

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 16 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26630002

研究課題名(和文) 金属細線周りの熱的境界条件の能動的制御と省エネルギー熱処理技術への応用

研究課題名(英文) Controlling Thermal Boundary Conditions around Metallic Thin Wire and Its Application of Energy-Saving Heat Treatment

研究代表者

燈明 泰成 (Tohmyoh, Hironori)

東北大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：50374955

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：金属細線に電流を付与して生じるジュール熱の利用に関し、電流付与下における金属細線周りの熱的境界条件を能動的に制御することで細線内部の温度分布を自在に操作することを可能にし、これを利用して金属細線を省エネルギーで熱処理することを可能にした。具体的に、理論モデルより決定した条件下でCuマイクロ細線に一定直流電流を付与したところ、従来法と比較して極短時間で結晶粒成長が認められ、さらに微小区間曲げ試験を実施して確かに当該細線が軟化したことを確認した。

研究成果の概要(英文)：Regarding the utilization of Joule heat which is appeared in metallic thin wire by supplying the current, the temperature distribution formed in thin wire under the current supply is controlled by changing the thermal boundary conditions around the wire, and this knowledge is used for energy-saving heat treatment of thin wire. The current, which was decided from the theoretical model developed, was supplied into the Cu microwire and the rapid growth of crystal grains of the microwire was successfully observed. Furthermore, the small-span bending test of the heat-treated microwire was performed, and it was confirmed that the microwire was surely softened by the heat treatment with the current.

研究分野：工学

キーワード：金属細線 熱的境界条件 熱処理 省エネルギー 降伏荷重

1. 研究開始当初の背景

金属ナノワイヤ等、様々な元素の微細材料が合成・作製され、いよいよその利用が真に期待されている。これら微細材料を有効に活用するにはバルク材料と同様な種々の周辺技術を完備する必要がある。例えば微細材料は脆性的であることが知られており (M.D. Uchic, *et al.*, *Science* 305, 2004, 986)、加工性を向上させるためには当該細線を軟化させる必要がある。金属材料を軟化させる方策として熱処理があり、一般的には電気炉等を用いて行われるが、これには電力を大いに消費する。

ところで電流を付与することで細線の温度はジュール熱により容易に上昇する。研究代表者らはこれまでにジュール熱を用いた金属細線の溶接・切断手法を開拓してきており (H. Tohmyoh, *et al.*, *Scr. Mater.* 57, 2007, 953)、電流付与下における細線内の温度分布が周囲の熱的境界条件によって大いに変化することを報告している (H. Tohmyoh, *Appl. Phys. Lett.* 102, 2013, 084107)。研究代表者らは上述の知見に基づき、熱的境界条件を制御して細線内部の温度分布を操作することで、省エネルギーで細線の熱処理が実現できると着想した。

2. 研究の目的

本研究は電流付与下における金属細線周りの熱的境界条件を能動的に制御して細線内部の温度分布を自在に操作することを可能にし、これを利用して金属細線を省エネルギーで熱処理することを目的とする。具体的な熱処理として、脆性的な細線の一部を一様な高温度にして軟化させ、微小区間曲げ試験を実施することで軟化の効果を確認する。

3. 研究の方法

本研究計画は6項目に大別される。(1) 金属細線周りの熱的境界条件のモデル化では、両端をある熱容量の物質と接続された細線に一定直流電流を入力することにより、一定のジュール熱が生じる伝熱問題を考え、(2) 金属細線切断実験との照合、を行うことで理論モデルの妥当性を検証すると共に、(3) 金属細線内部温度の制御、を試みる。得られた知見に基づき、(4) 金属細線の局所的な軟化熱処理、を実現すると共に、(5) 組織観察による熱処理区間の検証、を行う。最終的に(6) 微小区間曲げ試験による軟化の確認、を行う。

4. 研究成果

(1) 金属細線周りの熱的境界条件のモデル化
断熱環境下に置かれた金属細線に一定直流電流を入力する伝熱問題を取り扱い、電流入出力点と接続された物質の熱容量が当該細線の温度上昇に大いに影響することを明らかにした。具体的に、金属細線が十分な熱容量を有する物質と接続された場合は細線内部の温度勾配が非常に小さくなることに着目し、当該細線が定常温度に達するまでの時間から算出した細線への総入力熱量から細線温度を解

析的に求めることに成功した。また、細線と接続された物質の熱容量が小さく、電流入出力点の温度が変化する場合、当該物質も含めた伝熱問題を考えることで、同様に細線温度を求めることが可能である。

通電両端の温度が異なる場合の伝熱問題について解析し、この場合は細線内に非対称温度分布が形成されること、また最大温度となる位置が両端温度の比に比例して変化することを明らかにした (図1)。以上の成果は金属細線の熱処理温度を決定する際に重要な知見である。

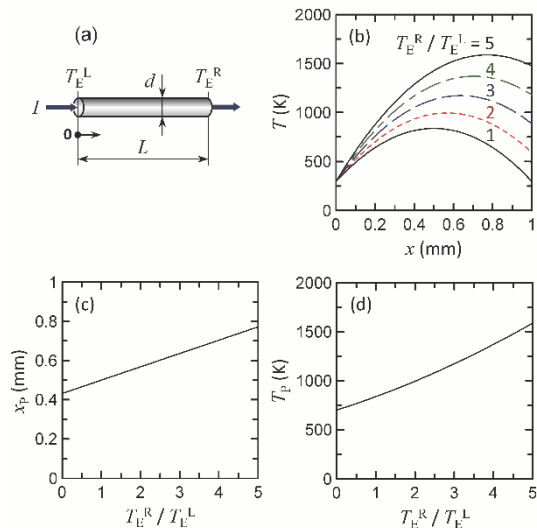


図1 両端の温度が異なる場合の細線内の温度分布：(a) 伝熱モデル, (b) 細線内温度分布, (c) 最大温度位置と両端の温度比との関係, (d) 最大温度と両端の温度比との関係

(2) 金属細線切断実験との照合

直径 25 μ m の Cu マイクロ細線を対象とし、Ag、W、HCS (高炭素鋼)、SUS304 製の異なる通電プローブを用いて当該細線を切断するのに要する電流値を調査した。同種材料の通電プローブを組み合わせて通電したところ、細線は中央で切断されたが、異種材料の通電プローブでは細線中央部以外で切断された (図2)。このことは通電プローブの材質で細線電流入出力点の温度が異なっていることを

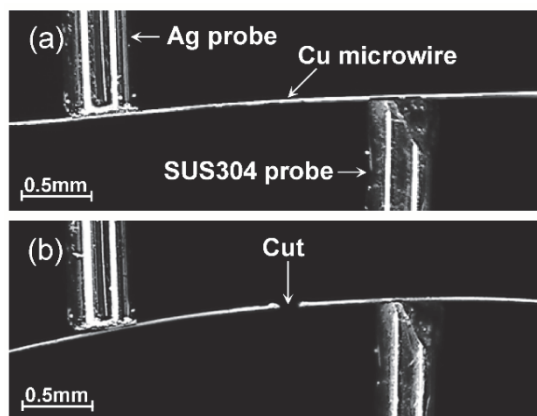


図2 異種材料の通電プローブを用いた細線の切断実験：(a) 通電前, (b) 通電後

示唆しており、電流入出力点と接続された物質が細線内部の温度分布に大いに影響を及ぼすことを明らかにした。また同種材料の通電プローブを用いた場合、細線を切断するのに必要な電流は Ag、W、HCS、SUS304 製の通電プローブを用いた場合の順に大きく、この順番は通電プローブの材質の熱伝導率と電気伝導率の積が小さくなる順に一致することを見出した。さらに真空環境下においても Cu マイクロ細線の切断実験を行い、断熱環境下では大気中よりも低い電流値で細線が切断することを確認した。

(3) 金属細線内部温度の制御

構築した理論伝熱モデルより、真空環境下において十分な熱容量を有する通電プローブを用いて、直径 $25\mu\text{m}$ の Cu マイクロ細線を 573K に昇温するのに必要な電流値を算出し、実際に真空環境下で通電した (図 3)。その結果、細線の結晶粒が通電区間で成長することが観察でき、構築した理論伝熱モデルの妥当性を確認した。

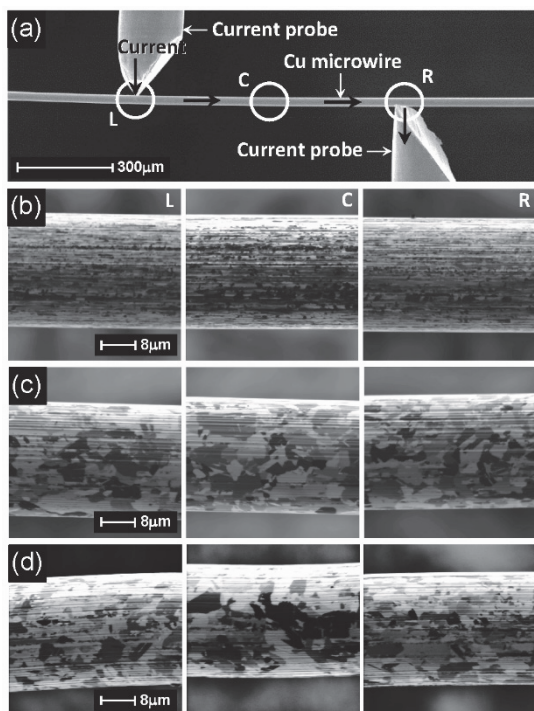


図 3 電流を用いた金属細線の熱処理: (a) 実験配置, (b) 通電前の結晶組織, (c) 10 秒, (d) 1 分間通電後の結晶組織 (Reprinted with permission from (1). Copyright (2015), The Japan Society of Applied Physics)

(4) 金属細線の局所的な熱処理

直径 $25\mu\text{m}$ の Cu マイクロ細線の通電時間と結晶粒成長について調査した (図 4)。結晶粒の大きさの指標として、細線を横断する線上の、単位長さ当たりの結晶粒界の数 (Ω) を用いた。その結果、電流を用いた本手法によれば、極短時間で熱処理が行えることが明らかとなった。具体的に、従来の加熱炉を用いた場合は Ω が飽和値に到達するのにおよそ 1 時間を要したのに対し、電流を用いた本手法

によればわずか 10 秒程度で Ω が同程度の飽和値に到達した。

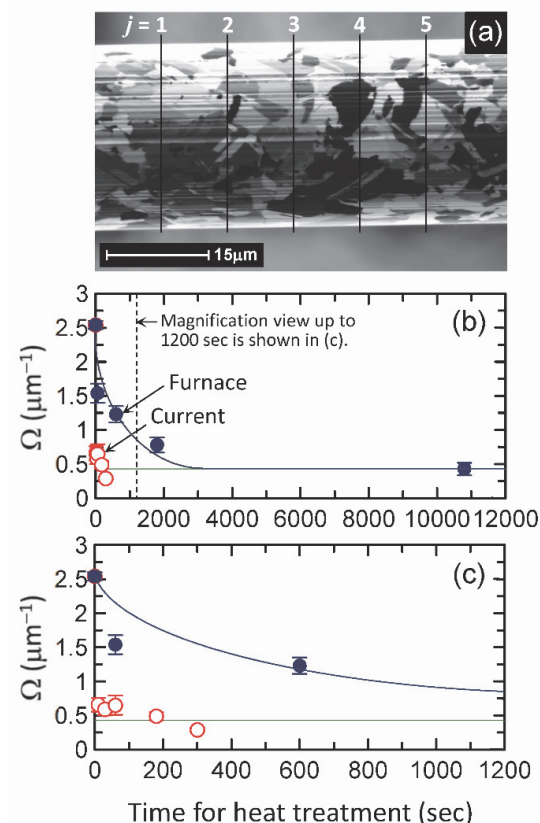


図 4 熱処理時間と結晶粒成長との関係: (a) 走査イオン顕微鏡像, (b) 電流を用いた本手法と従来の加熱炉を用いた場合の指標 Ω と加熱時間との関係 (Reprinted with permission from (1). Copyright (2015), The Japan Society of Applied Physics)

(5) 組織観察による熱処理区間の検証

直径 $25\mu\text{m}$ の Cu マイクロ細線の熱処理区間内の異なる位置において指標 Ω を算出したところ、通電端部付近と中央部とで Ω の値の相違は認められず、これより通電区間で均一な熱処理が行われたことを確認した。

値の異なる電流を用いて様々な温度で熱処理した Cu マイクロ細線の断面を観察し、結晶粒成長と熱処理温度との関係について調査した (図 5)。その結果、 373K なる比較的低い温度で当該マイクロ細線の結晶粒成長が飽和することを明らかにした。この知見は、上述の熱処理時間の知見と合わせて、本手法により極めて省エネルギーで金属細線が熱処理できることを示唆するものである。

(6) 微小区間曲げ試験による軟化の確認

顕微鏡観察下において、異なる温度で熱処理した Cu マイクロ細線の微小区間曲げ試験を実施して当該マイクロ細線の荷重-変位曲線を取得した。その結果、細線のヤング率は熱処理の前後で変化しなかったが、熱処理した細線の降伏荷重は未処理の細線のそれと比較して半分以下に、また降伏後の変位に対す

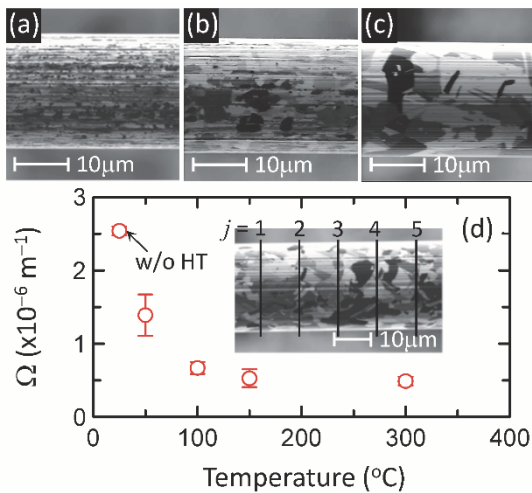


図5 熱処理温度と結晶粒成長との関係：(a) 未処理の組織，(b) 323 K，および(c) 573 K で熱処理した組織，(d) Ω と温度との関係

る荷重の増分が熱処理により大いに低下し、熱処理によりマイクロ細線が確かに軟化したことを確認した。特にわずか 323K の熱処理でも当該マイクロ細線が十分に軟化することが確認された点は特筆すべきである。

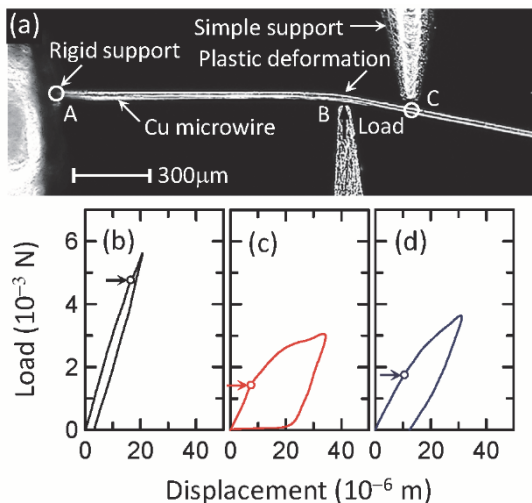


図6 Cu マイクロ細線の曲げ試験：(a) 試験の様子，(b) 未処理，(c) 323 K，および(d) 573 K で熱処理した細線の荷重-変位曲線

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計1件)

1. H. Tohmyoh, Y. Matsudo, Fast and Uniform Heating of Cu Microwires Using Electrical Current, Applied Physics Express, 査読有, Vol.8, 2015, 045503, 3 pages
DOI: 10.7567/APEX.8.045503

[学会発表] (計8件)

1. 松土陽平, 燈明泰成, 金属細線内に生じるジュール熱を用いた温度分布の制御と

熱処理への応用, 日本機械学会東北支部第51期総会・講演会, 2016年3月11日, 東北大学工学部青葉記念会館(仙台市).

2. 燈明泰成, 松土陽平, 電流付与下における金属極細線の微細結晶粒の成長について [日本機械学会機械材料・材料加工部門第93期部門表彰(優秀講演論文部門)受賞], 日本機械学会第23回機械材料・材料加工技術講演会(M&P2015), 2015年11月15日, 広島大学東広島キャンパス(東広島市).
3. H. Tohmyoh, Y. Matsudo, Structural Modification of Cu Microwires Having Nanosized Grains using Joule Heat, International Conference on Advanced Technology in Experimental Mechanics 2015 (ATEM'15), 2015年10月7日, Loisir Hotel Toyohashi (豊橋市).
4. 燈明泰成, 金属極細線の接合と機能の創出(招待講演), 平成27年度化学系学協会東北大会, 2015年9月13日, 弘前大学文京キャンパス(弘前市).
5. 燈明泰成, 藤森将太, マイクロスケール電位差法による白金極細線の溶接部の評価, 日本材料学会第64期通常総会・学術講演会, 2015年5月24日, 山形大学米沢キャンパス(米沢市).
6. 松土陽平, 燈明泰成, ジュール熱を用いたCuマイクロ細線の短時間熱処理に関する研究, 日本機械学会東北支部第50期総会・講演会, 2015年3月13日, 東北大学工学研究科・工学部機械系講義棟(仙台市).
7. 松土陽平, 燈明泰成, ジュール熱により熱処理した銅細線を用いたマイクロコイルの作製, 日本機械学会M&M2014材料力学カンファレンス, 2014年7月21日, 福島大学(福島市).
8. H. Tohmyoh, Elastic and Plastic Properties of Metallic Microwires Modified with Joule Heat (Invited), International Conference on Small Science (ICSS 2014), 2014年12月8日, Eaton Hotel, Kowloon (Kowloon, Hong Kong).

[その他]

ホームページ等

<http://king.mech.tohoku.ac.jp/saka/index.htm>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

燈明 泰成 (TOHMYOH, HIRONORI)
東北大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：50374955

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし