実証を目的とした。非一様な電界中において、金属ナノ粒子は電界の強い領域に集まる。これを電界トラップと呼ぶが、本研究はこれをうまく活用することで、断線した場合に断線部のみを選択的に修復する「自己修復型金属配線」を目指すものである。

基本構造は図1に示すように、柔軟基板上に金属の配線部とそれを覆うように金属ナノ粒子を含む液体またはゲルを配置した構造である。曲げや伸びによって金属配線部に断線(クラック)が生じた場合、配線に印加されている電圧により断線部のみ電界が生じる。この電界による電界トラップにより、金ナノ粒子が断線を架橋し配線が修復される。断線によって生じる電界を用いているため、センサなどを用いずとも断線の自己診断能を有している。また、断線が修復すると電界は消失するため、過度の修復は行わないという選択的修復能も有する。この自己修復機能により、電気配線として高い導電率(電気伝導率)でかつ高い伸縮耐性を持つことが期待できる。この自己修復型金属配線を用いた伸縮可能なフレキシブルデバイスへの応用研究を行う。

### 3. 研究の方法

金属ナノ粒子の電界トラップを用いた金属配線の自己修復に関しての原理検証はすでに済んでいるが、断線の一部しか修復できないこと、修復電圧に制約があることなど「自己修復型金属配線」としてまだ十分でない点が多い。そのため、本研究では自己修復能の拡張を目的として、基礎的・学術的な研究を行った。具体的には、材料液体封止の検討、幅の大きな断線を修復するための修復電圧の検討を行った。また、フレキシブルデバイスをターゲットデバイスとして応用デバイスの実証を行った。

### 4. 研究成果

#### (1) 材料・液体封止の検討:

材料・液体封止の検討に関しては、まずアガロースゲルを用いたゲル化とシリコンオイルを用いた不揮発性溶媒化の2つを検討した。いくつかの条件(例えば、直径 5 nm 金ナノ粒子分散水

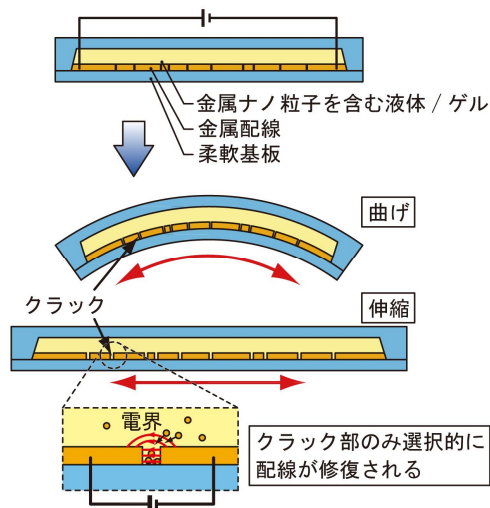


図1 柔軟基板上に金属配線とそれを覆うように液体を配置した自己修復機能を有する伸縮配線の基本構造

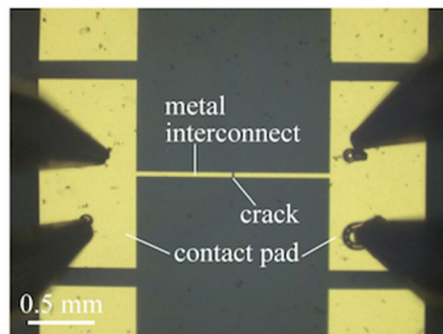


図2 自己修復配線の実験系

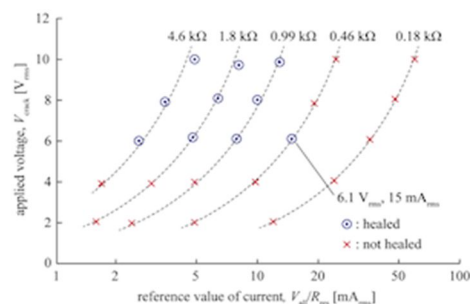


図3 印加電圧・電流と自己修復性の関係

溶液を 0.1% アガロースゲルでゲル化したもの)では修復が確認されたものの、修復時間が長くなる、修復する・しないなどが安定しないなどの問題があった。一方で、これまで用いてきた金ナノ粒子分散水溶液に関しては、シリコンゴムおよびアクリルフォームシートで封止する手法を確立した。

### (2) 修復電圧の検討：

幅の大きな断線を修復するための修復電圧の検討としては、修復の際に印加する電流・電圧条件を変えて、自己修復性能の評価を行った。まず、図 2 に示すように、30  $\mu\text{m}$  の金配線に幅 10  $\mu\text{m}$  を作製した。そこに、金ナノ粒子分散を滴下して、電圧を変化させながら交流信号(周波数 100 kHz)を入力した。図 3 に、デバイスに流れる電流と、印加電圧、修復の可否の結果を示す。図 3 に示すように、実効電圧  $V_{\text{rms}} = 6 \text{ V}_{\text{rms}}$  以上かつ、実効電流  $I_{\text{rms}} = 15 \text{ mA}_{\text{rms}}$  以下であれば、断線した電極を修復できることが判明した。自己修復と電圧・電流の関係を明らかにするため、(i) 低電圧 ( $V_{\text{rms}} < 6 \text{ V}_{\text{rms}}$ )、(ii) 高電圧 ( $V_{\text{rms}} > 6 \text{ V}_{\text{rms}}$ )・大電流 ( $I_{\text{rms}} > 15 \text{ mA}_{\text{rms}}$ )、(iii) 高電圧 ( $V_{\text{rms}} > 6 \text{ V}_{\text{rms}}$ )・小電流 ( $I_{\text{rms}} < 15 \text{ mA}_{\text{rms}}$ ) の条件下において、自己修復箇所である断線部を顕微鏡で観察した。図 4 に示すように、(i) 低電圧 ( $V_{\text{rms}} < 6 \text{ V}_{\text{rms}}$ ) の条件では、ナノ粒子が泳動されず、自己修復が生じないことがわかる。また、図 5 に示すように、(ii) 高電圧 ( $V_{\text{rms}} > 6 \text{ V}_{\text{rms}}$ )・大電流 ( $I_{\text{rms}} > 15 \text{ mA}_{\text{rms}}$ ) の条件では、自己修復が実現できたが、修復直後に大電流によるジュール熱が発生して、気泡が発生し、修復した電極が破壊することが判明した。一方、図 6 に示すように、(iii) 高電圧 ( $V_{\text{rms}} > 6 \text{ V}_{\text{rms}}$ )・小電流 ( $I_{\text{rms}} < 15 \text{ mA}_{\text{rms}}$ ) では、気泡が発生せず電極を修復できることがわかった。この結果から、自己修復には最適な電圧と電流が必要であることがわかった。

本研究を着手前には、修復可能な断線の幅が 4  $\mu\text{m}$  までに限定されていたものが、本結果により幅 30  $\mu\text{m}$  程度の大きな幅の断線も修復できるようになった。これは、修復が可能な断線の幅が従来の 7.5 倍程度大きくなったという“量的に”大きな成果であるだけでなく、フレキシブルデバイスにおいて伸展時に自然に生じる断線の幅が 10  $\mu\text{m}$  程度であり、これを超えたことからデバイス応用に耐えうる自己修復能を実現したという“質的に”大きな成果であるといえる。すなわち、これまでフレキシブルデバイスの伸展により配線が断線した後、伸展を戻さないで修復ができなかったものが、伸展による破断後そのままの状態でも修復が開始されるという大きな違いを有する。

### (3) 応用デバイス実証：自己修復機能を有する伸展可能なフレキシブル LED デバイス

前述の成果を踏まえて、自己修復配線の応用デバイスの実証として、図 7 に示すように、自己修復配線を使用した伸展可能なフレキシブル LED デバイスを作製した。一例としては、交流電圧を印加して LED が点灯しているデバイスに応力を印加して 27% 伸展させたところ、配線が断

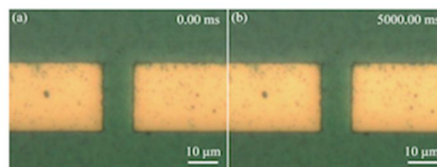


図 4 低電圧条件 ( $V_{\text{rms}} < 6 \text{ V}_{\text{rms}}$ ) における断線部の観察

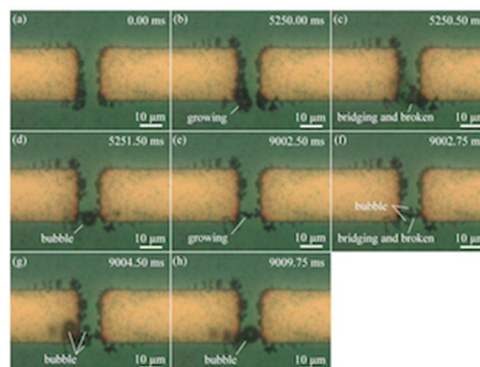


図 5 高電圧 ( $V_{\text{rms}} > 6 \text{ V}_{\text{rms}}$ )・大電流 ( $I_{\text{rms}} > 15 \text{ mA}_{\text{rms}}$ ) 条件における断線部の観察

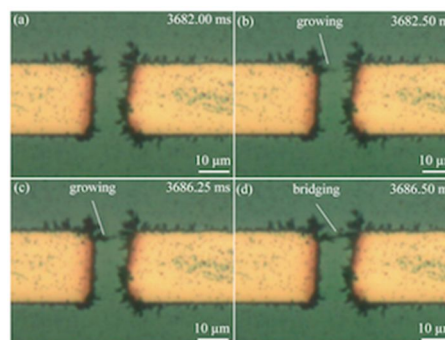


図 6 高電圧 ( $V_{\text{rms}} > 6 \text{ V}_{\text{rms}}$ )・小電流 ( $I_{\text{rms}} < 15 \text{ mA}_{\text{rms}}$ ) 条件における断線部の観察

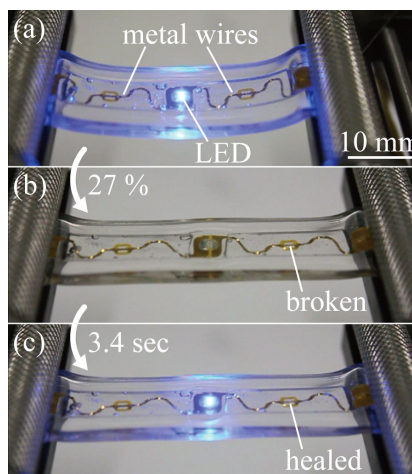


図 7 自己修復機能を有する伸展可能なフレキシブル LED デバイス。(a) 開始直後、(b) 27% 伸展時(断線時) (d) 3.4 秒後(修復時)

線し、LEDが一時的に消灯するとともに、インピーダンスは10倍以上増大した。その3.4秒後に、自己修復機能により導通が回復して、LEDが再点灯するとともにインピーダンスは低下した。また、自己修復は一度だけではなく、50回以上の繰り返し修復可能であることも確認できた。一連の状況において、印加している交流電圧は切り替え等を行わず一定であり、このことは正常時にはLEDの点灯に電力が消費され、配線断線時には自己修復に電力が消費されているという、電力消費箇所の自動スイッチングが行われていることも大きな特徴であると考えている。このように自己修復配線の電子デバイスへ応用できることを示した。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計4件)

- [1] Tomoya Koshi, **Eiji Iwase**, “Crack-Configuration Analysis of Metal Conductive Track Embedded in Stretchable Elastomer,” *Micromachines*, vol. 9, issue 3, 130 (12 pages), March 15, 2018.
- [2] Tomoya Koshi, Yuta Nakajima, **Eiji Iwase**, “Voltage and Current Conditions for Nanoparticle Chain Formation using Dielectrophoresis,” *Micro & Nano Letters*, vol. 12, issue 8, pp. 532 – 535, August, 2017.
- [3] 古志知也, **岩瀬英治**, “伸縮性電気配線および自己修復機能を有する金属配線,” *接着の技術*, vol. 37, no. 2, pp.21-25, 2017.
- [4] 古志知也, **岩瀬英治**, “自己修復型金属配線と伸縮デバイス応用,” *応用物理*, vol. 86, no. 12, pp. 1061-1064, 2017.

〔学会発表〕(計17件)

- [1] 武鎗彰良, 古志知也, **岩瀬英治**, “非一様交流電界下におけるイオン液体に分散した金属ナノ粒子の挙動観察, Motion Observation of Metal Nanoparticles in Ionic Liquid under Nonuniform AC Electric Field,” *日本機械学会 関東支部第25期総会・講演会*, 18A13, 習志野, 千葉, March 18-19, 2019.
- [2] 村瀬和希, 古志知也, **岩瀬英治**, “パリレン被膜したエラストマの水分透過率の評価, Evaluation of Water Permeability for Parylene Coated Elastomer,” *日本機械学会 関東学生会 第58回学生員卒業研究発表講演会*, 808, 習志野, 千葉, March 18, 2019.
- [3] 古志知也, **岩瀬英治**, “繰り返し伸縮変形下における自己修復型金属配線の修復特性の評価, Healing Property Evaluation of Self-Healing Metal Conductive Track under Cyclic Stretching Deformation,” *日本機械学会 第9回マイクロ・ナノ工学シンポジウム*, 30am3-PN-59, 札幌, 北海道, October 30- November 1, 2018.
- [4] 佐藤峻, 古志知也, **岩瀬英治**, “粘着性弾性体による押し付け圧力を利用した非加熱型電子部品実装手法の提案, Proposal of Electric Component Mounting Method without Heating using Contact Pressure by Elastic Adhesive,” *日本機械学会 第9回マイクロ・ナノ工学シンポジウム*, 30pm4-PN-58, 札幌, 北海道, October 30- November 1, 2018.
- [5] 黄平, 古志知也, **岩瀬英治**, “金属ナノ粒子の電界トラップにおける電解質濃度による粒子流れの影響, The Influence of Electrolyte Concentration to Metal Nanoparticle Flow under Electric Field Trapping Phenomenon,” *平成30年 電気学会E部門 総合研究会*, MSS-18-22, 奈良, 奈良, July 12-13, 2018.
- [6] 武鎗彰良, 古志知也, **岩瀬英治**, “電界トラップによる金ナノ粒子の架橋構造における架橋形態の分類, Classification of Gold Nanoparticle Bridging Structures formed with Electric Field Trapping,” *日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会*, 1P2-L08, 北九州, 福岡, June 2-5, 2018.
- [7] 長村透, 古志知也, **岩瀬英治**, “高電圧条件下における誘電泳動力を用いたナノ粒子鎖形成, Nanoparticle Chain Formation using Dielectrophoresis under High Voltage Condition,” *日本機械学会 関東支部第24期総会・講演会*, OS0304, 調布, 東京, March 17-18, 2018.
- [8] 古志知也, Löher Thomas, **岩瀬英治**, “伸縮基板上的波形状金属配線に生じるき裂の観察, Crack Observation of Wave-shaped Metal Track on Stretchable Substrate,” *日本機械学会 第8回マイクロ・ナノ工学シンポジウム*, 31am3-PN-5, 広島, 広島, October 31- November 2, 2017.
- [9] 石井智之, 古志知也, **岩瀬英治**, “伸縮基板の剛性と波状金属配線の形状による配線の伸縮性の設計と評価, Design and Evaluation of Wire Stretchability using Stiffness of Substrate and Wave Shape of Metal,” *日本機械学会 第8回マイクロ・ナノ工学シンポジウム*, 01am2-PN-61, 広島, 広島, October 31- November 2, 2017.

- [10] 石井智之, 朴致濟, 古志知也, **岩瀬英治**, “伸縮電子デバイスのための金属部と基材部の剛性比を用いた伸縮耐性の向上,” *日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会*, 1P2-K10, 郡山, 福島, May 10-13, 2017.
- [11] 細谷航平, 古志知也, **岩瀬英治**, “金属ナノ粒子の電界トラップを用いた配線修復における周波数依存性, Frequency Dependency on wire Healing using Electric Field Trapping of Metal Nanoparticles,” *日本機械学会 関東学生会 第56回学生員卒業研究発表講演会*, 1309, 葛飾, 東京, March 16, 2017.
- [12] 黒木雄也, 古志知也, **岩瀬英治**, “伸縮基板上の金属配線におけるき裂の発生形態, Crack Configuration of Metal Wire on Stretchable Substrate,” *日本機械学会 関東学生会 第56回学生員卒業研究発表講演会*, 1315, 葛飾, 東京, March 16, 2017.
- [13] Tomoya Koshi, **Eiji Iwase**, “Stretchable Electronic Device with Repeat Self-Healing Ability of Metal Wire,” *Proceedings of the 30th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS2017)*, pp . 262-265, Las Vegas, Nevada, USA, January 22-26, 2017.
- [14] **岩瀬英治**, “硬く高機能な材料を用いた柔らかく変形可能なデバイスの実現,” *プリンタブルデバイス実装研究会第2回公開研究会*, 文京区, 東京, December 16, 2016.
- [15] Tomoya Koshi, **Eiji Iwase**, “Voltage and Current Condition on Self-Healing Metal Wire,” *Proceedings of the International Symposium on Micro-Nano Science and Technology 2016 (MNST2016)*, SuP2-B-3, Tokyo, Japan, December 16-18, 2016.
- [16] Yuta Nakajima, Tomoya Koshi, **Eiji Iwase**, “Healing Process Behavior on Electric Field Trapping of Gold Nanoparticles,” *Proceedings of the International Symposium on Micro-Nano Science and Technology 2016 (MNST2016)*, SaP-2, Tokyo, Japan, December 16-18, 2016.
- [17] **岩瀬英治**, “硬く高機能な材料を用いた柔軟フレキシブルデバイスの実現,” *エレクトロニクス実装学会 2016 ワークショップ*, 伊豆, 静岡, October 13-14, 2016.

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計1件)

名称：Self-Repairing Wiring and Stretchable Device  
 発明者：Eiji Iwase, Tomoya Koshi,  
 権利者：Waseda University  
 種類：特許 (アメリカ)  
 番号：US 2016/0360612 A1  
 公開年：2016年12月8日  
 国内外の別： 国外

取得状況 (計2件)

名称：自己修復型配線及び伸縮デバイス  
 発明者：岩瀬英治, 古志知也,  
 権利者：早稲田大学  
 種類：特許  
 番号：特許第 6507148 号  
 取得年：2019年4月5日  
 国内外の別： 国内

名称：Self-Repairing Wiring and Stretchable Device  
 発明者：Eiji Iwase, Tomoya Koshi,  
 権利者：Waseda University  
 種類：特許 (中国)  
 番号：CN 106031312B  
 取得年：2019年5月21日  
 国内外の別： 国外

〔その他〕

- [1] 【Web記事】日経 xTECH (クロステック) 2018/02/05(月) 『断線部分を自己修復する金属

配線と伸縮デバイスへの応用』

- [2] 【新聞記事】読売新聞 2017/04/16(日) 17 面 サイエンス View 『自己修復 まるでいきもの  
~傷ついても へっちゃら』
- [3] 【ホームページ】<http://www.iwaselab.amech.waseda.ac.jp/>

6 . 研究組織

(1) 研究代表者

研究代表者氏名：岩瀬英治

ローマ字氏名：Eiji Iwase

所属研究機関名：早稲田大学

部局名：基幹理工学部 機械科学・航空学科

職名：教授

研究者番号 ( 8 桁 ) : 70436559

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。