

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 3 月 30 日現在

機関番号：14101
 研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2009～2011
 課題番号：21560120
 研究課題名（和文）急速通電加熱熱間成形ダイクエンチ法の適用における冶金学的留意点の明確化
 研究課題名（英文）Clearing-up of metallurgical points to pay attention to on application of rapid resistance heating to hot-stamping process combined with press-quenching
 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

研究成果の概要（和文）：

高強度の鋼板成形部品が得られる熱間プレス・ダイクエンチ工程の導入が自動車産業界において増加し始めており、本工程での素材加熱に対する通電加熱の応用に高い関心が集まっている。本研究では、通電加熱応用に際しての注意すべき冶金学的問題点について、実用鋼板を用いた実験により調査し、これを明らかにした。本調査によって明らかとなった通電加熱応用に際しての留意点は、これを有効に活かすべく、国内外の関連学会にて公表した。

研究成果の概要（英文）：

In the circumstances that a use of the hot-stamping process combined with press-quenching which can produce high-strength steel sheet parts has been increasing, application of a resistance heating method to the process draw much attention in automotive industry. In this study, metallurgical points to pay attention to on the application were experimentally investigated using a practically used hot-stamping steel sheet as an experimental material. The points cleared up through the investigation were published in relevant academic conferences at home and abroad to turn to practical use.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	2,400,000	720,000	3,120,000
2010 年度	600,000	180,000	780,000
2011 年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,700,000	1,110,000	4,810,000

研究分野：塑性加工

科研費の分科・細目：機械工学・生産工学・加工学

キーワード：熱間プレス成形、ダイクエンチ、通電加熱、高張力鋼板、引張試験、曲げ試験

1. 研究開始当初の背景

(1) 自動車産業界における熱間プレス・ダイクエンチの現状

鋼板の熱間プレス・ダイクエンチ法は、自動車の燃費性能向上のための車重軽減と衝突安全性の確保の要求に応えうる高強度部品の製造方法として、利用が始まっており、今後、その利用はますます増加するものと予

想される。現行の熱間プレス・ダイクエンチでは、素板の加熱を通常の加熱法でプレスから離れた場所で行っているため、加熱した素材のプレスへの搬送を余儀なくされている。板材は比表面積が大きいので、搬送過程での温度低下が大きく、無視できない。そこで、この温度低下を補うべく、必要とされる成形温度より高い温度に素板を加熱している。こ

の高い温度への加熱が、搬送過程での大気暴露による酸化スケールの生成をさらに著しくし、スケール除去処理をも余儀なくされている。

(2) 通電加熱による素材加熱の利点と応用に対する関心

通電加熱（直接通電による抵抗加熱）は、流す電流の密度にもよるが $2000^{\circ}\text{C}/\text{s}$ という急速加熱も容易に実現可能であり、被加熱体に電気を通じるための電極と給電ケーブルを配備すれば、いかなる場所においても実現可能である。素板の加熱をプレス内で行うことができれば、加熱完了と同時に成形、ダイクエンチを行うことができ、加熱した素板の搬送が不要になるとともに、搬送過程での温度低下を補うための過剰加熱も不要になり、熱間プレス・ダイクエンチにおいて大きな問題にもなっている酸化スケールの生成も著しく軽減、場合によっては解消される。

上記 (1)、(2) を背景に、自動車産業において、熱間プレス・ダイクエンチ工程への通電加熱の導入が高い関心を集めている。

(3) 熱間プレス・ダイクエンチにおける冶金学的要件と通電加熱の適用による派生效果

鋼を焼入れにより硬化させるには、素材を加熱してオーステナイト化し、急冷してマルテンサイトを生成させる必要がある。生産性の向上には短時間の通電加熱が望まれるが、短時間の加熱では、炭素の拡散を必要とするオーステナイト化が不完全に終わる可能性があり、従来の加熱時間の長いオーステナイト化と、短時間の通電加熱によるオーステナイト化では、様子が異なると考えられる。特に、オーステナイト化に際して、炭素の長距離拡散を必要とする組織の粗い鋼板に対しては、均一なオーステナイト組織を得ることは困難であると予想され、これについては、熱間プレス用の実用鋼板ではないが、予備実験により確認されている。この特徴は、逆に、素板の組織を予め調整しておくことで、ダイクエンチ後の組織を自在に変化させ得ることを示唆する。例えば、フェライトとマルテンサイトからなる2相組織の形成も容易に実現でき、通電加熱の新しい応用展開に繋がるものと期待される。このような組織制御は、素材メーカーではすでに行われており、鋼板の制御圧延などにその例を見ることができる。部品製造においても、このような組織制御が可能になれば、部品の機械的特性向上、機能向上に繋がるものと考えられる。

2. 研究の目的

通電加熱の熱間プレス・ダイクエンチ工程への応用には、以下に挙げる5つの大きな課題がある。課題 (1) ~ (4) については、これまでに、一応の解決策が見出されているが、課題 (5) については、不明な点が多く、留

意点の明確化が求められる。以下に、各課題に対する現時点での解決策について簡単に記す。

(1) 異形板に対する均一加熱の実現

一様な電流密度分布が被加熱素板全体にわたって得られれば、均一加熱は実現できる。ゆえに、単一電源で均一加熱が得られるのは、被加熱素板の形状が矩形の場合に限られる。異形板に対しては、その形状に応じて複数の電源を用い、単位幅あたりの電流値を等しくすることで実現でき、このことは、シミュレーションと実験により確認されている。

(2) 瞬時需用電力の低減

被加熱素板の大きさにもよるが、プレス内で数秒の短時間のうちに通電加熱するには電源の容量として数 $100\text{kW}\sim 1000\text{kW}$ が必要であり、瞬間電力が著しく大きくなる。ダイクエンチは熱間成形された部品を金型内に10秒~20秒保持して冷却する必要がある。したがって、電源に急速充放電が可能なキャパシターを搭載し、この冷却時間を利用して蓄電を行えば、瞬間電力は $200\text{kW}\sim 300\text{kW}$ 程度に抑えることができる。また、複数の設備が稼働する場合には、需用電力が集中しないような運転が望まれる。

(3) 加熱における酸化スケール生成の抑制

従来法による加熱では強固なスケール防止剤の開発が望まれるが、通電加熱による素板の加熱では、必要温度以上に加熱しなくてもよいので、鋼板表面の大気暴露による酸化は最小限に抑えられ、簡易なスケール防止剤の塗布でも、酸化スケールの生成を相当に抑えられる。

(4) ダイクエンチ部品におけるトリミング、穴あけ加工

ダイクエンチされた部品は、強度が一段と高くなっているため、これらを冷間プレス加工で行うのは、工具の磨耗や損傷が著しくなり、経済的とは言えない。現行では、レーザ切断が広く使われているが、省スペース、省工程の観点からは熱間プレス成形の段階で行うのが理想的である。これについては、熱間プレス成形の段階のどのタイミングで行うのが最適であるか調査されており、部品の温度が、 M_s 点より高い 500°C あたりに達するまでに行えば、これらの加工を低い加工力で実施できることが明らかにされている。

(5) 急速加熱にともなう冶金学的課題

これは成形部品の強度特性に影響する重要な問題であるが、これまでに、通電加熱のような急速加熱を利用した材料加工がなかったこともあり、調査そのものが行われておらず、不明な点が多い。しかし、通電加熱を利用する熱間プレス・ダイクエンチでは、プレスの稼働率を低下させたくないといった経済的な面から、また、加熱時間が短ければ酸化スケールの生成が低減されるという利

点を活かす上でも、急速加熱との関係で潜在する問題点の明確化とその解決策の確立は必要である。

本研究は、この最後の課題について、潜在する問題点を明らかにするとともに、その対応策を探索し、通電加熱熱間プレス・ダイクエンチ法の実用化をめざす。

3. 研究の方法

(1) 素材組織の粗さの影響調査

ダイクエンチ後の鋼板成形部品において十分な強度特性を得るには加熱において均一なオーステナイト組織を得る必要がある。オーステナイト化には時間が関わる炭素の拡散を必要とするので、組織の粗さとの関係になるが、加熱時間が1~2秒の急速加熱で炭素の拡散が十分に行われ、均一なオーステナイトが得られるかといった問題が懸念される。

そこで実用鋼板と、それに熱処理を施し、故意に組織を粗くした試験材料を準備し、これらに対して急速通電加熱を利用したダイクエンチを行い、クエンチ後の機械的特性におよぼす影響を実験により調査した。なお実験では、加熱温度も変化させ、室温でのビッカース硬さ試験と引張試験により、強度特性を評価した。引張試験片をダイクエンチ後の試料から得る必要性から、本実験では、成形を伴わないダイクエンチを模擬したクエンチ処理を、図1に概略図を示す実験装置を用いて行った。

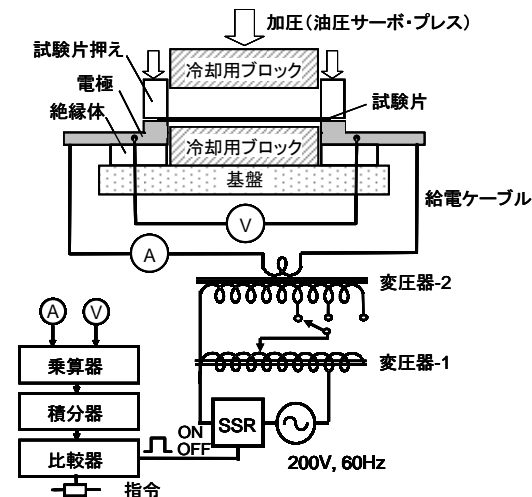


図1 通電加熱・ダイクエンチ模擬実験装置

(2) 金型からの解放温度の影響調査

熱間プレス・ダイクエンチでは、熱間プレスによって成形された鋼板部品を、マルテンサイト組織を得るために、プレス成形後も金型内に保持して冷却する。そのため、冷却時間が長いとプレスの占有時間が長くなり、プ

レスの稼働率が低下する。プレスの稼働率向上には、必要最小限の金型内保持時間の見極めが必要である。

そこで、成形においてスプリングバックが大きく現れる曲げ半径の大きい円弧曲げ（曲げ半径 75 mm）を熱間プレス成形として採り上げ、ダイクエンチによる冷却過程の途中で、試験片を型から解放し、室温にて曲げ半径とビッカース硬さを測定し、型からの解放温度が成形部品の性状（形状精度と強度特性）におよぼす影響について調べた。なお実験には、図2に概略図を示す実験装置を用いた。

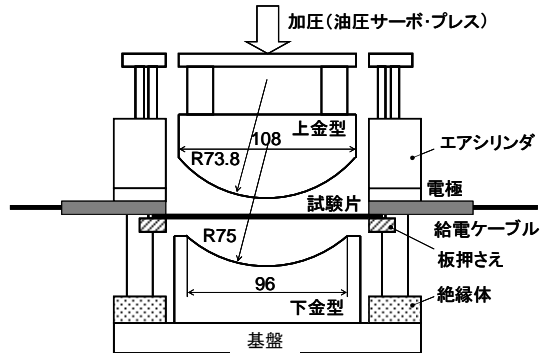


図2 通電加熱・熱間円弧曲げ・ダイクエンチ実験装置

(3) 実験材料

上記の調査には、表1に化学組成を示す板厚 1.2 mmの実用鋼板を用いた。組成から Ac_1 （加熱過程でのオーステナイト変態開始温度）、 Ac_3 （同完了温度）、 Ms （冷却過程でのマルテンサイト変態開始温度）は、それぞれ、 $733^{\circ}C$ 、 $839^{\circ}C$ 、 $410^{\circ}C$ と推定される。図3に、受入れままの鋼板の組織（図(a)、求積法で求めた初析フェライト粒径 $3.6\mu m$ ）と熱処理により故意に組織を粗くした鋼板の組織（図(b)、同 $18.2\mu m$ ）を示す。明るく見える部分がフェライトで、暗く見える部分がパーライトである。

実験には幅 20 mm、長さ 130 mm（通電加熱部分 120 mm）の短冊状試験片を用いた。試験片の加熱温度は試験片への投入電力量の制御で行うため、試験片の通電加熱特性（加熱温度と投入電力量との関係）を事前に調査しており、均一加熱が可能であることも確認している。なお試験片の温度は、試験片中央側面の板厚中心部に線径 0.1 mmのK種熱電対をスポット溶接して測定した。

表1 供試鋼板の化学組成（質量%）

C	Si	Mn	P	S	B
0.21	0.24	1.30	0.010	0.003	0.0018

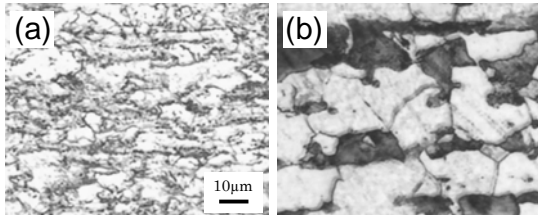


図3 供試鋼板の組織写真（明るい部分：フェライト、暗い部分：パーライト）

4. 研究成果

(1) 素材組織の粗さの影響

図4に、組織の粗い鋼板（フェライト粒径 $18.2\mu\text{m}$ ）と細かい鋼板（同 $3.6\mu\text{m}$ ）に対する加熱温度によるダイクエンチ後の硬さの変化を示す。組織が細かい鋼板の硬さは、加熱温度が $A_{c1} \sim A_{c3}$ の範囲では、温度の上昇とともに増加し、 A_{c3} 点以上ではほぼ一定の値を示している。加熱温度が A_{c3} 点以上での硬さにおよぼす組織の粗さの影響をみると、温度の低い領域において両者に大きな差が見られるが、 1130°C 以上ではほとんど差はなくなっている。温度が高いほど原子の拡散が盛んになるので、加熱温度の上昇が炭素の拡散を促進させ、これにより十分なオーステナイト化が達成されたと考えられる。

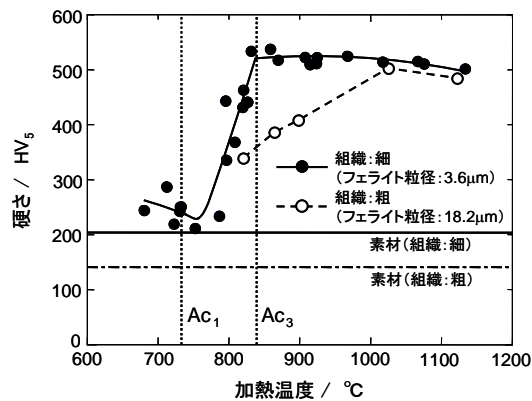


図4 加熱温度によるクエンチ後の硬さの変化

図5は、引張試験によって得られた引張強さと破断伸びの加熱温度による変化である。引張強さは、細かい組織、粗い組織とも硬さ（図4）と同様の挙動を示している。細かい組織における破断伸びの挙動を見ると、加熱温度が A_{c3} 点以上で高い強度を示すクエンチ材では破断伸びが約7.5%と小さく、 $A_{c1} \sim A_{c3}$ の温度域では、加熱温度の低下とともに強度が減少し、それともなって破断伸びが増加している。この温度域への加熱では、フェライトとマルテンサイトから成る2相組織となることから、加熱温度の調整により、2相組織の鋼板部品の創り込みも可能であることがわかる。

A_{c3} 点以上の加熱温度における粗い組織の破断伸びを見ると、細かい組織に比べ、強度が低いにもかかわらず破断伸びも低くなっている。組織が粗い場合には、短時間の通電加熱ではオーステナイト化が不完全に終わり、クエンチによって、所定の強度特性が得られないばかりか、延性特性も低下することがわかる。しかしながら、強度特性、延性特性とも加熱温度の増加とともに改善され、 1130°C 以上の加熱温度では細かい組織の引張特性に近づいている。フェライト粒径が $18\mu\text{m}$ もあるような組織の粗い鋼板において、通電加熱によって十分な強度特性を保証させるには 1100°C 以上の加熱が必要であることを示しており、組織の粗い鋼板の使用は、望ましくないと言える。

図4および図5の結果から、最適加熱温度は A_{c3} 点直上であることがわかる。

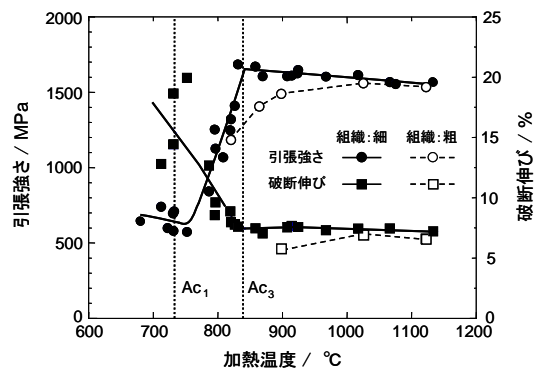


図5 加熱温度によるクエンチ後の引張強さ、破断伸びの変化

表2に、粗い組織における加熱保持の有無による硬さの変化を細かい組織での加熱保持なしの硬さと比較して示す。加熱保持は加熱温度 940°C に対して3s行った。保持にともなう放熱により鋼板の温度は、約70K低下して、 870°C になったが硬さは上昇し、加熱温度が少し異なるが、組織の細かい鋼板（加熱温度 924°C ）での加熱保持なしの硬さ 517HV_5 に近い値が得られている。3s という短時間の加熱保持でもオーステナイト化の促進には有効であることがわかる。加熱保持によるオーステナイト化促進の様子は、図6に示した加熱保持の有無によるクエンチ後の組織の違いに現れている。加熱保持ありのクエンチ後の組織（図(b)）では、明るく見えるフェライト相が、保持なしの組織（図(a)）より、少なくなっている。

表2 組織の粗い鋼板での加熱保持の有無（保持時間3s）とクエンチ後の硬さの関係

組織	加熱温度 / °C	加熱保持	硬さ / HV ₅
粗	940	無	406
粗	940	有	507
細	924	無	517

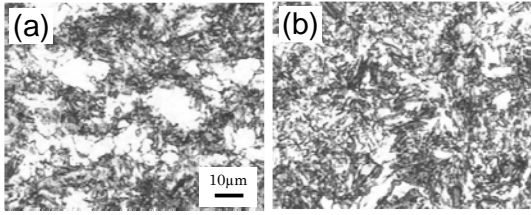


図6 加熱保持（加熱温度 940℃、保持時間 3 s）の有無によるクエンチ後の組織の変化：(a) 保持なし、(b) 保持あり

以上の結果から、素材組織の粗さの影響は、つぎのようにまとめられる。

- ① 極端に組織の粗い鋼板の使用は避けるべきである。
- ② フェライト粒径が 4µm 以下の細かい組織であれば、加熱時間の短い通電加熱でも、十分なオーステナイト化を達成できる。

(2) 金型からの解放温度の影響

図7に、試験片の金型からの解放温度による曲げ半径と処理後の硬さの変化を示す。図には、比較の意味で、冷却においてマルテンサイト変態を生じない SUS304（板厚 1.2 mm，成形荷重 4.9kN）での曲げ半径も示す。実用鋼板の結果を見ると、Ms 点に近い 425℃での解放では、曲げ半径は約 80 mmで、理想値より 5 mm大きい値になっている。しかし、解放温度の低下とともに曲げ半径は減少し、形状精度が向上しており、解放温度 195℃では、曲げ半径は理想値 75 mmに近い値になり、それより低い解放温度では曲げ半径はほぼ理想値になっている。比較のために図に示した SUS304 の結果を見ると、解放温度の減少とともに曲げ半径は減少傾向を示しているが、完全冷却の条件でも曲げ半径は 79.5 mmで、理想値から大きく離れている。曲げ半径 79.5 mmは実用鋼板の解放温度 425℃での曲げ半径とほぼ同じである。本結果から、体積膨張をとまなうマルテンサイト変態を金型による変形拘束状態にある鋼板に生じさせることで残留応力の緩和が起これ、スプリングバックを解消させていると考えられる。

ダイクエンチ後の硬さの解放温度による変化を見ると、解放温度 195℃では、完全冷却での硬さ 530HV₅にほぼ近い、517HV₅が得られている。解放温度が 200℃以下であれば、十分な焼入れ効果が得られると言える。

以上の結果から、金型からの解放温度の影響は、つぎのようにまとめられる。

- ① 金型による変形拘束下でマルテンサイト変態を生じさせることは、成形精度の向上にきわめて有効である。
- ② 熱間プレス・ダイクエンチで良好な成形精度を得るには、成形品をマルテンサイト変態がほぼ完了する温度域まで金型内に保持して解放すればよい。具体的には、本研

究で用いた実用鋼板では、200℃以下で解放すればよい。

- ③ 200℃あたりで成形品を金型から解放しても、マルテンサイト変態がほぼ完了しているので、成形品の硬さは完全冷却したものより少し低いものの、大差は見られない。

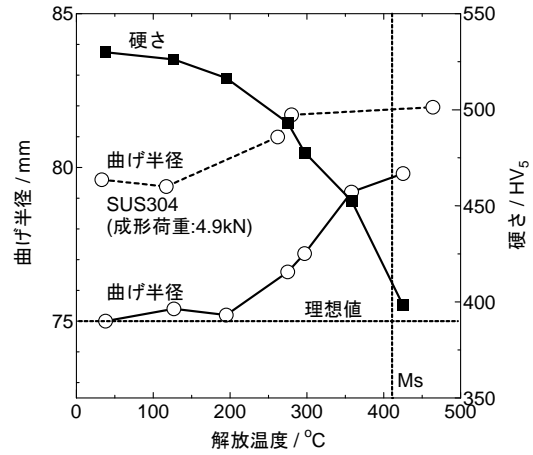


図7 解放温度による曲げ半径と硬さの変化

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 7 件）

- ① Seijiro Maki, Takashi Hattori, Eitoku Nakanishi, Punching Test of High Strength Steel Sheet in Rapid Cooling Stage Following Austenitizing by Rapid Resistance Heating, steel research international, 査読有, Special Edition, 2011, pp. 554-558.
- ② 牧清二郎, 楠 吉浩, 中西栄徳, 実用鋼板の通電加熱円弧曲げ・ダイクエンチにおける成形状態におよぼす解放温度の影響, 第 62 回塑性加工連合講演会講演論文集, 査読無, 2011, pp. 273-274.
- ③ 中谷広樹, 牧清二郎, 中西栄徳, 実用鋼板における通電加熱ダイクエンチ後の機械的特性におよぼす処理条件の影響, 第 62 回塑性加工連合講演会講演論文集, 査読無, 2011, pp. 271-272.
- ④ 牧清二郎, 中谷広樹, 中西栄徳, 実用鋼板の通電加熱ダイクエンチにおける処理後の性状におよぼす処理条件の影響, 平成 23 年度塑性加工春季講演会講演論文集, 査読無, 2011, pp. 349-350.
- ⑤ Seijiro Maki, Hardness Property of Resistance-Heated and Rapidly Cooled Steel Sheet for Die-Quenching Use, AIP Conference Proceedings, 査読有, 1315, 2011, pp. 309-314.

- ⑥ 牧清二郎, 中谷広樹, 中西栄徳, 実用鋼板の通電加熱ダイクエンチにおける加熱温度の硬さへの影響, 第61回塑性加工連合講演会講演論文集, 査読無, 2010, pp. 385-386.
- ⑦ 牧清二郎, 通電加熱ダイクエンチ後の硬さにおよぼす処理条件の影響, 平成23年度塑性加工春季講演会講演論文集, 査読無, 2010, pp. 23-24.

- (2) 研究分担者
該当なし
- (3) 連携研究者
該当なし

[学会発表] (計7件)

- ① 牧清二郎, 楠吉浩, 中西栄徳, 実用鋼板の通電加熱円弧曲げ・ダイクエンチにおける成形状態におよぼす解放温度の影響, 日本塑性加工学会, 2011年10月27日, ホテル日航豊橋
- ② 中谷広樹, 牧清二郎, 中西栄徳, 実用鋼板における通電加熱ダイクエンチ後の機械的特性におよぼす処理条件の影響, 日本塑性加工学会, 2011年10月27日, ホテル日航豊橋
- ③ Seijiro Maki, Takashi Hattori, Eitoku Nakanishi, Punching Test of High Strength Steel Sheet in Rapid Cooling Stage Following Austenitizing by Rapid Resistance Heating, 10th International Conference on Technology of Plasticity (ICTP 2011), 28 September 2011, Aachen, Germany
- ④ 牧清二郎, 中谷広樹, 中西栄徳, 実用鋼板の通電加熱ダイクエンチにおける処理後の性状におよぼす処理条件の影響, 日本塑性加工学会, 2011年5月29日, 早稲田大学西早稲田キャンパス
- ⑤ Seijiro Maki, Hardness Property of Resistance-Heated and Rapidly Cooled Steel Sheet for Die-Quenching Use, International Conference on Advances in Materials and Processing Technologies (AMPT2010), 27 October 2010, Paris, France
- ⑥ 牧清二郎, 中谷広樹, 中西栄徳, 実用鋼板の通電加熱ダイクエンチにおける加熱温度の硬さへの影響, 日本塑性加工学会, 2010年10月16日, 山形大学工学部米沢キャンパス
- ⑦ 牧清二郎, 通電加熱ダイクエンチ後の硬さにおよぼす処理条件の影響, 日本塑性加工学会, 2010年5月28日, 電気通信大学情報理工学部

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