

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 5 月 20 日現在

機関番号：14101

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560877

研究課題名(和文)急速通電加熱を利用した金型の局所焼入れ法の実現に向けた開発研究

研究課題名(英文)Development research on realization of a method of local hardening of steel die using rapid resistance heating

研究代表者

牧 清二郎(MAKI, Seijiro)

三重大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：20124315

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：急速通電加熱を利用した金型の局所焼入れ法は、通電加熱での電極接触部における特異なジュール発熱を焼入れのための加熱に利用できないかと考案された方法である。本法の具体的実現に向けて、実現に対して支障となる問題の技術的解決策を探った本開発研究により、個々の適用に対して適切な通電条件を設定すれば本法による局所焼入れは可能であることを明らかにした。本研究により得られた知見は関連する国内の学会、国際会議において公表した。

研究成果の概要(英文)：A method of local hardening of steel die using rapid resistance heating is a local hardening method newly devised by focusing attention on unique characteristic of Joule heating at the electrode contact area in the resistance heating and considering its application to heating for local quench hardening of steel. The development research done for realization of the method by considering concrete measures against technical problems in its practical application made it appear that the local hardening is possible by setting the electrification condition suited to respective applications. All the findings obtained through this work were made public at relevant domestic and international conferences.

研究分野：工学

キーワード：熱処理 焼入れ 局所焼入れ 通電加熱 金型 ダイス鋼 火炎焼入れ鋼

1. 研究開始当初の背景

プレス成形用金型では局所的に耐摩耗性が要求されるものが多い。金型全体を焼入れすれば要求を満たせるが、経済的とは言えない。既存の局所焼入れ法として、火炎焼入れやレーザー焼入れがある。火炎焼入れでは熟練した技術が必要であるが、「若者の理科離れ、ものづくり離れ」による後継者不足で、技術の継承もおぼつかない。レーザー焼入れも、安全のための作業区画の確保、高い設備導入コストのため、中小の金型製造企業では導入に二の足が踏まれる。このような背景から、熟練した技術を必要とせず、設備投資が安価に済む焼入れ技術の開発が望まれる。これに応え得る一つの方法として、標題に掲げる焼入れ部分の加熱に通電加熱を用いる方法が考えられる。この方法は、研究代表者の加熱を必要とする材料加工への通電加熱の応用研究の中で見出された電極接触部での特異なジュール発熱現象を鋼の焼入れに必要な加熱に利用しようとするものである。

2. 研究の目的

本研究で扱う通電加熱局所焼入れ法に関しては、研究の開始時点において、高い実現の可能性が予備的実験により示唆されていた。そこで本研究では、本局所焼入れ法に係る下記の事項について、実験を主体とする研究を行い、それによって得られた知見を基に、装置を含めた具体的な方法の確立を目指すことにした。

- (1) 通電加熱における電極と被加熱体の接触部に生じるスパークの発生限界の究明。
- (2) スパークが発生しない通電条件での点焼入れにおける焼入れ特性の調査と最適操作条件の探索。
- (3) 電極材料の検討も含めた、安定した加熱実現のための通電制御方法の検討と検討結果に基づく実験装置の改良。
- (4) 点焼入れにおける電極接触部の焼入れ硬化の確認。
- (5) 点焼入れの連続化による線状焼入れや面状焼入れが可能かの確認。

研究の方法について述べる前に、具体的方法の確立を目指す通電加熱局所焼入れ法について、以下に簡単に説明する。

通電加熱は、被加熱体に直接電気を流し、ジュール発熱を利用して加熱する方法で、流す電流の密度にもよるが、1秒足らずの通電で被加熱体を1000以上に容易に加熱できる。

被加熱体の電極接触部での加熱状態について考えてみる。通電加熱における被加熱体と電極の接触状態は全面接触ではない。電極と被加熱体の接触面積率を $\varepsilon$ とし、接触部に公称電流密度 $i$ の電流が流れたとすると、公称電流密度は電極の公称接触面積 $S$ と流れた電流 $I$ により $i = I/S$ で与えられるので、被加熱体の電極接触部での単位体積、単位時間あ

たりの平均発熱量 $q$ は次式で与えられる。

$$q = \frac{ri^2}{\varepsilon} = \frac{r}{\varepsilon S^2} I^2 \quad (1)$$

ここで、 $r$ は電気抵抗率である。接触面積率 $\varepsilon$ は、電極と被加熱体のいずれかの低い降伏応力の関与のもとで、電極接触圧力 $p_c$ によって決まる。したがって、電極接触部での発熱量 $q$ は接触圧力によって大きく影響される。

鋼の焼入れでは、焼入れ部分をオーステナイト化温度にまで加熱する必要がある。本法では、上記の電極接触部の加熱特性を利用して、電極接触部を焼入れに必要なオーステナイト化温度にまで通電加熱によって加熱し、冷却過程においてマルテンサイト変態を起こさせ、電極接触部を局部的に硬化させる。

3. 研究の方法

図1に、通電加熱局所焼入れ実験の方法を模式図により示す。円柱状電極を被処理体である試験片に所定の圧力にて押し付け、所定の時間通電し、試験片の電極接触部を加熱する。通電電流は無負荷通電電圧の設定により変化させた。試験片にはオーステナイト化温度から空冷しても焼入れが可能なダイス鋼SKD11の丸棒(32)を主に用い、これを長さ20mmに切断し、円柱状試験片として実験に供した。なお試験片の切断面にラップ仕上げを施し、この面に焼入れを行った。また電極には実用化の際の耐久性を考慮し、銅タングステン(C30A2)を用いた。特に断らない限り、電極の材料は銅タングステンで、電極の接触部直径は5mmを標準とした。特に断らない限り直径は5mmである。通電加熱用電源には、出力電圧(無負荷)を0~10Vの範

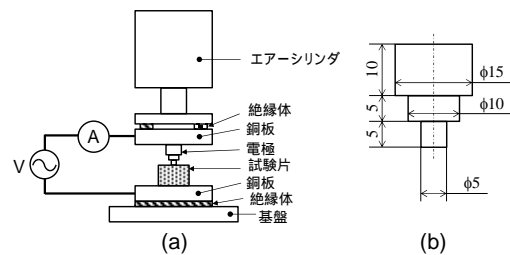


図1 (a)通電加熱を利用した局所焼入れ実験の模式図, (b)電極の形状と寸法

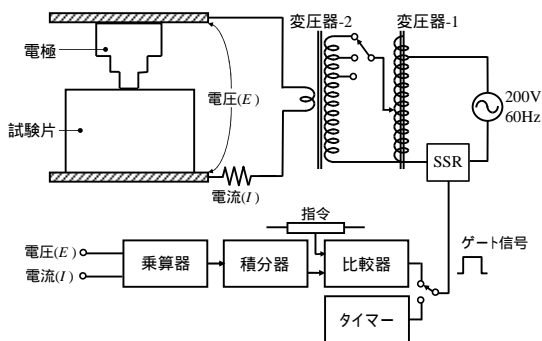


図2 通電加熱局所焼入れ実験に用いた装置の構成(投入電力量制御と通電時間制御が可能)

囲にて可変できる交流電源（常用定格 10kVA）を用いた。電源は通電時間制御と投入電力量制御の機能を備えている（図 2）。本装置を用いて、研究の目的に記した各事項について実験研究を進めた。

#### 4. 研究成果

本法の実現に不可欠な前記 5 項目に関連して得られた知見を以下に記す。

##### (1) スパークの発生限界について

電極接触部を鋼の焼入れに必要なオーステナイト化温度にまで加熱するには、大電流を流す必要がある。しかし電流密度が過大になると、電極との接触部でスパークの発生や溶融が生じ、被処理材の表面を傷つけることになる。焼入れ処理ではこのような表面損傷は絶対に避けなければならない。そこで先ず、電流密度（公称値）と電極接触圧力とスパーク発生の関係を、工業用純銅の電極とフレームハード鋼（HMD5）の試験片を用いて調べた。スパーク発生の有無は、目視観察による試験片表面の電食による傷の有無および通電時の電圧と電流のモニターにおける波形の乱れの有無から判断した。なお本調査では、通電時間は一律に 0.5 s とした。

結果を図 3 に示す。図中の実線はスパーク発生の境界を示す。図中に示した印はスパーク発生なし、×印はスパーク発生ありを表す。グラフの右下部分の領域がスパーク発生なしの通電条件になる。スパーク発生の限界電流密度（公称値）は電極接触圧力の減少とともに低くなる。スパークの発生は真実接触面での電流密度がある限界値（接触する電極と試験片の材料によって決まる）を超えると生じるので、その限界を電極接触圧力と電流密度（公称値）との関係で把握しておく必要がある。本調査により、スパークの発生を防止するための電極接触圧力と公称電流密度の関係が明らかになった。ちなみに、純銅電極とフレームハード鋼（HMD5）の組合せにおいて、電極接触圧力が 9.8MPa の場合は電流密度を  $100\text{A}\cdot\text{mm}^{-2}$  以下にすべきである。

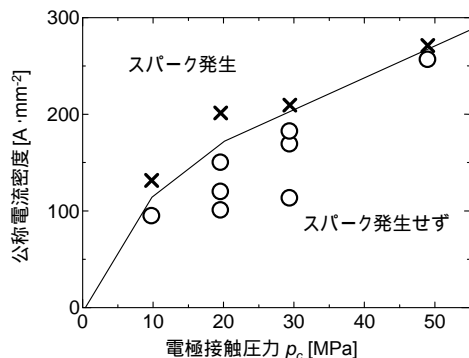


図 3 スパーク発生限界における公称電流密度と電極接触圧力の関係（電極：純銅（3.5）、試験片：フレームハード鋼（HMD5））

##### (2) 点焼入れにおける最適操作条件

焼入れ処理の時間は短ければ短いほど望ましい。したがって、本焼入れ法での加熱時間も短いほど望ましい。加熱時間を短くするには投入電力、すなわち電流密度を高くする必要がある。しかし、これが度を過ぎるとスパークが発生する。そこで本実験では、通電加熱時間を 2s に設定し、単発の点焼入れでの硬さにおよぼす通電電圧（電流密度）と電極接触圧力の影響を調べた。電極には銅タングステン（5）試験片にはダイス鋼 SKD11 を用いた。

##### 通電電圧（電流密度）の影響

図 4 に、通電電圧  $E$  を変化させた場合の試験片電極接触部におけるピッカース硬さ分布の変化を示す。通電電圧の低い 4.5V では硬化域はまったく認められない。加熱温度がオーステナイト化温度にまで達していないと考えられる。電圧が増加して 5.0V になると硬化域が一部認められるようになる。しかし硬化域は中心ではなく、中心から少し離れた位置に環状に発達している。さらに電圧が増加して 5.5V になると中心部も硬化し始めるが、電極中心直下の硬さはその周囲に比べると低い。電圧が 6.0V 以上になると電極中心直下でも  $600\text{HV}_1$  以上の硬さが得られるようになる。600 $\text{HV}_1$  を境に、それ以上の硬さを示す硬化域の範囲について見てみると、電圧が 6.0V では中心から電極半径 2.5mm の約 70% までであるが、6.5V では約 90% までに拡大している。電圧が 7.0V の結果は図には示していないが、この条件では入熱過多となり、処理面が損傷した。金型の局所焼入れでは無傷であることが要求されるので、この点において、電圧 7.0V は不相当と言える。電極接触圧力  $p_c = 21.8\text{MPa}$ 、通電時間  $t = 2\text{s}$  の条件では通電電圧  $E = 6.0 \sim 6.5\text{V}$  が適当と言える。

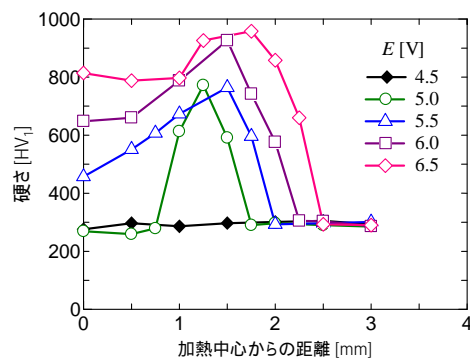


図 4 硬さ分布におよぼす通電電圧 ( $E$ ) の影響（電極接触圧力  $p_c = 21.8\text{MPa}$ 、通電時間  $t = 2\text{s}$ ）

##### 電極接触圧力の影響

図 5 に、電極接触圧力  $p_c$  を変化させた場合での硬さ分布の変化を示す。接触圧力が大きい 30.1MPa では焼入れによる硬化が全く認められないが、接触圧力を 21.8MPa に減少させると、加熱中心から 2.5mm の位置にある電極接触外周境界より内側にて環状の硬

化が認められるようになる。さらに接触圧力を減少させ 13.5MPa にすると、未硬化であった中心部が硬化し始めるが、この条件では均一な焼入れ硬化を得るには至っていない。接触圧力をいまだ少し減少させると均一な硬化が得られると期待され、接触圧力を 5.2MPa にした実験を行ったが、試験片の一部に電極の溶着をともなう表面損傷を引き起こした。接触圧力 5.2MPa は通電電圧 5V、通電時間 2s の通電条件に対しては小さ過ぎると言える。

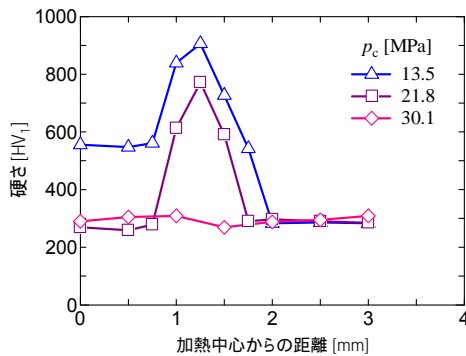


図5 硬さ分布におよぼす電極接触圧力  $p_c$  の影響 (通電電圧  $E=5V$ 、通電時間  $t=2s$ )

(3) 電流制御機能を有さない交流加熱電源を用いた場合での安定した加熱実現のための通電制御方法

電極接触部での単位時間あたりの発熱量は式(1)から電流の2乗に比例するので、処理箇所の移動によって電気的負荷抵抗が変化すると、電流制御機能のない交流電源では電流が変化し、安定した加熱は困難になる。このような負荷変動があっても安定した加熱を実現するには、予め焼入れが可能な通電条件として電流の2乗の時間積分値を調べておき、それを指令値として電流の2乗の時間積分値による通電制御を行えばよいと考えられる。この考えが妥当であるか、実験に使用している交流電源に対して上記の制御を行い、その有効性について調べた。なお電流の2乗の時間積分値による制御(以後、 $\int I^2 dt$  制御と記す)は、投入電力量制御のモード(図2)において電圧( $E$ )の入力端子に通電電流( $I$ )の信号を入力して行った。

はじめに、入熱量は電流の2乗の時間積分値に関係するので、接触面積率 $\varepsilon$ に関する電極接触圧力 $p_c$ を固定して、通電電圧と通電時間を変化させて電流の2乗の時間積分値 $\int I^2 dt$ と電極接触中央部での硬さの関係調べた。なお、電流の2乗の時間積分値 $\int I^2 dt$ は通電中に $\Delta t=0.5ms$ の時間間隔で収録した電流値 $I$ より求めた。

図6に、 $p_c=13.5MPa$ での結果の一例を示す。図には通電電圧5V、6V、7Vの結果を示すが、電圧が変化しても硬さと $\int I^2 dt$ 値の間に密接な対応が見られる。先にも述べたが、通電局所焼入れ法では処理箇所の移動によって電気的負荷が変化する。交流電源で通電

電圧を設定する時間制御では、入熱量が安定しないので、 $\int I^2 dt$ 制御による通電が有効ではないかと考えられる。そこで、これを調べる実験を行った。

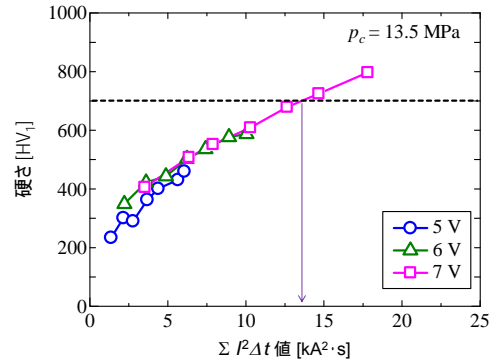


図6 加熱中心における硬さの電流の2乗の時間積分値 $\int I^2 dt$ による変化(電極接触圧力  $p_c=13.5MPa$ )

はじめに、十分な焼入れが確保できる通電電圧 8V、通電時間 1s に対して $\int I^2 dt$ 制御のための指令値を $\int I^2 dt$ により求めた。結果は、電極接触圧力  $p_c=13.5MPa$ において 1.23  $kA^2 \cdot s$  となった。つぎに、電極接触圧力を 13.5MPa とし、通電電圧 8V において $\int I^2 dt$ 制御を行った。 $\int I^2 dt$ 制御において観測された $\int I^2 dt$ 値は2回の実験において、いずれも指令値に近い 12.5  $kA^2 \cdot s$  となった。また、図7に示すように、 $\int I^2 dt$ 制御で得られた硬さの分布は指令値を求めた時間制御で得られた硬さ分布と、ほぼ一致した。

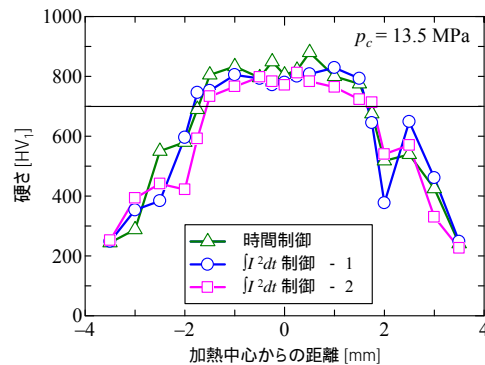


図7  $\int I^2 dt$ 制御のための指令値を求めた時間制御(8V、1s)での硬さ分布と $\int I^2 dt$ 制御(8V)での硬さ分布の比較

$\int I^2 dt$ 制御の正常な動作確認ができたので、負荷変動に対して $\int I^2 dt$ 制御がどの程度有効か、負荷変動を模擬した実験を行った。実験としては、通電電圧 8V、通電時間 1s で求めた $\int I^2 dt$ 値を指令値として、通電電圧を 7V に設定して $\int I^2 dt$ 制御による焼入れ処理を行った。 $p_c=13.5MPa$ における模擬実験では、8Vで1sの通電時間は7Vでは1.31sとなり、通電時間が増加した。このときの焼入れ部分の硬さ分布を、図8に示す。加熱時間の増加による放熱量の増加、すなわち入熱量の低下が反映されてか、 $\int I^2 dt$ 制御での硬さは、時

間制御 (8V, 1s) に比べ、全体的に少し低くなっている。このような結果は  $p_c=21.8\text{MPa}$  でも見られた。 $[I^2dt]$  制御でも加熱時間が  $\sum I^2dt$  値を求めたときの時間と大きく異なる場合には安定した焼入れが困難になることが示唆される。したがって、想定する加熱時間より大幅に異なる場合には警告を発すような機能を備えておく必要がある。本実験からは通電時間の許容範囲は -30 ~ +40% と示唆された。 $[I^2dt]$  制御は、安価な交流電源を加熱電源に用いる場合において、安定した焼入れを実現するための対策であり、定電流制御機能を有する直流電源を加熱電源に用いる場合には、このような対策は不要である。しかし、安定した加熱すなわち焼入れの実現に対して電流の2乗の時間積分値に注目することは重要である。

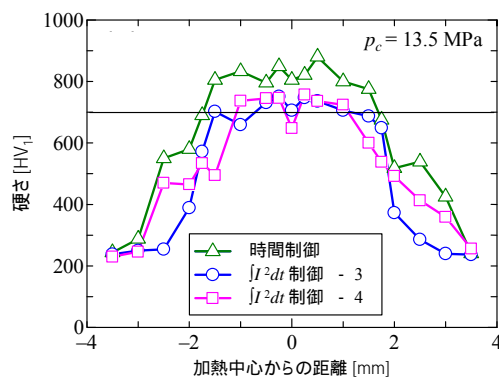


図8 負荷抵抗の増加を模擬した $[I^2dt]$  制御 (7V) と $[I^2dt]$  制御の指令値 ( $\sum I^2dt$  値) を求めた時間制御 (8V, 1s) での焼入れ部硬さ分布の比較

#### (4) 点焼入れにおける焼入れ硬化範囲

図4に示した通電電圧の増加、すなわち入熱量の増加による硬さ分布の変化から、円柱状電極を用いた本法による点焼入れでは、焼入れ硬化域はまず環状に形成され、その後、中央部の硬化が進み、一様な硬さになっていく。しかし最終的に形成される硬化域の直径は電極の直径に比べて小さい。本法の適用によって所望の大きさの硬化域を得るためには、用いる電極によってどの程度の大きさの硬化域が形成されるか明らかにしておく必要がある。そこで、電極の直径を変化させた点焼入れを行い、一様な硬さ分布を示す硬化

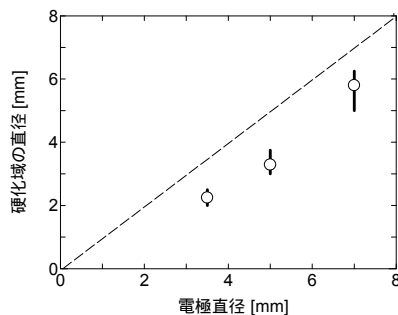


図9 一様な硬さ分布を示す焼入れ硬化域の直径と電極直径の関係 (電極: タングステン銅、試験片: ダイスキ鋼 SKD11)

域の大きさを調べた。

図9に、結果を示す。この結果から、硬化域の外周部は電極の外縁から0.5~0.8mm内側にあり、電極と同じサイズの硬化域は得られないことがわかる。焼入れ硬化域が電極サイズより小さくなる理由としては、加熱段階での試験片の熱膨張が電極外周部での電極と試験片との接触が解放されているのではないかと考えられる。

#### (5) 点焼入れの連続化による線状焼入れ

当初、線状の焼入れは、図10に示すように、単発処理の一定間隔での繰り返しによって可能であると考え、研究を進めた。

図11に、線状焼入れ実験の結果の一例を示す。この結果では、一様な硬さ分布の線状硬化が得られていると思えるが、直径5mmの電極を用いて詳細に調べたところ、先発処理により硬化した部分が後発処理により高温焼き戻しを受け、硬さが低下するといったことが生じていることがわかった。すなわち、一様な硬さ分布の線状の硬化域を、この方法で得ることは本質的に無理であることが判明した。一様な硬さの線状焼入れを行うには間欠的な通電ではなく、連続通電が不可欠であり、この課題に関しては、研究期間が終了した現在も研究を継続している。

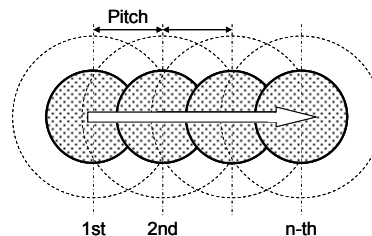


図10 一定間隔での点焼入れ処理の連続による線状焼入れ法

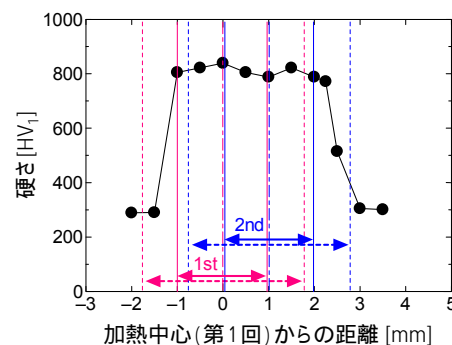


図11 線状焼入れでの硬さの分布 (電極: 純銅 (3.5mm)、試験片: フレームハード鋼 HMD5、ピッチ: 1mm)

以上に述べた成果は、関連して得られた他の知見とともに、関係する国内の学会および国際会議において発表し、公表した。

#### <引用文献>

Lenel, F.V., "Resistance sintering under pressure", Trans. AIME, Vol. 203, (1955), pp.158-167.

Maki, S., and Mori, K., "Semisolid forging of titanium alloy making use of rapid resistance heating", Proc. of the 11th World Conference on Titanium (JIMIC5), Ti-2007 Science and Technology, Vol. 2, (2007), pp.877-880.

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び研究連携者には下線)

[雑誌論文](計6件)

大野正稀、牧清二郎、中西栄徳、急速通電加熱を利用したエッジ部の局所焼入れの加熱状態の焼入れ状態への影響、日本機械学会東海支部第64期総会講演会講演論文集(USB Flash)、査読無、153-1、2015、175

大野正稀、牧清二郎、中西栄徳、急速通電加熱を利用したエッジ部の局所焼入れ(加熱状態と硬化領域の関係)日本機械学会第10回生産加工・工作機械部門講演会論文集(USB Flash) 査読無、2014、263-264

Seijiro Maki, Yuuki Makida, Eitoku Nakanishi Electrification Control for Stable Achievement of Local Hardening of Steel Using Rapid Resistance Heating Proceedings of the 17th International Conference on Advances in Materials & Processing Technologies (CD-ROM)、査読無、2014、141

牧清二郎、牧田祐樹、中西栄徳、急速通電加熱を利用した局所焼入れ安定化のための通電制御、日本機械学会第21回機械材料・材料加工技術講演会講演論文集(CD-ROM) 査読無、13-31、2013、819

Seijiro Maki, Shinpei Matsuda, Eitoku Nakanishi Local Hardening of Flame Hardening Steel Using Rapid Resistance Heating Proceedings of the 15th International Conference on Advances in Materials & Processing Technologies (USB Flash) 査読無、2012、11418

牧清二郎、大石晃平、中西栄徳、急速通電加熱を用いたダイス鋼の局所焼入れにおける通電条件の焼入れ状態に及ぼす影響、日本機械学会第20回機械材料・材料加工技術講演会講演論文集(CD-ROM) 査読無、12-9、2012、822

[学会発表](計6件)

大野正稀、牧清二郎、中西栄徳、急速通電加熱を利用したエッジ部の局所焼入れの加熱状態の焼入れ状態への影響、日本機械学会東海支部第64期総会講演会、2015年3月13-14日、中部大学春日井キ

ャンパス(愛知県春日井市)

大野正稀、牧清二郎、中西栄徳、急速通電加熱を利用したエッジ部の局所焼入れ(加熱状態と硬化領域の関係)日本機械学会第10回生産加工・工作機械部門講演会、2014年11月15-16日、徳島大学三島キャンパス(徳島市)

Seijiro Maki, Yuuki Makida, Eitoku Nakanishi, Electrification Control for Stable Achievement of Local Hardening of Steel Using Rapid Resistance Heating, 17th International Conference on Advances in Materials & Processing Technologies, AMPT2014, Atlantis The Palm, 16-20 Nov., Dubai (United Arab Emirates)

牧清二郎、牧田祐樹、中西栄徳、急速通電加熱を利用した局所焼入れ安定化のための通電制御、日本機械学会第21回機械材料・材料加工技術講演会(M&P2013)、2013年11月8-10日、首都大学東京南大沢キャンパス(東京都)

Seijiro Maki, Shinpei Matsuda, Eitoku Nakanishi, Local Hardening of Flame Hardening Steel Using Rapid Resistance Heating, 15th International Conference on Advances in Materials & Processing Technologies, AMPT2012, Novotel Wollongong North Beach Hotel, 23-26 Sept., Wollongong (Australia)

牧清二郎、大石晃平、中西栄徳、急速通電加熱を用いたダイス鋼の局所焼入れにおける通電条件の焼入れ状態に及ぼす影響、日本機械学会第20回機械材料・材料加工技術講演会(M&P2012)、2012年11月30日-12月2日、大阪工業大学大宮キャンパス(大阪市)

[図書](計0件)

[産業財産権]

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

[その他]

ホームページ等

## 6. 研究組織

(1)研究代表者

牧清二郎(MAKI, Seijiro)

三重大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号: 20124315

(4)研究協力者

松田 晋平(MATSUDA, Sinpei)

大石 晃平(OISHI, Kouhei)

牧田祐樹(MAKIDA, Yuuki)

大野 正稀(OONO, Masaki)