

令和 3 年 6 月 2 日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2020

課題番号：18K13653

研究課題名(和文)電子流による金属ファインインジェクション：超長ファインマテリアルの創製と展開

研究課題名(英文)Fine Injection Technique by high density electron flow: Fabrication of Super-long fine material

研究代表者

木村 康裕(Kimura, Yasuhiro)

名古屋大学・工学研究科・助教

研究者番号：70803740

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、微細径を有する金属ファインワイヤ創製を実現するため、高密度電子流による原子拡散であるエレクトロマイグレーションを活用した、既存ワイヤ創製技術と異なる新技術である金属ファインインジェクション技術創出の基礎検討に着手した。電子流印加のみで高圧力を誘起する機構設計、金属ファインワイヤの射出条件最適化と創製、創製ファインワイヤの組織分析、からなる3つの課題を解決し、本技術の実現可能性を示唆する成果を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ファインワイヤは比表面積の大きさによる化学的反応性の促進効果や良好な物理的特性を示すことから、化学センサーや光回路における導波路などの各デバイスにおける性能向上に貢献する機能材料として用いられる。本研究により新規開拓された新たなファインワイヤ創製技術は、創製されるファインワイヤの多様性を拡張するものである。具体的には、これまで実現困難な材料でのワイヤ創製、ワイヤの直径・長さ制御などを可能にする。

研究成果の概要(英文)：This work has started a basic attempt of metallic fine injection technology, that is a new growth technology different from the existing fine wire growth technology, by utilizing electromigration. Electromigration is a physical phenomenon of atomic diffusion with high density electron flow. In order to grow a metallic fine wire with fine diameter, following three problems have been solved and thus we suggested the potential of this new technology: the design of the system to induce high pressure only by applying electron flow; the optimization of fabrication conditions and fabrication of metallic fine wires; and the investigation of crystal structure of a fine wire.

研究分野：機械材料・材料力学

キーワード：機械材料・材料力学 原子拡散 エレクトロマイグレーション 金属ファインワイヤ

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、研究者個人に帰属します。

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

マイクロ・ナノサイズの微細材料であるファインマテリアルに関する研究発展は著しく、近年ではファインマテリアル特有の優れた物理的諸特性や比表面積の大きさを利用した化学センサやヒートシンクなどの応用例が報告されている。機械材料としては、航空機などの輸送機における燃費性能向上などによる軽量化ニーズの高まりから、炭素をはじめとした非金属ファインマテリアルによる強化樹脂が広く用いられるようになってきた。一方、金属は耐熱性や展延性・焼結性に富んだ加工性の高さに加え、体積強度比、環境負荷の少ないリサイクル性、補修性などの特徴を有しており、依然として金属が必要とされる用途は多く、最近では金属材料が再評価されてきている。

金属ファインマテリアルの一つとして、ウイスカに代表される 1 次元金属ファインワイヤがある。金属ファインワイヤは、その極細さゆえ強度低下の原因となる結晶欠陥が少ない単結晶構造を有し、「軽くて強い」という特徴によりエネルギー・資源枯渇の問題を解決する新たな機械材料として期待されている。しかし現在では非金属と同様に強化樹脂としての利用に留まっており、革新的材料が創出できているとは言い難い。理由の一つとしては、ファインワイヤの特徴である単結晶構造を有したまま超長なファインワイヤの創製が未達成であることに由来する。このシンプルな問いに対する解として、単結晶超長ファインワイヤを創製できれば、束ねることによって高強度な 1 次元ワイヤロープとしての利用や編み込むことによる 2 次元の布としての利用、それを成形加工することによる 3 次元構造物への適用が期待できる。しかし現在の機械材料としての利用は限定的で、金属ファインマテリアル特有の特徴を有したままのスケールアップが困難との理由から、我々が生活するマクロな世界へ適用できているとはいえない。

### 2. 研究の目的

本研究では金属ファインマテリアルのスケールアップを実現し、極細な径とメートル級の長さを実現する、既存のファインマテリアル創製手法と全く異なる新たな創製基盤となる金属ファインインジェクション技術創出を目指す。

### 3. 研究の方法

本研究課題の核は、申請者のこれまでの研究成果を踏まえて考案した射出機構の開発である。エレクトロマイグレーション(以下 EM)と呼ばれる金属原子の拡散現象に起因した原子蓄積による高圧力(高圧縮静水圧応力)を利用することで、高密度電子流を印加するだけで金属を極細孔より射出できる射出機構を製作し、基礎検討を実施した。3 年計画として、(1)射出機構の開発、(2)金属ファインワイヤの射出条件最適化と創製、(3)創製ファインワイヤの組織分析、なる 3 項目の研究を総合することで、ファインマテリアルのスケールアップを狙った射出機構の実現可能性を検討した。

### 4. 研究成果

#### (1) 射出機構の開発

平成 29 年度研究活動スタート支援にて実施した低融点材料 Sn を用いた射出機構の基礎検討を進展させ、新たに Al を対象とした射出可能性を検討した。Al を挿入する筒(キャピラリ)に SUS304 もしくはガラスを用い、射出孔として Si メッシュウエハを先端に装着した実験系を新規に構築した。SUS304 系では射出の兆候は見られたが、Al 原子がワイヤとして成長するほど射出することはなく、射出孔付近に留まっていた。これは Al と SUS304 が電流印加に伴うジュール発熱により金属間化合物(IMC)を形成し、電子流による射出を阻害したためと考えられる。ゆえに Al と IMC を作らないキャピラリの選定が必要となり、ガラスを用いた実験系を考案し検証した。その結果、IMC を作らずワイヤとして成長できるほど多くの Al 原子を射出できる射出機構の開発に初めて成功した。

原子蓄積と対で発生する原子損失が生じて連続した通電ならびに射出を可能とする、導電性 TiN 膜(80 nm 程度の膜厚)のガラスキャピラリへの被覆を原子層堆積法により実施し、成膜の実現可能性と射出機構への有効性を確かめた(図 1)。

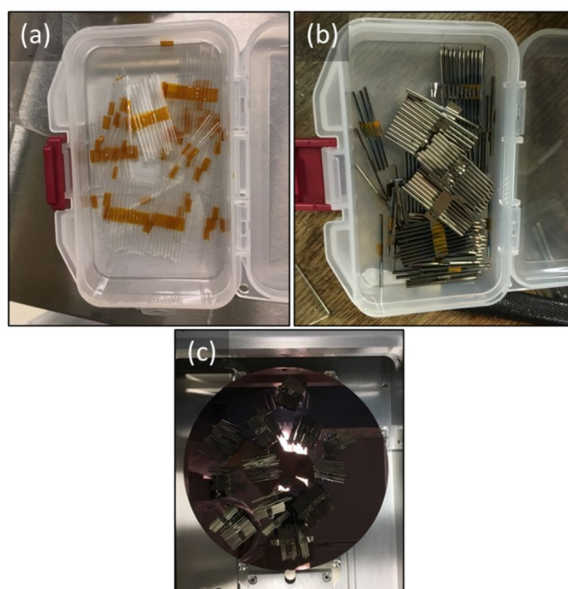


図 1 原子層堆積法により成膜した TiN 膜

原子蓄積に起因した静水圧応力生成予測手法について、新たな理論基盤を構築した。ここでEMにより生じる静水圧応力は原子濃度に対応することが知られている。そこでインジェクション機構への適用が期待できる、保護膜付き金属配線の任意形状における原子濃度  $N$  分布の計算手法を、電位  $\phi$  とのアナロジーに着想を得て提案することに成功した(図2)。

### (2) 金属ファインワイヤの射出条件最適化と創製

金属ファインワイヤのための射出孔、原子拡散の駆動力である電流密度および原子拡散が熱活性化過程であることによる外部温度の2つを射出条件と定め、これらの条件と射出の関係性を調査した。射出孔の大きさは射出速度に大きな影響を与えることがこれまで経験的にわかっていたが、その定量化および理論式の構築は実施されていなかった。様々な射出孔に対して射出速度を実測することでその傾向を理解し、流体力学における拡大管・縮小管とのアナロジーにより、定式化に成功した(図3)。

電流密度に依存して射出速度は増加し、さらに外部温度にも大きく影響されることを確認した。加えてワイヤ射出に要する配線周りの拘束材料が有する残留応力がワイヤ創製に及ぼす影響を調査し、活性化エネルギー変化の観点から考察を行うことで、射出条件最適化に係る方針策定に資するさらなる成果を得た(図4)。

### (3) 創製ファインワイヤの組織分析

創製したファインワイヤについて、透過型電子顕微鏡(TEM)を用いた組織分析を行った。創製したファインワイヤに対して集束イオンビームを用いた試料薄片化を実施し、電界放射型TEMによる明視野像・制限視野電子線回折像・高分解能像・低角度散乱暗視野法によるLAADF像の取得および解析に成功した。これらの結果を踏まえ、本研究にて創製したファインワイヤには従来報告がない多結晶構造またはアモルファス構造を有することを確認した。以上は射出条件および射出機構の構造条件に左右されると示唆され、ファインワイヤの新たな結晶組織制御の可能性を提示する成果を得た。

#### < 引用文献 >

Yasuhiro Kimura and Masumi Saka, Prediction of electromigration critical current density in passivated arbitrary-configuration interconnect, *Journal of Electronic Packaging*, **141** (2019) 021008.

Yasuhiro Kimura, Loss in discharging atoms through artificial hole for fabricating metallic micro/nanowire by electromigration, *Mechanical Engineering Journal*, **6** (2019) 18-00269.

Yasuhiro Kimura and Yang Ju, Residual stress effect governing electromigration-based free-standing metallic micro/nanowire growth behavior, *Applied Physics Letters*, **116** (2020) 024102.

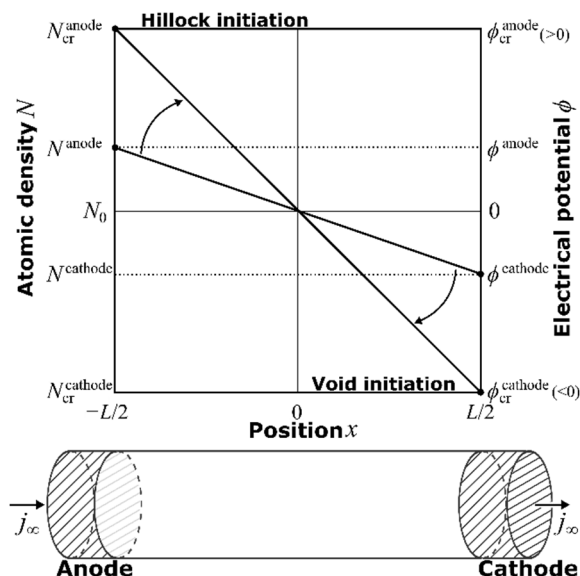


図2 電位  $\phi$  とのアナロジーに基づく原子濃度  $N$  (静水圧応力に対応)の予測手法の概要(文献)

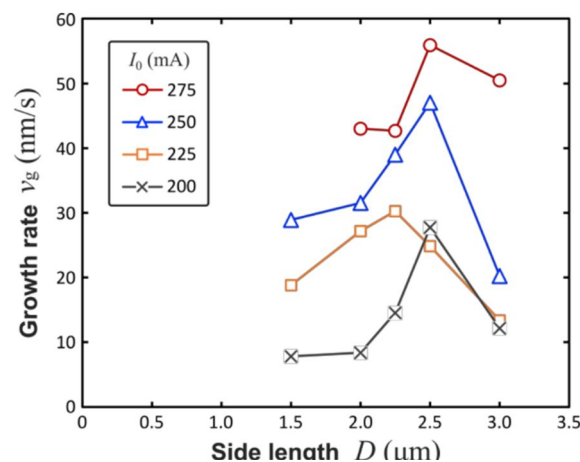


図3 射出孔径  $D$  がワイヤ射出速度  $v_g$  に及ぼす影響調査(文献)

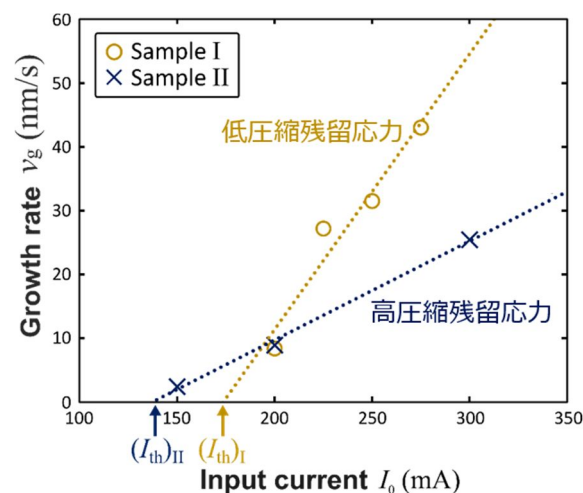


図4 拘束材料内残留応力がワイヤ射出に及ぼす影響調査: 射出速度  $v_g$ -印加電流  $I_0$  グラフ(文献)

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Kimura Yasuhiro, Ju Yang	4. 巻 116
2. 論文標題 Residual stress effect governing electromigration-based free-standing metallic micro/nanowire growth behavior	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 024102(1)-(5)
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/1.5131710	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yasuhiro KIMURA	4. 巻 6
2. 論文標題 Loss in discharging atoms through artificial hole for fabricating metallic micro/nanowire by electromigration	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Mechanical Engineering Journal	6. 最初と最後の頁 18-00269(1)-(9)
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1299/mej.18-00269	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Yasuhiro Kimura, Masumi Saka	4. 巻 141
2. 論文標題 Prediction of electromigration critical current density in passivated arbitrary-configuration interconnect	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Electronic Packaging	6. 最初と最後の頁 021008(1)-(7)
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1115/1.4042980	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kimura Yasuhiro	4. 巻 157
2. 論文標題 Irregular bending growth of free-standing Al microwire by electromigration	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Acta Materialia	6. 最初と最後の頁 276-287
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.actamat.2018.07.026	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 1件／うち国際学会 0件）

1. 発表者名 Yasuhiro Kimura
2. 発表標題 Atomic migration-based micro/nanomaterial growth technique
3. 学会等名 JST Sakura Science Plan Workshop (Tohoku U - Xi'an Jiaotong U) (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 木村康裕、巨陽
2. 発表標題 高密度電子流による原子集積を利用した金属マイクロ・ナノワイヤの成長挙動解明
3. 学会等名 日本機械学会材料力学部門 M&M若手シンポジウム2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 木村康裕，坂真澄
2. 発表標題 エレクトロマイグレーションの原子集積に伴う局所的高応力場のマイクロ・ナノワイヤ創製への応用
3. 学会等名 日本機械学会 M&M2018材料力学カンファレンス
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 深谷信太郎，木村康裕，坂真澄
2. 発表標題 エレクトロマイグレーションによるマイクロ・ナノ材料創製
3. 学会等名 日本機械学会 M&M2018材料力学カンファレンス
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

名古屋大学教員データベース  
[http://profs.provost.nagoya-u.ac.jp/view/html/100010348\\_ja.html](http://profs.provost.nagoya-u.ac.jp/view/html/100010348_ja.html)  
researchmap  
<https://researchmap.jp/7000020991>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------