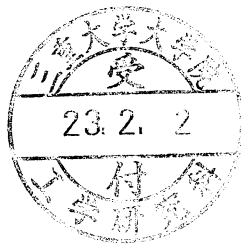


修士論文

金型の局所焼入れを背景にした通電焼入れ法の開発



指導教員 牧 清二郎 教授

平成 22 年度

三重大学大学院工学研究科

博士前期課程 機械工学専攻

松田 晋平

目次

| | |
|-------------------|----|
| 第1章 緒言 | 1 |
| 第2章 通電加熱の原理 | 3 |
| 第3章 通電加熱焼入れ実験 | 6 |
| 3-1 実験材料 | 6 |
| 3-2 スパーク発生限界 | 7 |
| 3-3 単発通電焼入れ | 14 |
| 3-3-1 通電電圧の影響 | 15 |
| 3-3-2 電極接触圧力の影響 | 15 |
| 3-3-3 電極径の影響 | 16 |
| 3-3-4 深さ方向の硬さ分布 | 17 |
| 3-4 多点通電焼入れ | 18 |
| 第4章 実験結果及び考察 | 22 |
| 4-1 スパーク発生限界 | 22 |
| 4-2 単発通電焼入れ | 26 |
| 4-2-1 通電電圧の影響 | 26 |
| 4-2-2 電極接触圧力の影響 | 29 |
| 4-2-3 電極径の影響 | 32 |
| 4-2-4 深さ方向の硬さ分布 | 37 |
| 4-2-5 単発焼入れに関する考察 | 40 |
| 4-3 多点通電焼入れ | 50 |
| 第5章 結言 | 53 |

参考文献

謝辞

第1章 緒言

金型は自動車業界を初め、様々な所で用いられており、同一の部品を大量に生産する際に非常に重要である。金型と被加工材との接触部は繰り返し荷重を加えられることから、耐摩耗性が必要である。その耐摩耗性を向上させるために焼入れ処理、その中でも部分焼入れによる局所的硬化処理が行われる。

鋼の焼入れ処理とはオーステナイト域まで加熱し、急冷することでマルテンサイトを得る処理である。一般的な焼入れは鋼全体を加熱し硬化させる方法であるが、金型のように部分的に負荷が掛かる場合はその他の部分を焼入れ硬化しても意味がないため、局所的に焼入れをする必要がある。金型鋼の部分焼入れは現行法として、火炎焼入れ、レーザ焼入れがある。火炎焼入れは焼入れの成否を左右する加熱温度¹⁾の見極めが重要であり、これには熟練を要する。しかし、熟練技術者の高齢化、若者のものづくり離れから技術の伝承がままならなくなっている。また、火炎焼入れ装置は火口の設計が重要なポイント²⁾であり、燃料ガスの種類、被加熱物の形状、大きさ、焼入れ深さなど目的によって設計を変更しなければならないという問題が挙げられる。一方レーザ焼入れは、必ずしも熟練が必要ではないが、設備の導入には多大な経費がかかり、中小の金型メーカーでの導入は容易ではない。また、レーザは危険が多いため取り扱いに気をつけなければ事故に繋がりやすい。

ところで、古くから知られる加熱方法で、最近自動車業界において注目を集めているものとして通電加熱がある。通電加熱は、導電性を有する材料に直接電流を流し、その際のジュール発熱を利用して加熱を行うものである。自己加熱であるため、流す電流密度によるが $2000\text{K}\cdot\text{s}^{-1}$ の急速加熱も可能であり、加熱温度の制御も比較的容易である³⁾⁴⁾ので金属材料の加熱に適していると考えられる。焼入れ硬化処理は鋼をオーステナイト化温度に加熱する必要があり⁵⁾⁶⁾⁷⁾、予備実験で金属材料と電極との接触部直下で最も加熱ができ、オーステナイト化温度に到達できるため、本加熱法は金型の部分焼入れに適用可能であると考えられる。

本研究では、この通電加熱法の金型の部分焼入れへの応用を背景に、鋼のオーステナイト域への加熱にその適用を試み、新たな局所焼入れ法の開発に向けて通電条件が焼入れ硬さに及ぼす影響を調査した。ただし、通電加熱特有の注意点としてスパーク発生を考えなければならない。スパークが金型上で発生すると、表面に大きな傷が付くため製品の質を著しく低下させてしまい、製品として使用できなくなる。したがって、スパーク発生条件を明らかにする必要がある。通電条件による硬さへの影響はスパーク発生条件を考慮してスパークの発生しない安全域において調査した。

第2章 通電加熱の原理

本研究で使用する金属の加熱法である通電加熱の原理について説明する。図 2.1 には通電加熱のモデルを示す。試験片の上部に銅電極を接触させ、下部には試験片の断面よりも充分大きい面積の銅板を接触させる。この状態で銅電極の上部から圧力をかけ、電流を流すと、試験片内部で図のような電流分布が起こる。図から分かるように、銅電極と試験片上部の接触部が最も電流密度が高くなる。電流密度が高くなることにより発熱するというところに繋がる。銅電極と試験片は人の目で見れば完全に全面接触している様に見えるが、実際には図 2.2 の様に部分的に接触している。その接触率は銅電極、試験片の表面仕上げの状態によって変わる。また銅電極を試験片に接触させる際の圧力が大きければ、接触率が高くなり、圧力が小さければ、接触率も低くなる。この事を利用して加熱を行う。

接触率と発熱量の関係を式によって表す。銅電極と試験片が完全に接触しているものと仮定した場合、それを公称面積とし、公称面積での発熱量は式(2. 1)のように表される。ところが、現実には完全に接触しているわけではなく部分的に接触しているため、その時の接触率を ε とすると、式(2. 1)の公称面積 S にこの接触率 ε を掛け合わせることで真実接触面積となり、結果として真実面積での発熱量は式(2. 2)のように表す。ここで、体積あたりの発熱量について考える。公称面積 S に対して仮想厚みを1とすると、接触している部分の体積は公称面積 S に接触率 ε を掛け合わせ、仮想厚み 1 を掛けることで求めることが出来る。この体積部分では発熱しているので式(2. 2)の真実面積で発生する発熱量を掛け合わせることで式(2. 3)に示される発熱量が求められた。次に接触していない部分の体積は公称面積 S に接触率の残り $(1 - \varepsilon)$ を掛け合わせ、厚み 1 を掛けることで求められる。接触していない部分は発熱しないので 0 を掛け合わせることで式(2. 4)が導かれる。これらの値を足し合わせることで、体積中の全発熱量が求められるので、この値を公称面積 S に仮想厚み 1 を掛けて求められる全体積で割ることで体積あたりの発熱量が求められる。結果として、式(2. 5)のように導くことができ、発熱量は接触率に反比例することがわかる。

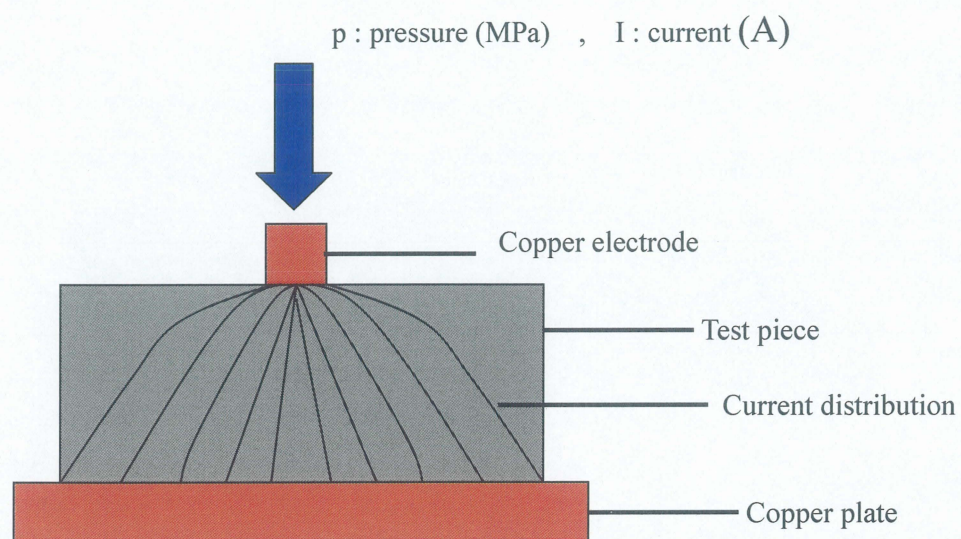


Fig.2.1 Model of resistance heating

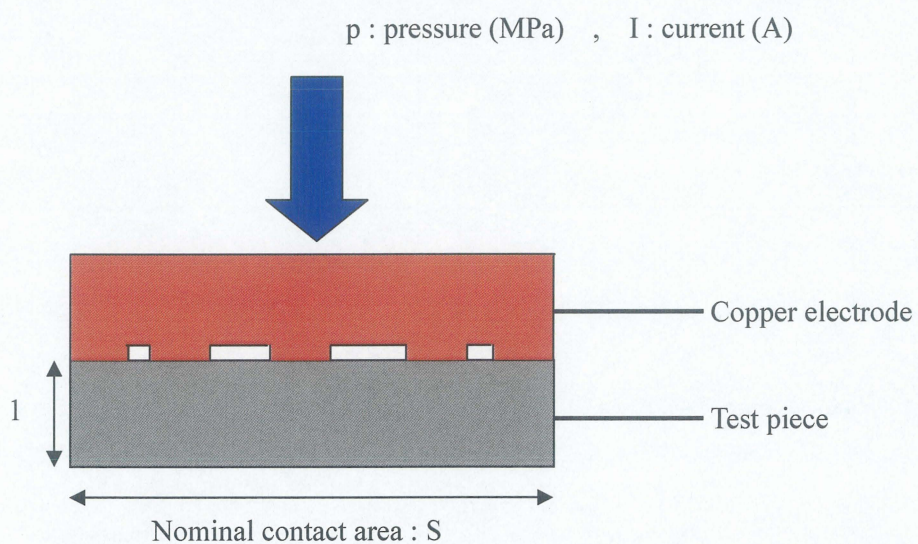


Fig.2.2 Touching point of actual contact condition test piece

I : 電極を流れる電流 (A)

i : 公称電流密度 (A/mm^2)

S : 電極と試験片の公称接触面積 (mm^2)

ρ : 試験片の抵抗率 ($\Omega \cdot \text{mm}$)

公称接触面積での単位体積あたりの発熱量

$$q_N = \rho \times \left(\frac{I}{S}\right)^2 \quad (2.1)$$

真実接触面積(接触率 ε)での単位体積あたりの発熱量

$$q_R = \rho \times \left(\frac{I}{S \times \varepsilon}\right)^2 \quad (2.2)$$

ここで、図 2.2 に示すように仮想厚みを 1 とすると、

公称接触面積 S を対象とした、発熱部での発熱量

$$q_1 = \varepsilon \times S \times 1 \times q_R \quad (2.3)$$

公称接触面積 S を対象とした、非発熱部での発熱量

$$q_2 = (1 - \varepsilon) \times S \times 1 \times 0 = 0 \quad (2.4)$$

体積あたりの平均発熱量

$$\bar{q} = \frac{q_1 + q_2}{S \times 1} = \rho \times \frac{1}{\varepsilon} \times \left(\frac{I}{S}\right)^2 = \frac{1}{\varepsilon} \times q_N \quad (2.5)$$

\therefore 発熱量は接触率に反比例する

第3章 通電加熱焼入れ実験

3-1 実験材料

実験には、プレス金型の材料として使われている空冷でも焼きが入るフレイムハード鋼 HMD5 を用いた。本材料より、 $20\text{mm} \times 20\text{mm} \times 50\text{mm}$ のサイズの試験片を切り出し、実験に供した。図 3.1 に切り出した後の試験片写真を示す。

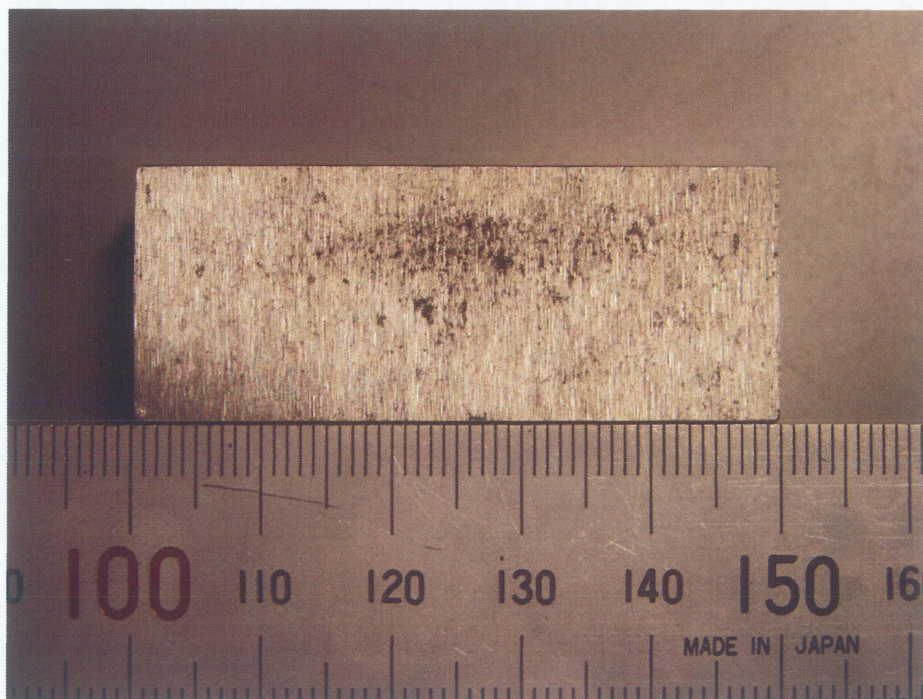


Fig.3.1 Test block

3-2 スパーク発生限界

図 3.2 に、本研究で試みた通電加熱を利用した部分焼入れ法を行うための装置を示す。また、試験片の加熱部分と接触させる銅電極の詳細を図 3.3 に示す。市販のダイセットのパンチホルダーとダイホルダーに銅板を絶縁して取り付け、さらに、パンチホルダー側の銅板に、図 3.3 に示した銅電極を、ダイホルダー側には図 3.1 に示した試験片をそれぞれ取り付けた。そして図 3.4 に示したバネを使用してパンチホルダーに荷重を加えて、電極と試験片を所定の圧力にて接触させる。この状態で通電し、試験片の電極接触部を抵抗加熱した。ここで、パンチホルダーの重さは図 3.5 に示すような状態でバネによる吊り上げによって相殺されており、銅電極と試験片との接触圧力には影響しないようにしてある。加熱後の処理操作として、電極を試験片から離す場合と離さない場合の二つのモードが考えられるが、本実験では、後者のモードを採用し、数秒間、電極を接触させたままにして冷却した。電極と試験片の接触は平坦面同士の接触とし、試験片の接触面にはエメリー紙（＃1200）による研磨処理を施した。加熱電源には二次出力電圧（無負荷実効値）が 0～10V の範囲で調整可能な常用定格 10kVA の交流電源を用い、通電時間制御による加熱を行った。図 3.6 には電線のつなぎ方とそれによる電流の流れ方を示す。片側に銅線を並べて配線すると実験装置自体のバランスが悪くなる。また、電流の分布に偏りが生じる可能性があるためこのような電線のつなぎ方になっている。図 3.7 には試験片に掛かる電圧を測定するための配線図を示す。通電条件を決める際に変圧器による無負荷電圧を参考にしたので、実際には試験片にどの程度の電圧が掛かっているかを測定するために、このような配線を施した。

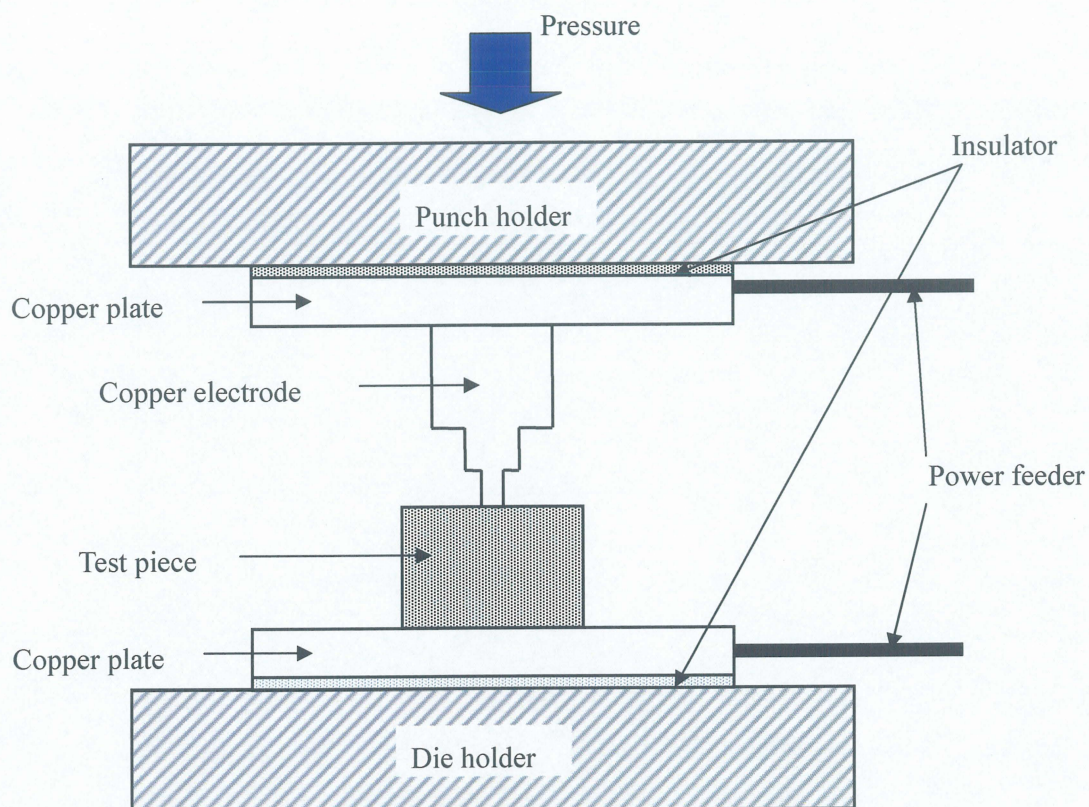


Fig.3.2 Local hardening method using resistance heating

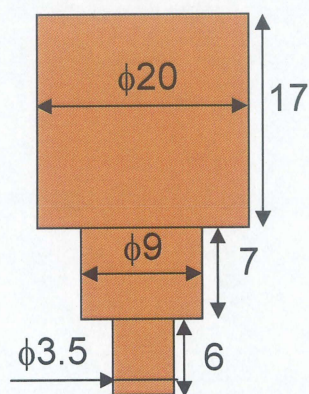


Fig.3.3 Size of copper electrode

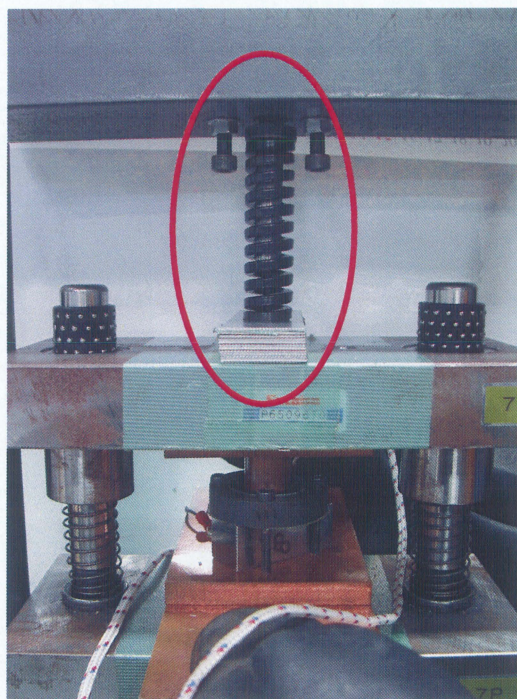


Fig.3.4 Spring to apply pressure

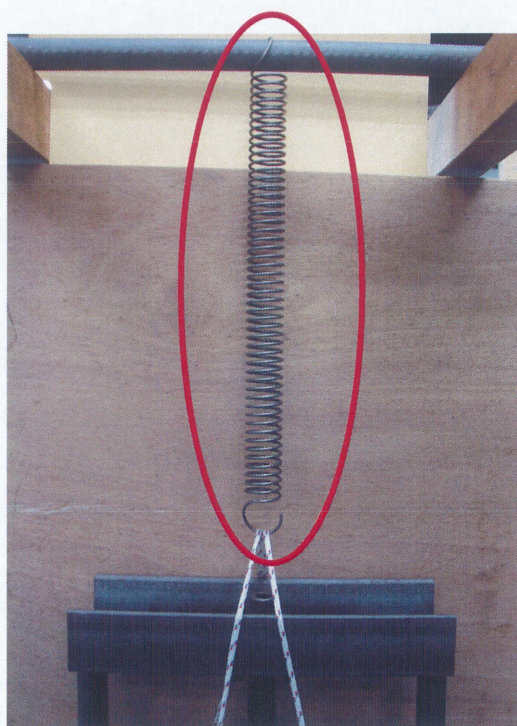


Fig.3.5 Spring for balance adjustment of load

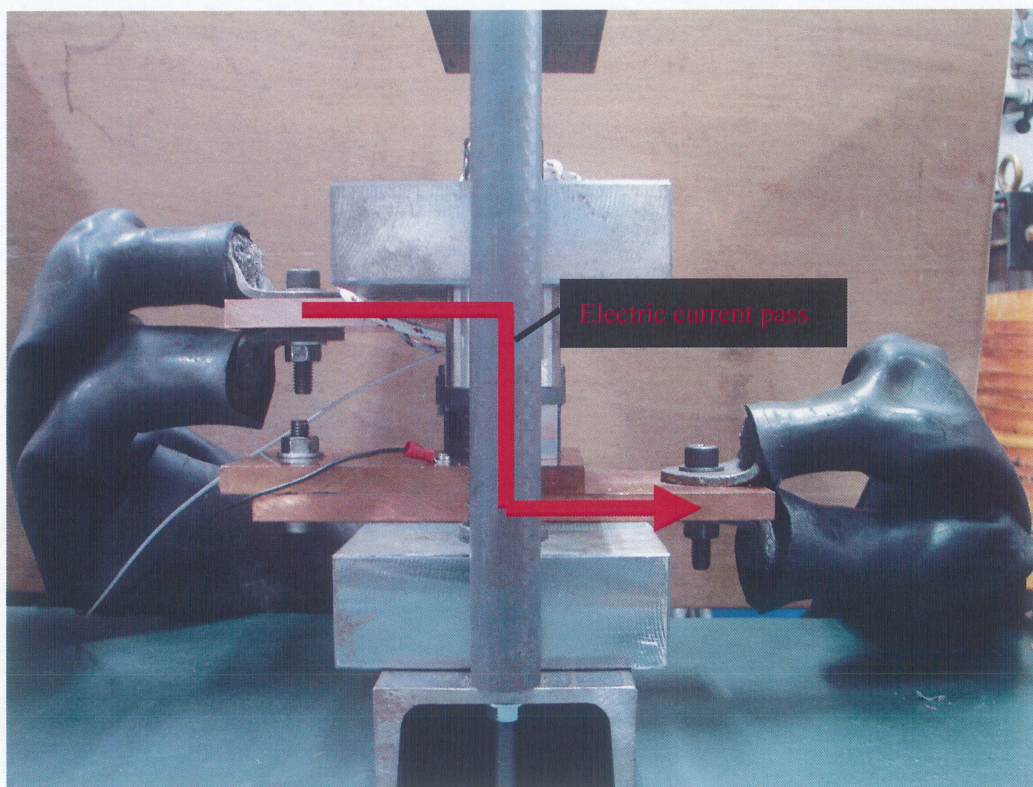


Fig.3.6 Way of connecting electric cable and electric current pass

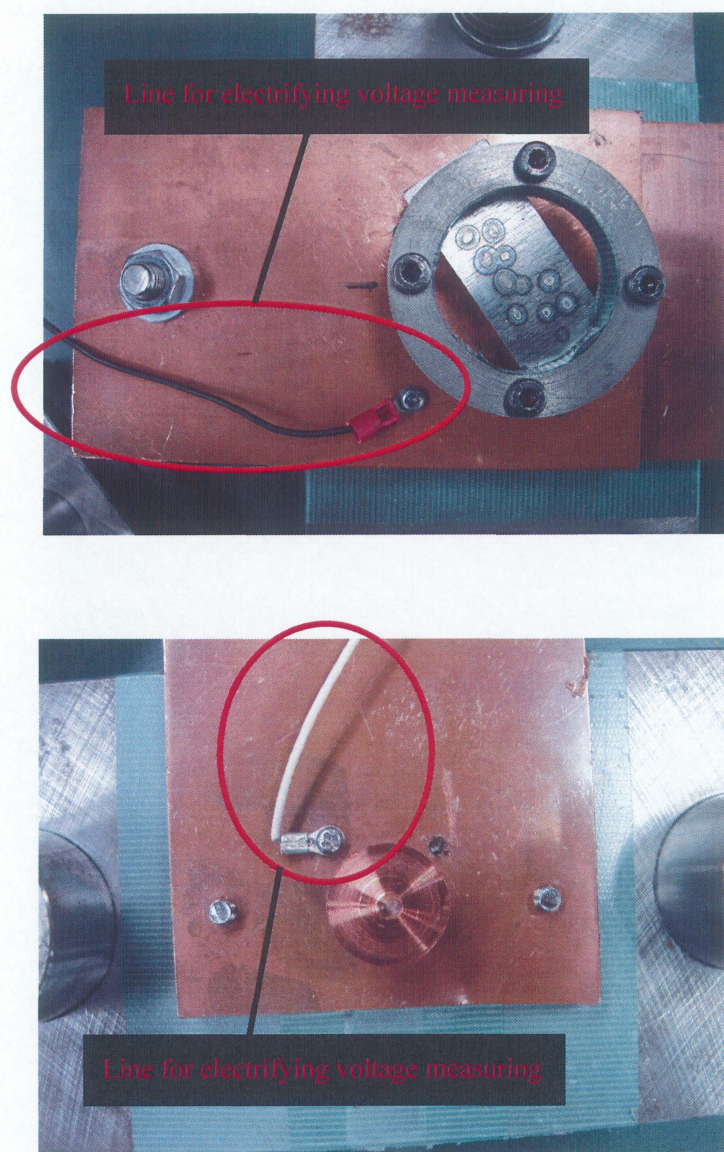


Fig.3.7 Line for electrifying voltage measuring

この通電加熱装置を使用して部分焼入れを行った、まずは通電加熱を行う際に最も注意しなければならないスパーク発生条件を調査する。スパークが発生すると金属表面に傷をつけてしまうので、製品としての価値が無くなる。また、スパークは試験片だけに影響があるわけではなく、銅電極の先端を破壊してしまう。したがって、スパークの発生条件を調査することは部分焼入れに通電加熱を利用するにあたって絶対必要である。

試験法としては、図 3.2 の様に試験片を設置し、通電電圧、電極接触圧力をそれぞれ変化させスパークが発生するかどうかを観察する。通電時間は一律に 0.5 秒で行っている。スパーク発生判断は、通電後の試験片表面がスパークにより溶けることで傷が出来るのでその状態が確認出来れば発生したと判断する。また、通電時に電流と電圧の波形をモニターしており、スパークが発生すれば波形が乱れるのでその乱れもスパーク発生判断とする。例として図 3.8 にはスパークが発生しなかった時の試験片表面の写真、図 3.9 にはスパークが発生した時の試験片表面の写真を示した。図 3.8 に関して、試験片の表面にある円形部が加熱を行った部分である。写真で見れば加熱部とそうでない部分は膨らんでいる、もしくはへこんでいるように見えるが実際に触れてみると全く凸凹を感じることは無く平坦である。図 3.9 に関して、試験片の表面にある中央よりの円形部が加熱を行った部分である。そしてその加熱部の左上側にある痕がスパーク痕である。

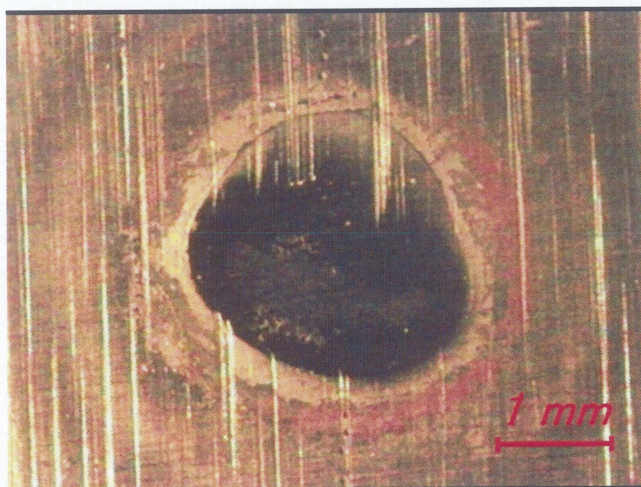


Fig.3.8 The test piece surface without sparking



Fig.3.9 The test piece surface with sparking

3-3 単発通電焼入れ

前項にて得られたスパークの発生しない安全域で通電加熱を利用した部分焼入れを行う。そして焼入れ後硬さを評価するための方法としてはビッカース硬さ試験を行う。試験荷重を 1.0kgf で、荷重保持時間は 15 秒とする。圧痕間の距離は 0.5mm とし、硬さの変動が大きい地点に関しては、詳細に硬さの分布を調べるために圧痕間隔を短く取る。図 3.10 に加熱範囲に打つビッカース圧痕の例を示す。

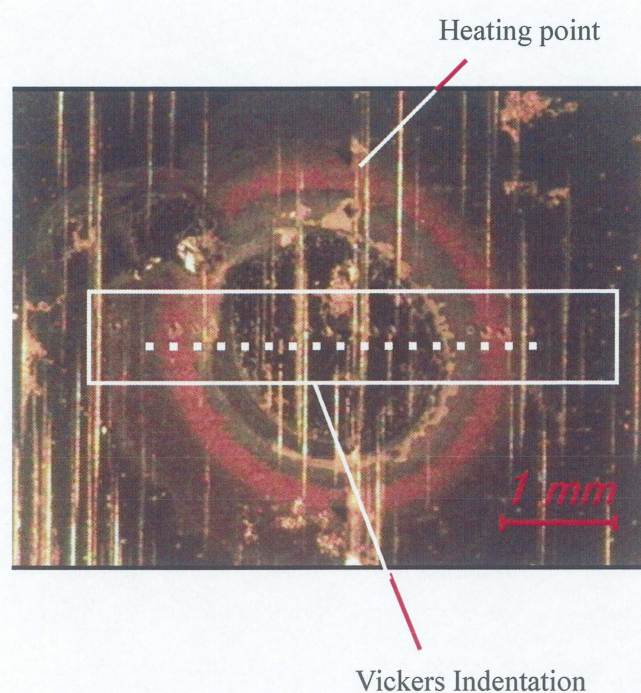


Fig.3.10 Example of Vickers indentation on the test piece surface

3-3-1 通電電圧の影響

実際の生産ライン等では時間短縮を非常に重視することから、焼入れ処理に関しても短い時間であることが望ましい。本加熱法は通電加熱の特性を生かしているため非常に短時間で加熱処理が行えるが、加熱時間を短くすればするほど投入電力量を高くする必要がある。しかし、投入電力量が高すぎるとスパークが発生する可能性が高くなる。そこで、本実験では、前項にて調査したスパークが発生しない安全域にて、通電電圧(無負荷電圧)が焼入れ後硬さにどのように影響するかを、電極接触圧力を一定にして調査した。通電時間は2.0秒である。

3-3-2 電極接触圧力の影響

前項の通電加熱の原理から電極接触圧力が低ければ低いほど発熱量が高くなることが考えられる。電極接触圧力が高い場合はスパークの発生しない安全域が広がるが、接触率が高いので熱の逃げが多くなると予想出来、オーステナイト域にまで加熱する事が出来ない可能性がある。逆に電極接触圧力が低い場合では、接触率が低いので発熱量が高くなるが、低すぎればスパークが発生することに注意しなければならない。本実験では、スパークの発生しない安全域で通電電圧を一定値にして電極接触圧力を変化させ、電極接触圧力が焼入れ硬さにどのような影響を及ぼすかを調査した。通電時間は2.0秒である。

3-3-3 電極径の影響

本研究では電極径を 3.5mm に設定して通電焼入れを行っている。そこで、直径が大きければ大きい程、焼入れ硬化の範囲が広がることが予想できる。しかし、電極径を大きくすると接触面積が増えるので、電極接触圧力によるスパーク発生限界も変わり、熱の分布も変わるため、電極径 3.5mm での加熱の場合と条件が変わることに注意しなければならない。直径を大きくすれば直径 3.5mm での硬さ範囲に比べどれ程まで広がるかを調べた。本実験では電極径 5.0mm と 3.5mm での加熱後の硬さを比較した。

予備実験の段階で、電極径 5.0mm での加熱には中心部で加熱ができないという問題がわかっていて、本研究で使用する銅電極は旋盤による加工によって作成されている。旋盤による加工では加工面の中心が微少ではあるがへこむといった特徴がある。おそらくこのことが中心部にて加熱がなされないことの一因ではないかと考えた。そしてもう一つは実験装置の微妙な作りのずれから生じる、ばねによる圧力の中心と、銅電極と試験片の接触中心との微妙なずれが一因ではないかと考えた。そこでこの問題を解決するために、図 3.11 のように銅電極の先端に銅箔(0.12mm)を 3 枚重ねて接触させることで接触を均等に行えるようにした。

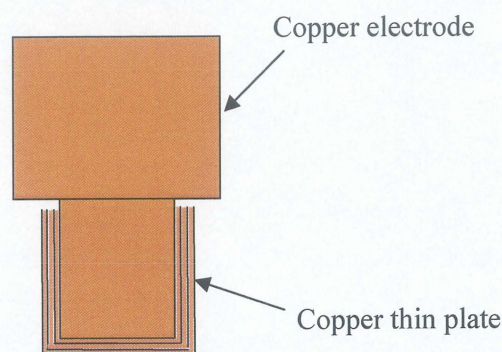


Fig.3.11 Local hardening with copper electrode of 5.0mm diameter

3-3-4 深さ方向の硬さ分布

前項までは表面硬さに着目して測定を行ってきたが，深さ方向については触れてこなかった．機械や装置の部品に表面焼入れを行った際，表面は硬くても内部の硬さが急に軟らかくなれば陥没，剥離等が発生し，故障の原因になるため深さ方向の硬さ向上も重要である．そこで本項では深さ方向の硬さがどのように分布しているのかを調査した．図 3.12 に試験片の焼入れ部分の中心で切った断面にビッカース圧痕を打った例を示す．通電加熱を行った後，ファインカッターにより焼入れ部分を真ん中で切り分け，加熱中心のある試験片端から 0.15mm 離れた部分から硬さを測定していく．また，加熱中心からの深さ方向への硬さ分布を測定した後，加熱中心部分から半径方向に 0.5mm 離れた部分から同様の方法で深さ方向の硬さ分布を測定し，最終的に半径方向 2.0mm の地点まで測定する．

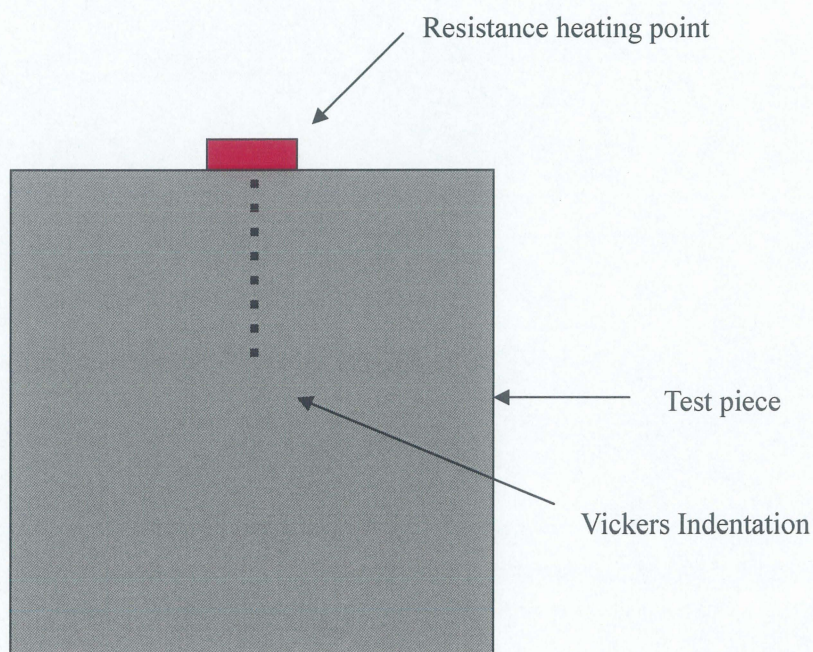


Fig.3.12 Hardness distribution of depth direction at resistance heating area

3-4 多点通電焼入れ

前項までは通電焼入れを試験片上で一点だけ行い、条件ごとのビッカース硬さを測定してきた。しかし、実際の金型に局所焼入れを行うには線状、面状の様に、より広い範囲の硬化範囲が必要となる。実際の生産ラインでの適用を考えると図 3.13 のシーム溶接に使用されるような電極の銅ロールを転がしてロールと被処理材との接触部を連続で焼入れを行うことで、線状、もしくは面状を焼入れ硬化するといった構造が考えられる。また、今回の部分焼入れ用銅電極を使用して連続で焼入れるためには図 3.14 のようにロボットアームに銅電極を取り付けて焼入れ箇所を移動させる、もしくは被処理材を移動させて焼入れ箇所を変えるなど電気制御によって行うパターンが考えられる。しかし、今回は基礎研究の段階であるので行う予定はない。

今回は、部分焼入れを一度行った後、焼入れ中心をずらしてもう一つ部分焼入れを行う。一つ目の焼入れ硬化部分に対して、二つ目の通電焼入れ時の熱が影響して硬さが低下する可能性があるので、一つ目と二つ目の焼入れ中心の距離をピッチと定義し、実験条件としてピッチを変えて硬さに対する熱影響について調査する。図 3.15 に本実験にて行う多点通電焼入れのモデルを示す。本研究にて使用する電極形状から硬化領域は円形なので、硬化領域ぎりぎりの重ね方では、重なり付近の硬化範囲がせまくなる。そこでピッチを硬化範囲直径の 50%程度の重なりが適当と思われる。ここで、今回は一点目の焼入れ硬化部に二点目の焼入れ時の熱がどのような影響を及ぼすかを調査するため二点のみの加熱とする。

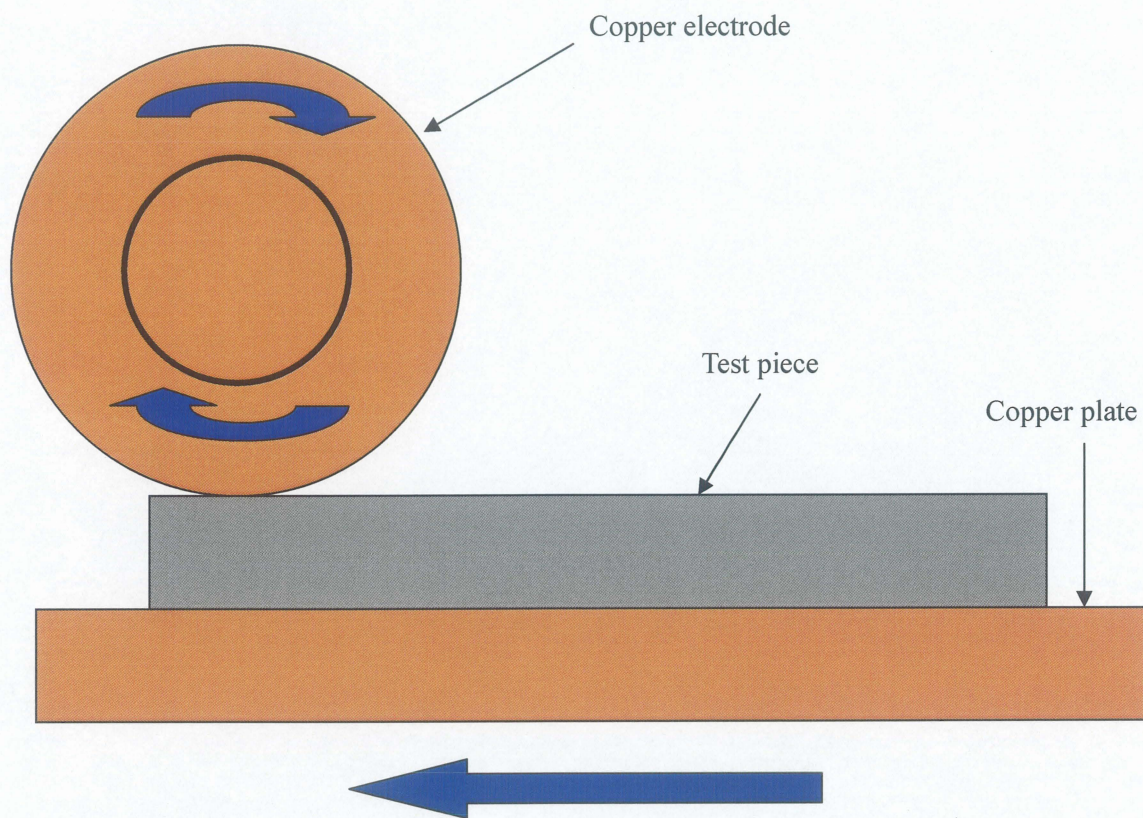


Fig.3.13 Example of progressive treatment for line or plane hardening (1)

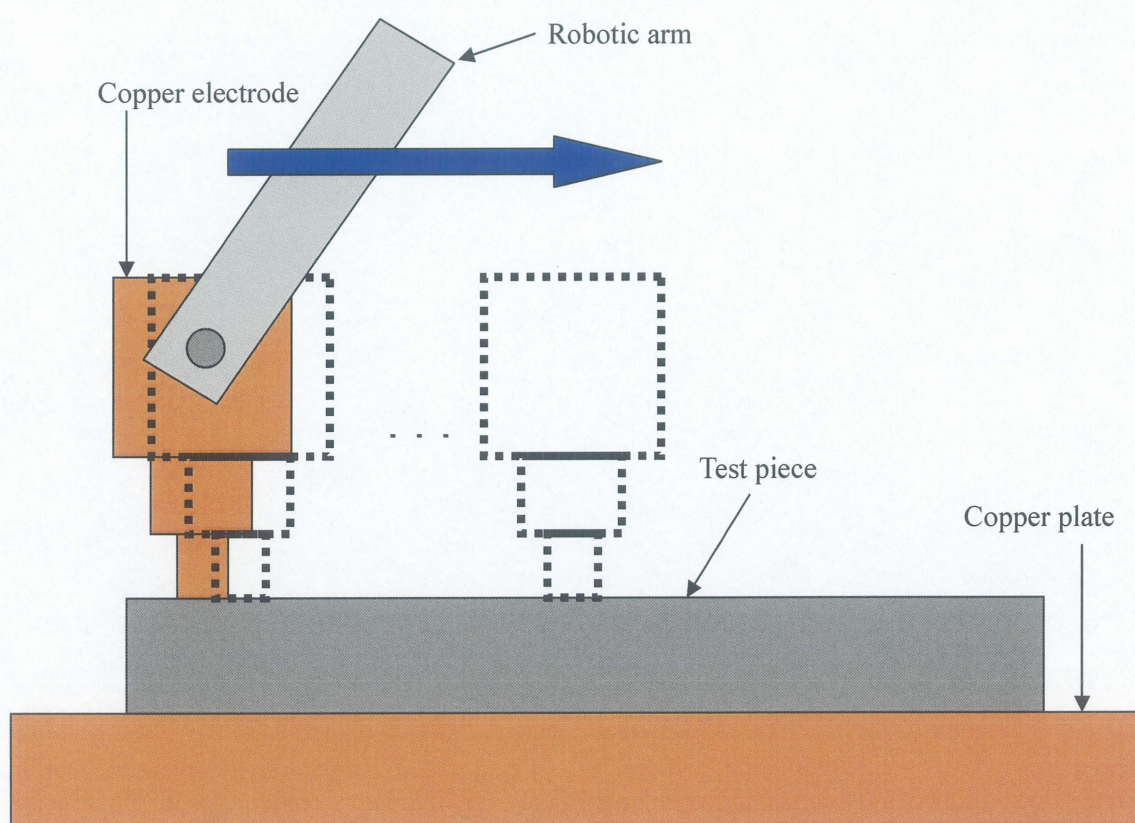


Fig.3.14 Example of progressive treatment for line or plane hardening (2)

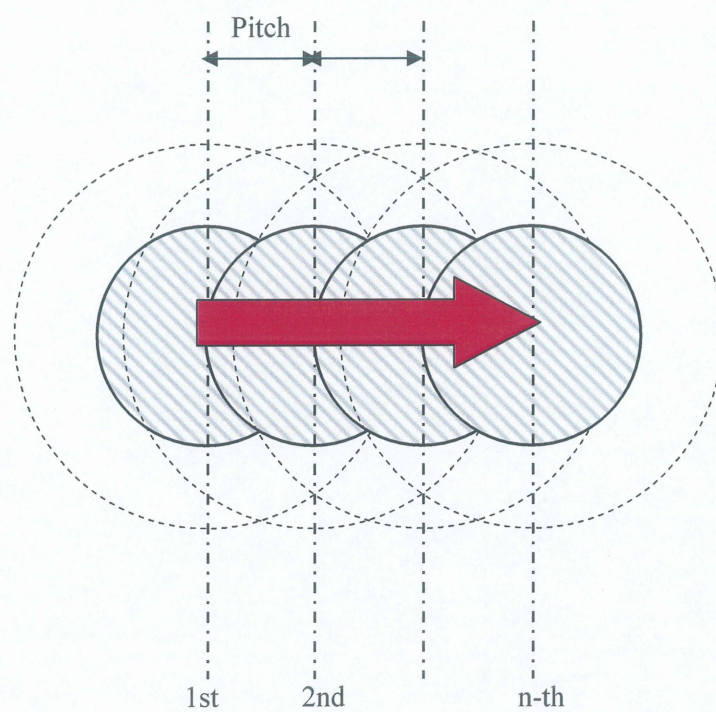


Fig.3.15 Progressive treatment for line or plane hardening

第4章 実験結果及び考察

4-1 スパーク発生限界

通電加熱を用いる本焼入れ法では、電極と被処理材との間でスパークが生じると被処理材の表面に傷をつけてしまい、製品としての価値を失う。したがって、スパークの発生は防がなければならない。そこで、通電電圧と電極接触圧力を変化させた通電加熱実験を行い、通電電圧と電極接触圧力とスパーク発生の有無との関係を調べた。

ここで、実験条件として電極接触圧力は 9.8, 19.6, 29.4, 49MPa で通電電圧は 0.5~3.5V としており、通電時間は 0.5 秒としている。スパークが発生したと判断する基準だが、一つは目視観察による試験片表面の電食による傷の有無の確認(図 3.8, 図 3.9 参照), そしてもう一つは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, これらによって判断した。図 4.1 に結果を示す。○印はスパークが発生なし, ×印はスパークが発生したことを表す。電極接触圧力 9.8MPa では通電電圧 1.5V, 19.6MPa では 2.0V, 29.4MPa では 2.5V, 49MPa では 3.0V の値が限界電圧値となる。傾向としてはスパークの起こらない安全域と、スパークの発生する危険域の境界は放物線状に分かれており、電極接触圧力が増えるにしたがって限界電圧が上昇することがわかる。

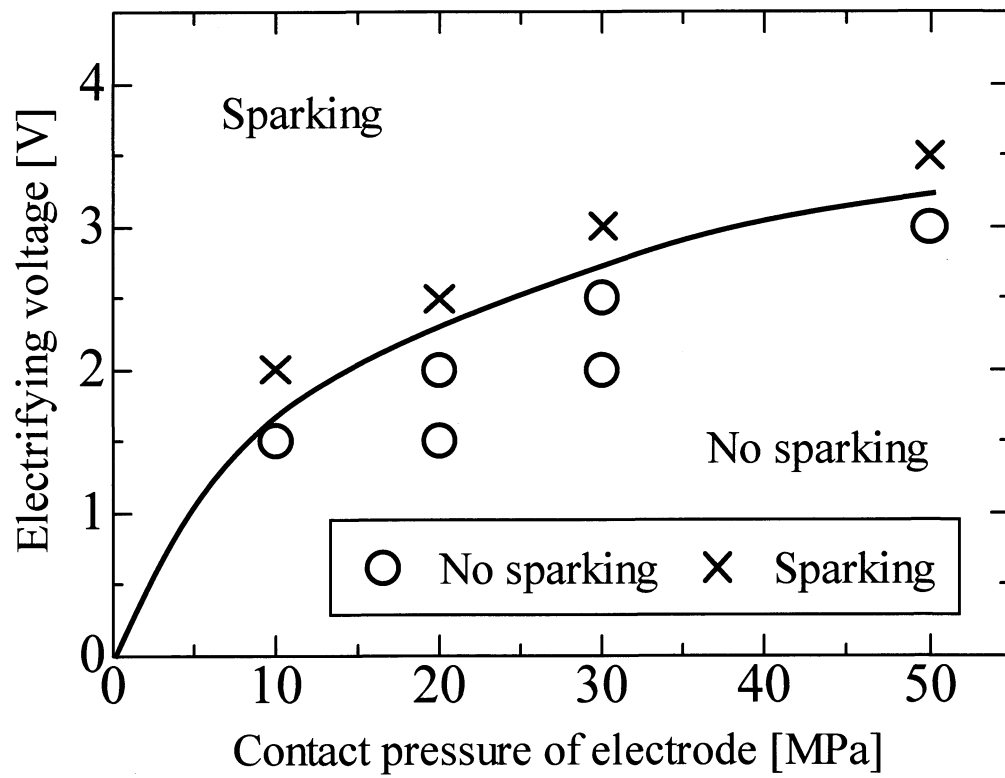


Fig.4.1 Outbreak condition of sparks as a function of contact pressure of electrode and electrifying voltage

しかし、通電電圧は被処理材の抵抗によって左右されるので、通電電圧によって整理した図 4.1 は普遍的な結果を示しているとは言えない。そこで、スパークは真実接触面での電流密度がある一定の値(材料によって変動する)を超えると発生することが分かっている。したがってより有益な結果にするためには電流密度（公称値）と電極接触圧力との関係を把握する必要がある。以上のことを踏まえて情報を整理し、図 4.2 に示した。ここで、実験で測定した通電初期のピーク電流を三点選び出し、平均化する。そしてその平均値を実効値にするために $\sqrt{2}$ で割り、算出した値を接触面の公称面積で割ることで、公称電流密度を求める。

図 4.2 において、先程と同様に○印はスパーク発生なし、×印はスパーク発生ありを表す。中央部の線を境に左上部はスパークが発生する危険域となっている。また、右下部はスパークの発生しない安全域となっている。電極接触圧力 9.8MPa で限界公称電流密度 $117\text{A}\cdot\text{mm}^{-2}$ 、19.6MPa で $153\text{A}\cdot\text{mm}^{-2}$ 、29.4MPa で $208\text{A}\cdot\text{mm}^{-2}$ 、49MPa で $244\text{A}\cdot\text{mm}^{-2}$ という結果になった。19.6MPa のスパークが発生しない公称電流密度の値とスパークが発生した公称電流密度の値に大きな開きがあるが、無負荷電圧の制御により実験を行っており、0.5V 刻みで電圧値を上下していたので、電極接触圧力 19.6MPa での実際の安全電流密度は今回の値よりも大きい値、また危険電流密度は小さい値であると考えられる。この項以降、通電条件が硬さに及ぼす影響を調べる実験条件はこの安全域にて行う。

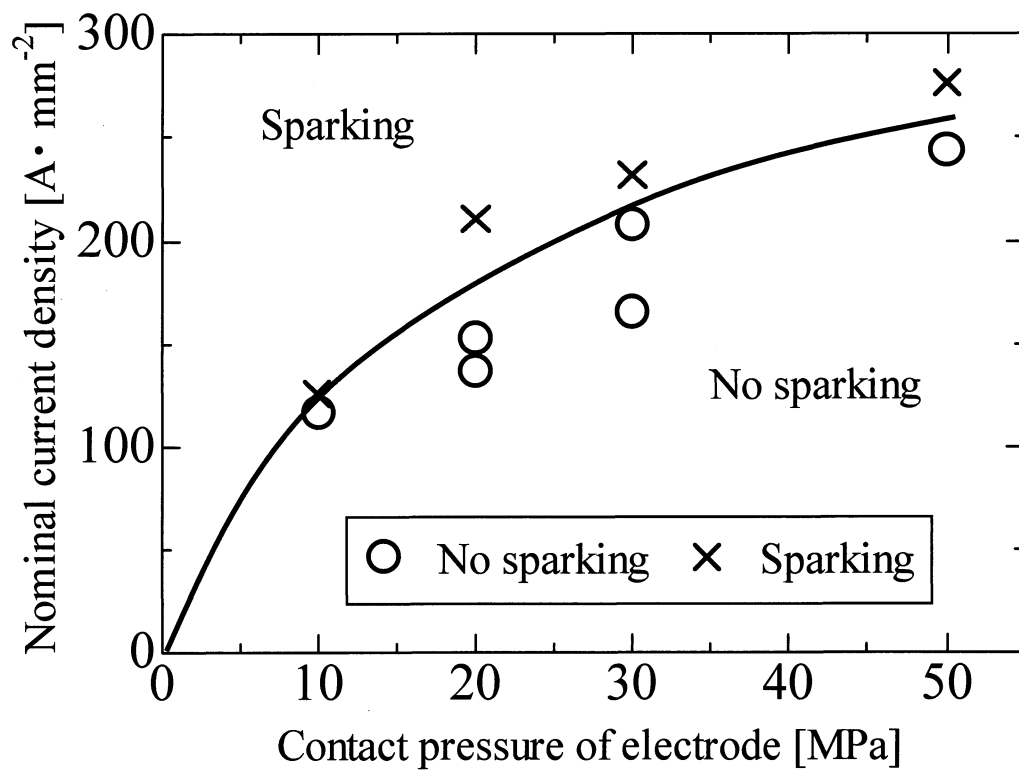


Fig.4.2 Outbreak condition of sparks as a function of contact pressure of electrode and applied nominal current density

4-2 単発通電焼入れ

4-2-1 通電電圧の影響

通電電圧を高くすれば、流れる電流が大きくなるので電流密度も大きくなり、単位時間あたりの発熱量が増加する。そこで、電極接触圧力 29.4MPa 一定の下で、通電電圧を変化させた加熱を行った。そして冷却後の電極接触部分のビッカース硬さを調査した。

図 4.3 に、結果を示した。グラフ上の破線は公称接触面積を示しており、縦軸にはビッカース硬さを、横軸には電極接触部の中心からの距離をとった。通電電圧は3種類の条件(1.5V, 2.0V, 2.5V)にて行った。通電電圧 1.5V, 2.0V の場合では硬さが向上していない。これは、投入電力量が足りておらず、表面温度がオーステナイト化温度にまで到達出来なかったことが原因と考えられる。しかし、2.5V の場合では硬さが向上しており火炎焼入れによって得られる硬さと同等の硬さまで到達していることから、オーステナイト化温度にまで加熱できているということがわかる。また、通電電圧 2.5V の場合の公称電流密度は $216\text{A} \cdot \text{mm}^{-2}$ であり、スパーク発生限界の許容範囲ぎりぎりである。本実験にて使用した電極直径は 3.5mm だが、3.5mm の範囲すべてが硬化したのではなく、電極と接触している部分の外周部では焼入れ硬さが得られなかった。結果的に硬化領域は直径 2.0mm の範囲であるということがわかった。これは試験片の表面部分の外側に通電によって発生した熱が奪われたことが原因と考えられる。図 4.4 に加熱後の試験片表面の写真を示した。1.5, 2.0V の場合、加熱領域とその他の表面との違いがあまり見られない。2.5V の試験片は加熱領域とその他の領域の表面に大きな違いが見られる。

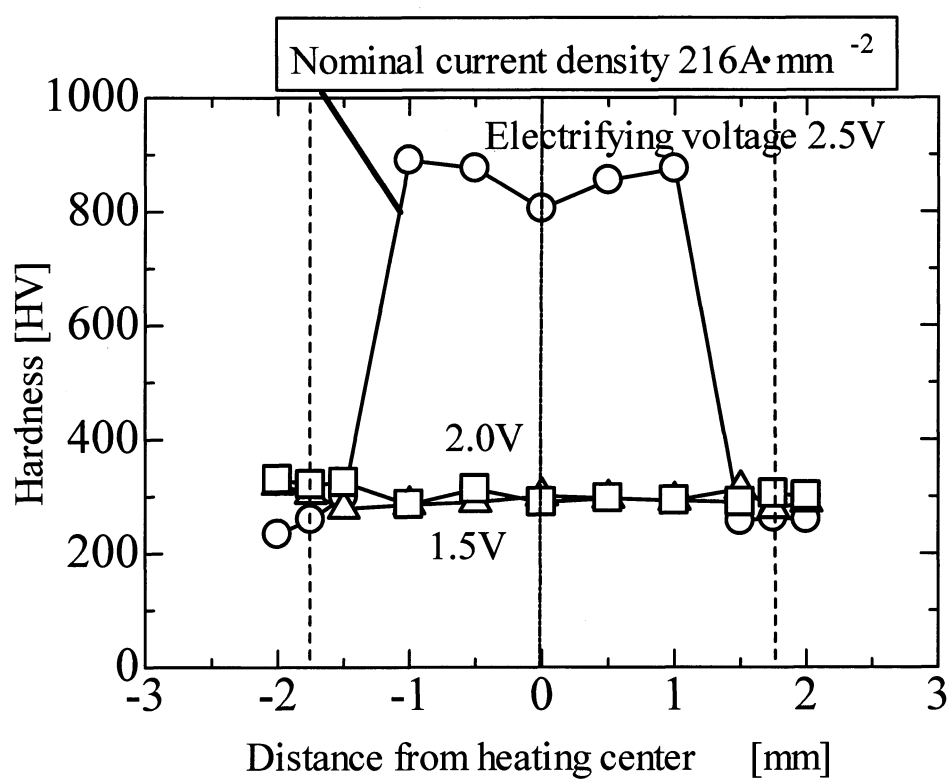


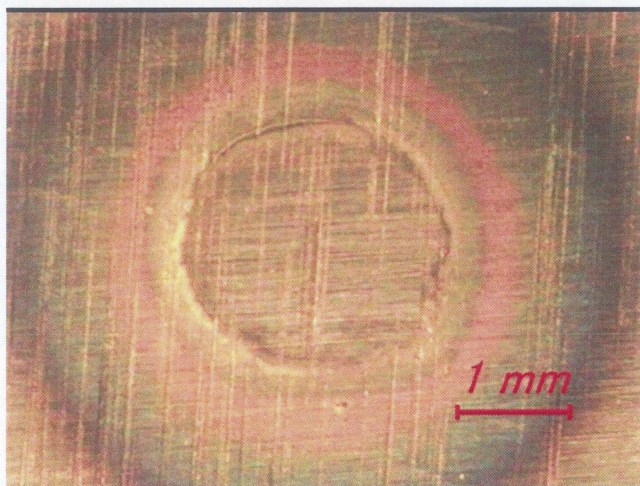
Fig.4.3 Hardness development in contact area, showing influence of electrifying voltage



1.5V



2.0V



2.5V

Fig.4.4 Surface of test piece after heating treatment

4-2-2 電極接触圧力の影響

前項のスパーク発生限界に関する実験の結果より、電極接触圧力が低い値である程、低い通電電圧の値でスパークが発生している。しかし、通電加熱の原理から電極接触圧力の低減は接触部の加熱効率を高める場合に有効であることが考えられる。そこで、通電電圧を 1.5V に固定して、電極接触圧力を変化させた加熱を行い、各加熱条件でのビッカース硬さを調べた。

図 4.5 に結果を示す。グラフ上の破線は公称接触面積を示しており、縦軸にビッカース硬さを、横軸には電極接触部の中心からの距離をとった。電極接触圧力 9.8MPa では焼入れ硬化が得られているが、19.6MPa, 29.4MPa では硬化が得られていない。接触圧力が低い場合は前項の通電加熱の原理にて述べたように接触率が低くなり、式(2.5)に表すように反比例の関係で発熱量が高くなるため、電極接触圧力 9.8MPa では十分な加熱が出来たので、接触部の温度がオーステナイト化温度域に達して焼入れにより硬さが向上したと言える。その際の公称電流密度は $106\text{A}\cdot\text{mm}^{-2}$ であり、スパーク発生限界の許容範囲ぎりぎりである。19.6, 29.4MPa では逆に接触率が高くなり、反比例の関係で発熱量があまり上がらず、接触部の温度がオーステナイト域にまで達しなかったので硬さが向上しなかったといえる。また接触率が高いということは銅電極と多く接しているということで、加熱時の熱が接触率の低い場合と比べて、熱伝導の良い銅電極の方へ多く逃げていると考えられる。

$$\bar{q} = \frac{1}{\varepsilon} \times \rho \times \left(\frac{I}{S}\right)^2 \quad (2.5)$$

ただし、接触圧力を下げ過ぎれば限界公称電流密度が低下し、スパークが発生する可能性があることに注意しなければならない。図 4.6 に焼入れ後の試験片表面を示す。

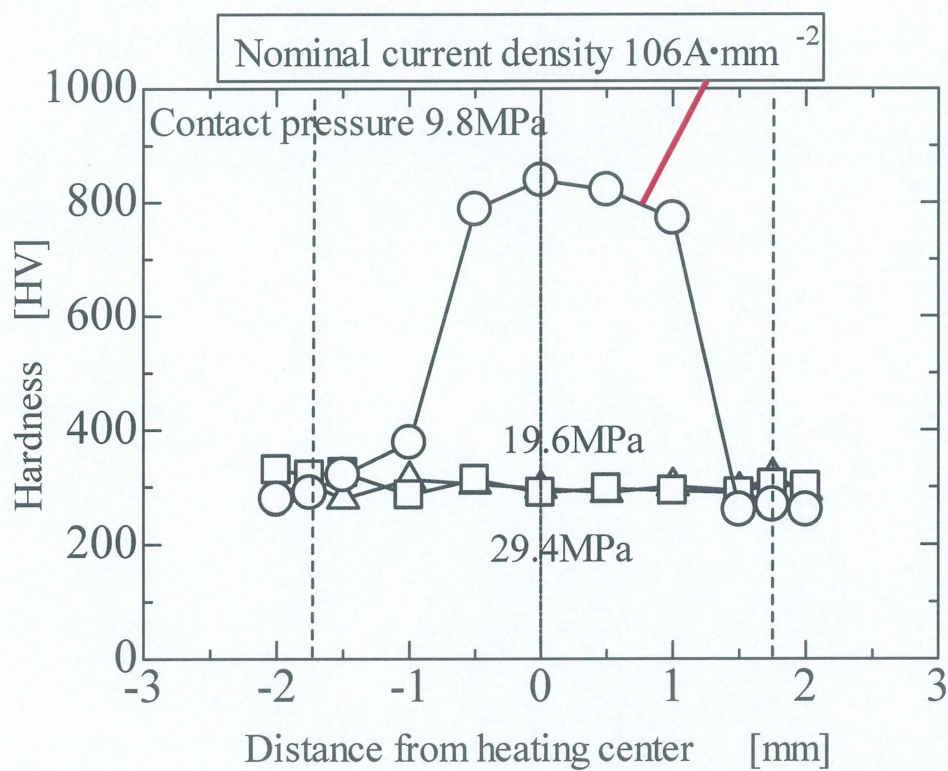
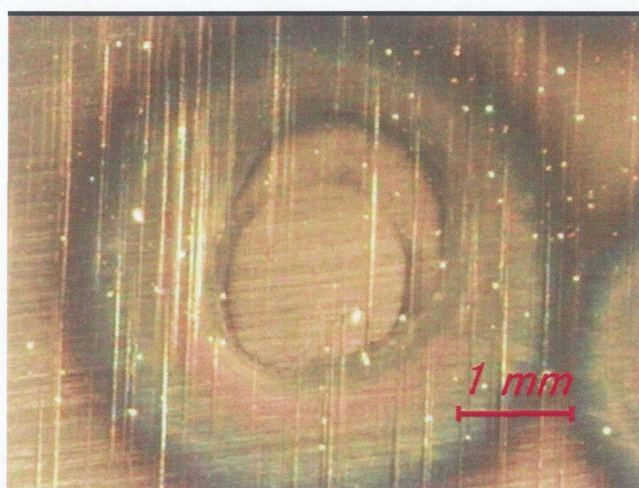
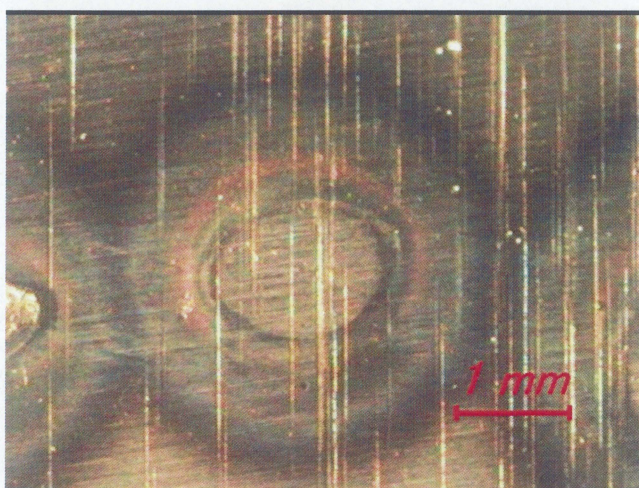


Fig.4.5 Hardness development in contact area, showing influence of contact pressure



9.8MPa



19.6MPa



29.4MPa

Fig.4.6 Surface of test piece after heat treatment

4・2・3 電極径の影響

前項までは電極径 3.5mm で加熱を行ってきたが、一度に行う焼入れ硬化範囲は広ければ広いほうが良いので、本項では電極径 5.0mm にした場合、焼入れ硬化範囲はどのようなかを調べた。電極径 5.0mm での加熱条件は電極接触圧力 29.4MPa, 通電電圧 5.0V, 通電時間 2.0 秒にて行った。前項までの傾向として、スパークが発生しない安全域内の限界に近い条件にて通電加熱することで焼入れ硬化が期待できることがわかっている。電極径 5.0mm では電極接触圧力 29.4MPa において安全域内の限界が通電電圧 5.0V であるため抜粋した。比較する条件として、電極径 3.5mm, 電極接触圧力 29.4MPa, 通電電圧 2.5V, 通電時間 2.0 秒での硬さ分布を使用した。結果を図 4.7 に示す。また図 4.8 には焼入れ後の試験片表面の写真を示す。

結果として、大きく見れば硬さの範囲が広がっているように見える。しかし、電極径 3.5mm の硬さ分布から電極径 5.0mm の硬さ分布を考えた場合、一定の硬さ分布になるはずであるが、実際には部分的に硬さが低下している。予想される原因として偏当りが考えられる。電極径が 3.5mm と比べ 5.0mm の面積は約 2 倍大きいいため、電極接触圧力の掛かり方に差が出た可能性がある。

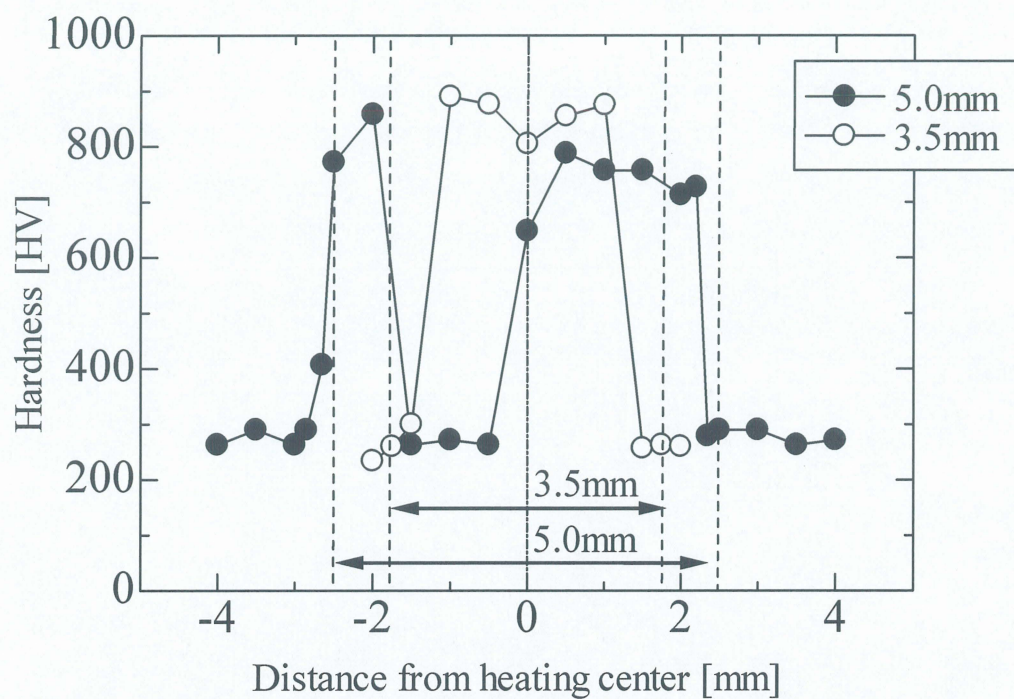


Fig.4.7 Hardness development in contact area, showing influence of electrode diameter

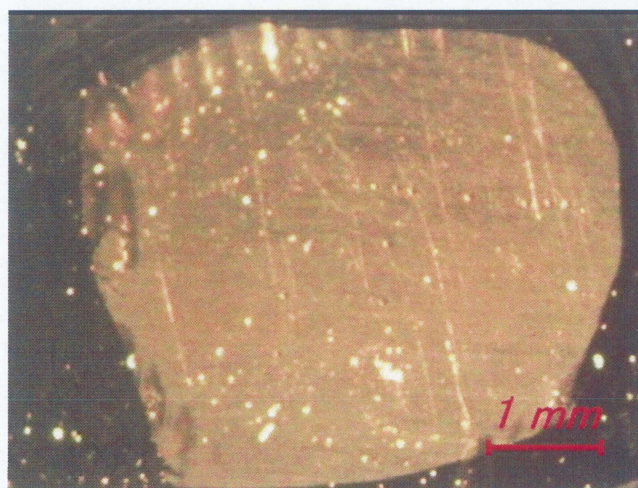


Fig.4.8 Surface of test piece after heat treatment (electrode diameter 5.0mm)

ここで、電極径 5.0mm、電極接触圧力 29.4MPa、通電電圧 5.0V の条件で焼入れ硬化を行った範囲の硬さ分布を調べた。先に硬さを測定した方向から反時計回りに 90 度回転させた方向の硬さ分布を測定した。この硬さ分布と先に測定した結果を同じグラフ上に並べて図 4.9 に示す。結果として、焼入れ硬さ自体に多少の差はあるものの電極接触部の一部に大きな加熱が行われたことで硬さが向上、ある部分では加熱がされず硬さが上がっていないという傾向は、 0° と 90° の両方に出ており、似た硬さ分布を示している。この結果から接触に偏当りが発生しているということがわかる。図 4.10 は図 4.9 の硬さ分布を接触面上に表示したものである。右上部では銅電極の接触が正確なので加熱が行われ硬さが向上しており、図中の X の範囲は少なくとも硬さは向上していると考えられる。左下部では接触部している所が少なく加熱がされても一部分でしか硬さが向上しなかったと考えられる。予備実験によって電極径 5.0mm のみで通電加熱した場合、偏当りが発生したことから厚さ 0.12mm の銅箔を重ねて防ごうとしたが、まだ偏当りは発生している。

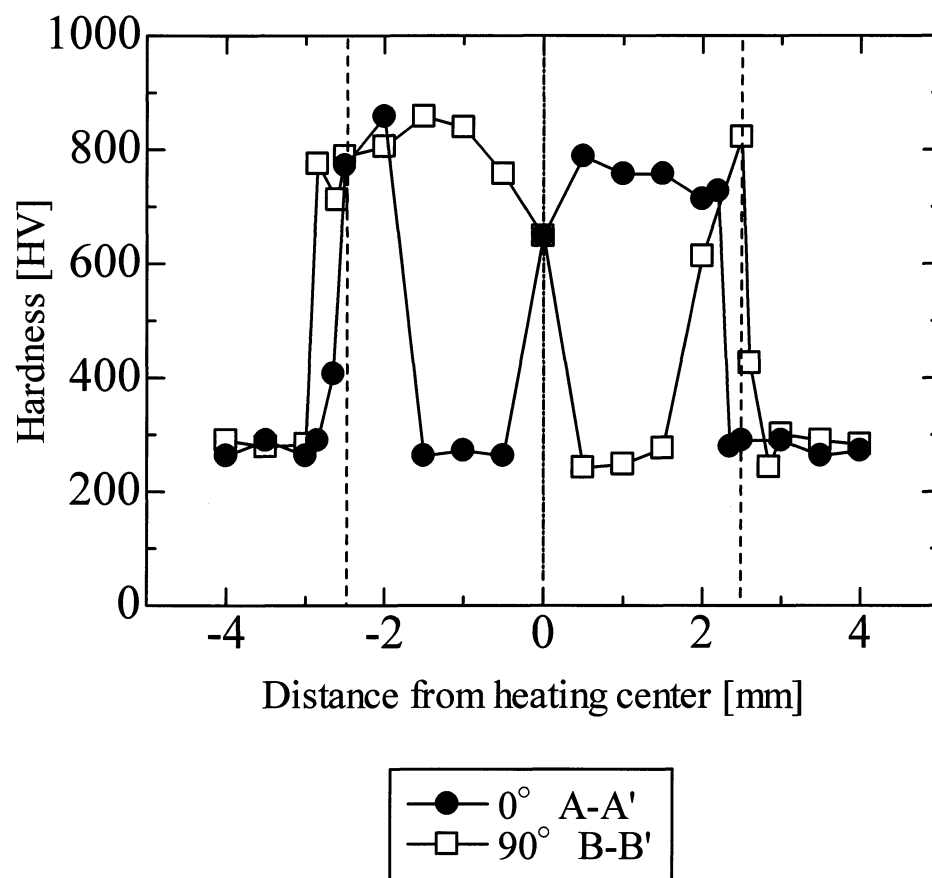


Fig.4.9 Hardness development in contact area

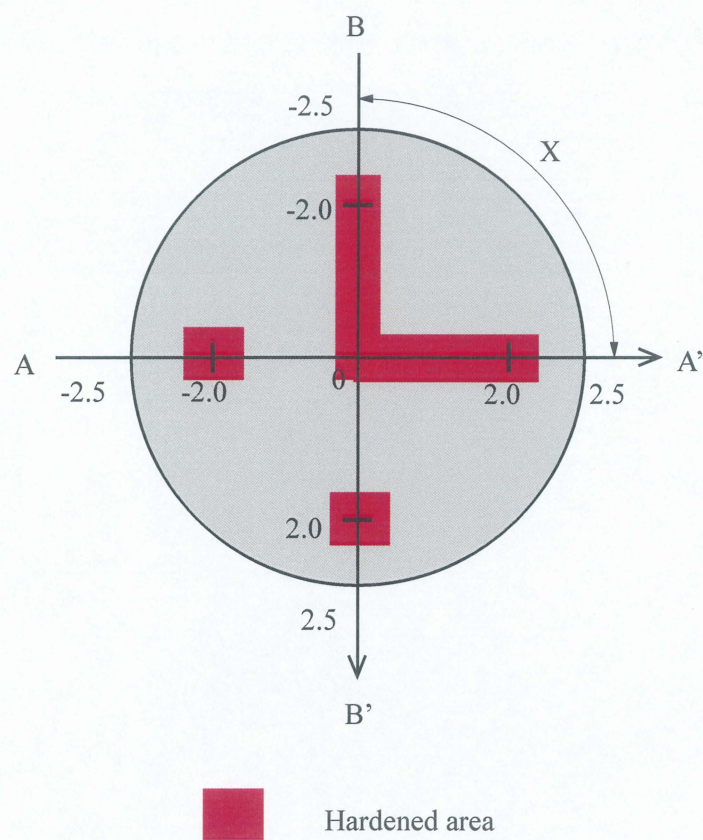


Fig.4.10 Hardness distribution with electrode diameter 5.0mm

4-2-4 深さ方向の硬さ分布

本項では、深さ方向の硬さ分布について調査した。実験条件は、電極径 3.5mm、通電電圧 2.5V、電極接触圧力 29.4MPa、通電時間 2.0 秒で通電焼入れを行った。図 4.11 に結果を示す。焼入れ中心部の深さ方向の硬さ分布は最も広く、最大で 1.2mm の深さまで硬さが高くなっており、深さ 1.0mm まで焼入れ硬さが得られている。それ以上になると表面硬さと同様になだらかに硬さが下がっていくことが読み取れる⁸⁾。次に、半径方向に 0.5mm ずつずらした所、つまり試験片表面の加熱中心から半径方向 0.5, 1.0, 1.5, 2.0mm の地点での深さ方向の硬さ分布を見る。表面硬さの焼入れ硬化部分の限界である 1.0mm の地点での深さ方向の硬さ分布は深さ 0.8mm まで硬さが向上している。表面硬さの向上していない範囲では深さ方向の硬さ分布に向上は見られない。前項の通電加熱の原理にて試験片と銅電極の接触部分で電流密度が最も高くなり、その後は試験片内で分散すると述べた。今回の結果から硬さが向上した要因は内部の電流密度が原因ではなく、表面で発生した熱が内部に伝わり硬さが高くなったと考えられる。内部の電流密度に関しても硬さ向上に無関係ではないが、電流が分散しているため、表面からの熱伝導が原因と考えた。結果として、この加熱法により表面で硬さが向上した範囲では深さ方向も硬化する事がわかった。

図 4.12 には焼入れ範囲の中心でカットした試験片の断面写真を示した。表面では焼入れの痕に色がついたが、ファインカッターで切断したため焼き痕が削れていると思われる。

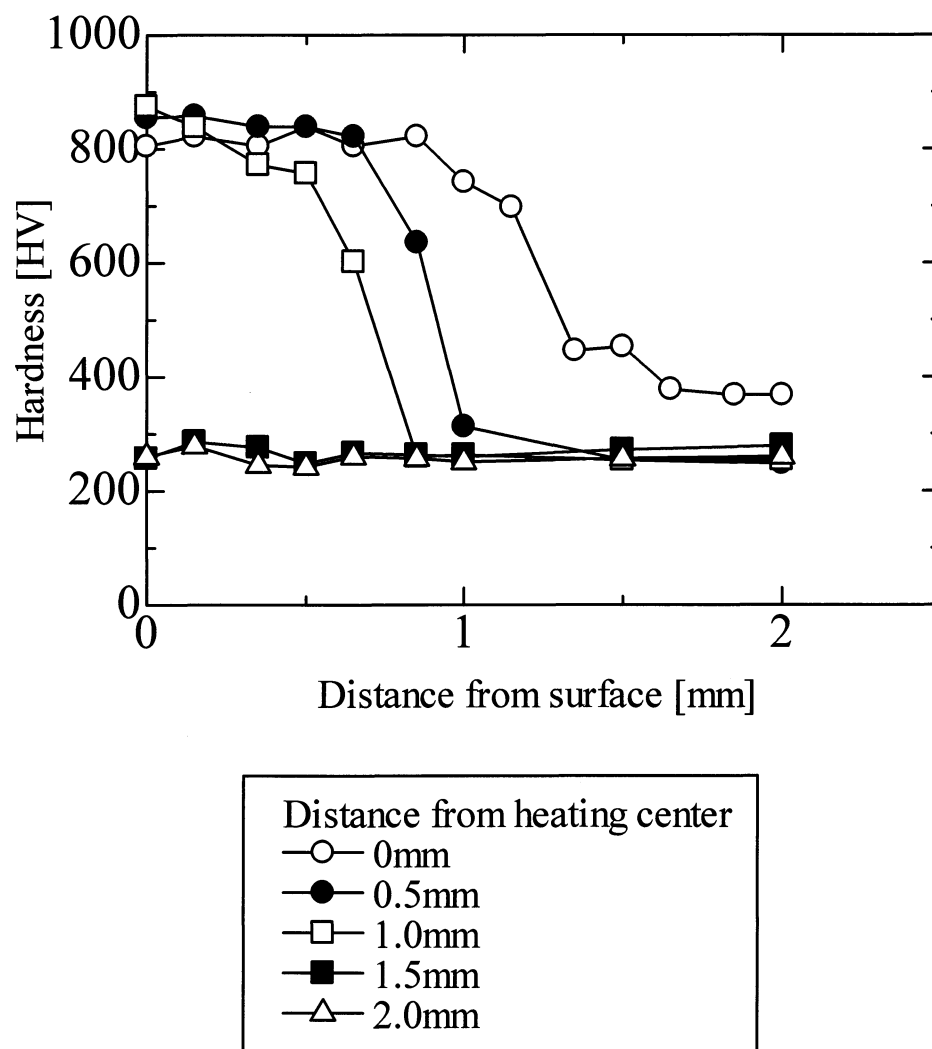


Fig.4.11 Hardness distribution in depth direction

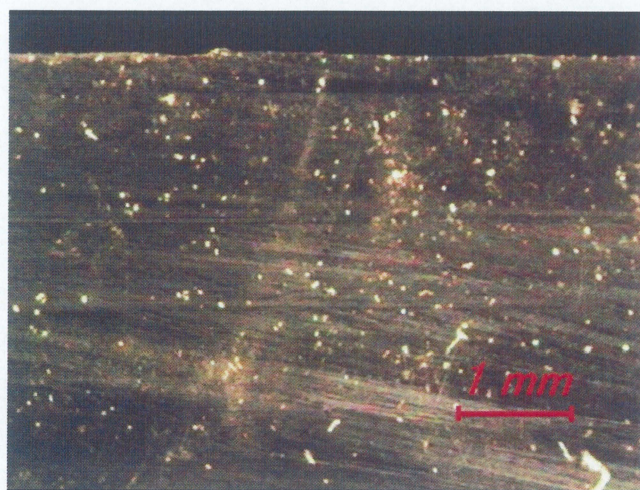


Fig.4.12 Cross section of test piece after local hardening

4-2-5 単発焼入れに関する考察

前項までの単発焼入れについてまとめてみる。様々な条件で局所的な通電加熱を行ってきたが、焼入れ硬さまで到達した条件は限られる。図 4.13 に焼入れ硬化可能条件をまとめた。結果として電極接触圧力 9.8MPa の場合は電流密度 $120\text{A}\cdot\text{mm}^{-2}$ 近傍にて焼入れが可能であり、電極接触圧力 19.6MPa, 29.4MPa の場合では、それぞれ電流密度が 135 , $220\text{A}\cdot\text{mm}^{-2}$ 近傍で焼入れが可能であることがわかった。○印は焼入れが可能, ×印は焼入れが出来ないことを示す。

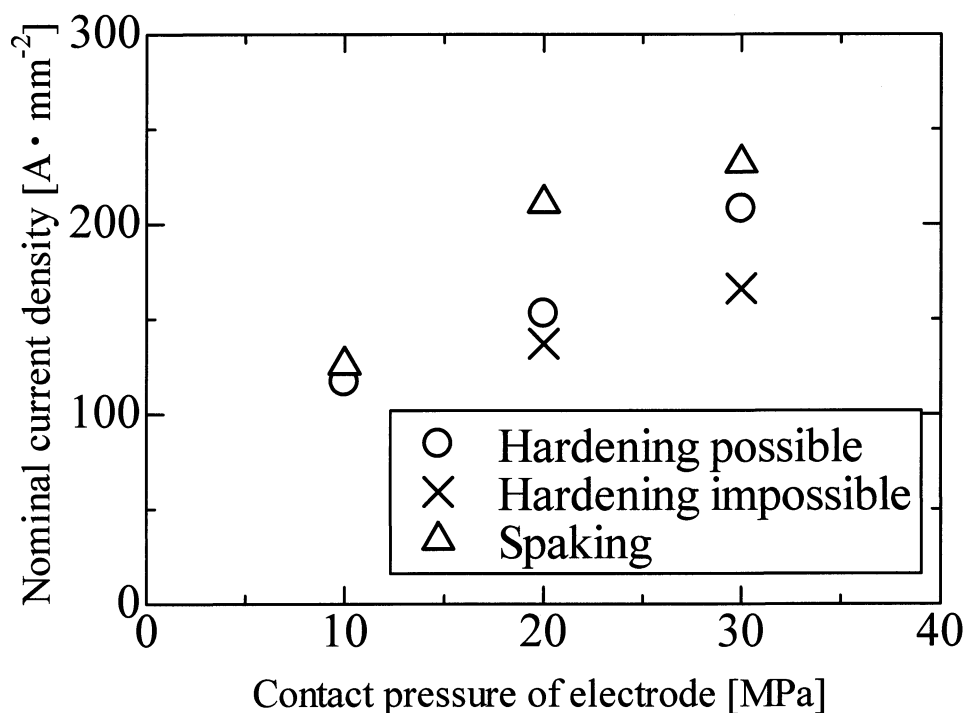


Fig.4.13 Local hardening using resistance heating for or against

スパークが発生しない安全域と発生する危険域との境界付近の条件で加熱することで十分な硬さまで到達することがわかった。ただし、電極径 3.5mm の場合 3.5mm の範囲全体が硬化するのではなく直径 2.0mm の範囲で硬化する。ここで、表面硬さ、深さ方向の硬さと熱は密接に関係しており、硬さが十分に得られている場合、発熱量が高く、硬さが得られていない場合には発熱量が低いと考えられる。したがって表面硬さの分布、深さ方向の硬さ分布により熱の分布を予想出来る。試験片内部の熱分布の推定図を図 4.14 に示した。また表面の温度分布に関して前項までの結果から推定される数値を当てはめてグラフ化したものを図 4.15 に示す⁹⁾。図 4.14、図 4.15 に関して、参考にした条件は電極径 3.5mm で電極接触圧力 29.4MPa、通電電圧 2.5V、通電時間 2.0 秒で通電加熱を行ったものである。

図 4.14 に関して、上側は銅電極、下側は試験片を示しており、試験片内部の色は発熱量の高低を分けるために分けた。電極の真下では電流密度が高くなることから、電極と接触している範囲の中心は最も電流密度が高くなり、発熱量が高くなる。そして、外側になるほど電流密度が低くなり、硬さは向上していないので発熱量が低い値になる。また、深さ方向にある程度行くと、硬さは向上していないので発熱量は低い値になる。したがってこのようなモデルになることがわかる。また、図 4.15 に関して、硬さが向上するということはオーステナイト化温度まで上昇しているということに繋がるので、表面温度の分布は焼入れ硬さ分布のグラフと似た形のグラフになる。硬化している範囲は焼入れ温度に到達しており、範囲は直径 2.0mm の範囲である。それよりも外側にいくと硬さは向上していないということから、徐々に温度が下がっていく状態になると考えられる。

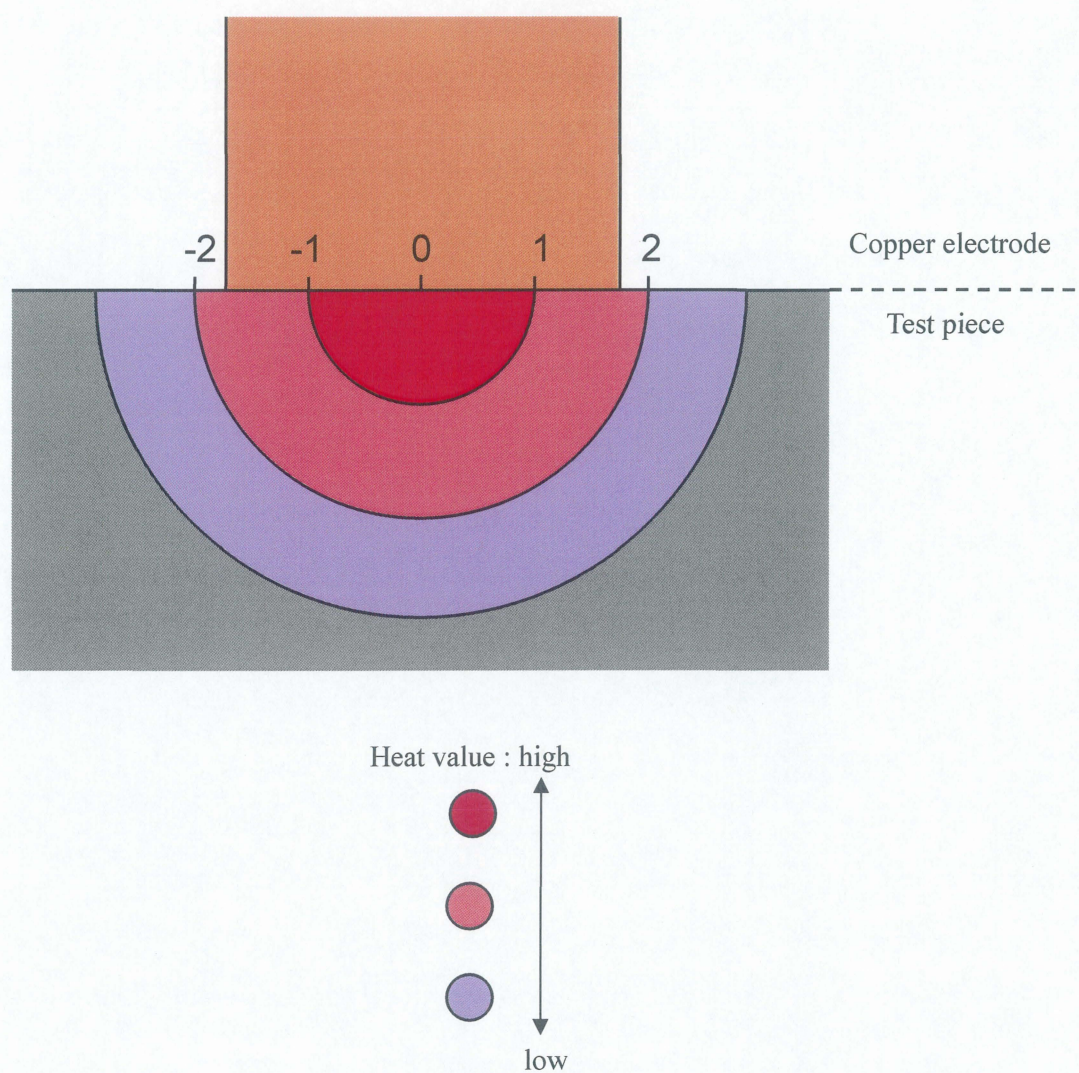


Fig.4.14 Estimate figure of development of fever during resistance heating

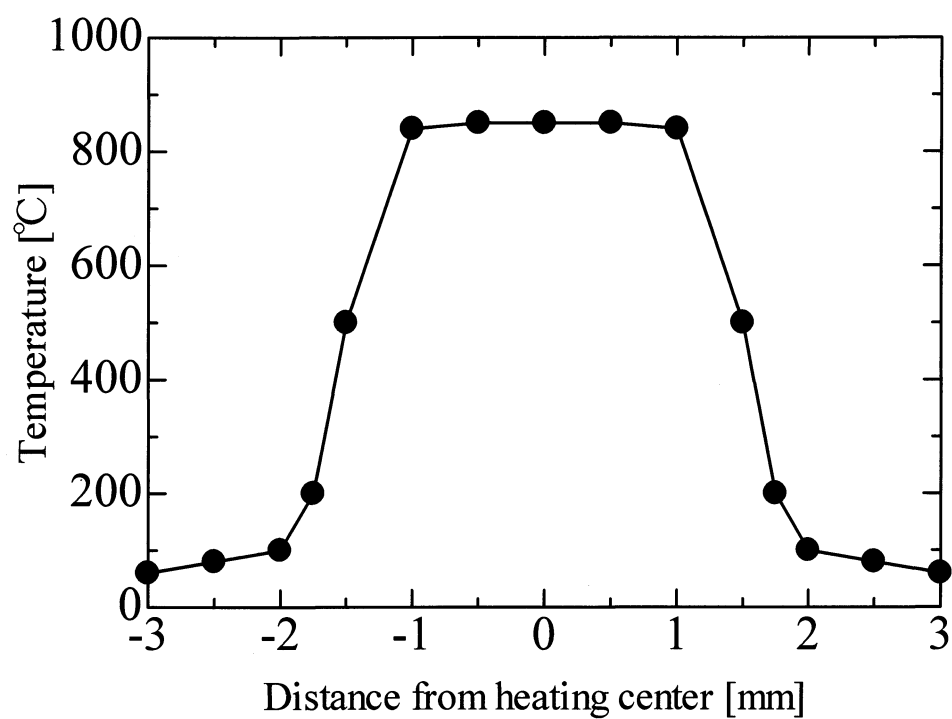


Fig.4.15 Estimate temperature distribution in surface of test piece from hardness distribution

冷却に関して、外側(メッシュ部分)で起こる冷却の流れを図 4.16、内側(メッシュ部分)で起こる冷却を図 4.17 に示した。ただし、モデル化した電極径は 3.5mm である。接触部分の外側では熱の逃げる方向が多く、内側では熱の逃げる方向が少ない。つまり外側では、発熱により温度が向上する前に冷却によって熱が出ていくため、オーステナイト化温度にまで到達しなかったということがわかる。

冷却に関して、本通電加熱法では通電加熱時に銅電極と試験片を接触させ、加熱後も接触させたまま自然冷却しているが、通電が終了した時点で銅電極と試験片との接触を離すことにより冷却に差が出ると考えられる。通電後も銅電極と試験片が接触している場合は接触部で発熱した熱量が、熱伝導の良い銅電極の方へ逃げるため、冷却速度が速くなる。したがって、焼入れには急冷が必要なので問題はないと思われる。しかし、局所焼入れ一点に掛ける時間が多くなってしまうという問題が生じる。実際の生産ラインで通電後も銅電極と試験片を接触し続ける方法を適用した場合、一点のみの局所焼入れでは焼入れ範囲が小さいため、少しずつ場所をずらしていくつも部分焼入れを行う必要があることから焼入れが必要な範囲をすべて硬化するには時間のロスになると考えられる。通電後に銅電極と試験片の接触を断つと、冷却速度が接触している場合と比べて遅くなる反面、部分焼入れ一点に掛ける時間が短くなるので、実際の生産ラインに適用した場合では時間短縮になる。通電後に電極を離して冷却した場合の硬さを調査して、通電後も電極を接触したまま冷却した場合の硬さと比べ差が無ければ、実用化を念頭に置いているため通電後に電極を離す場合の方が有効であると考えられる。

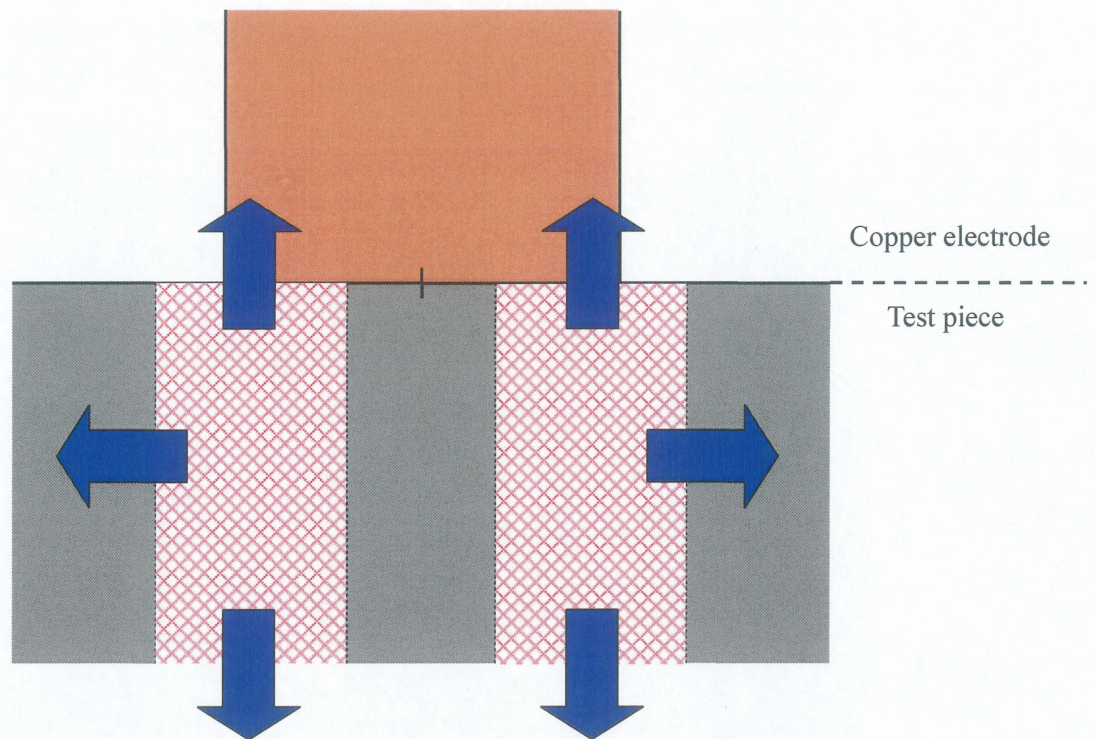


Fig.4.16 Model of cooling after resistance heating (outside)

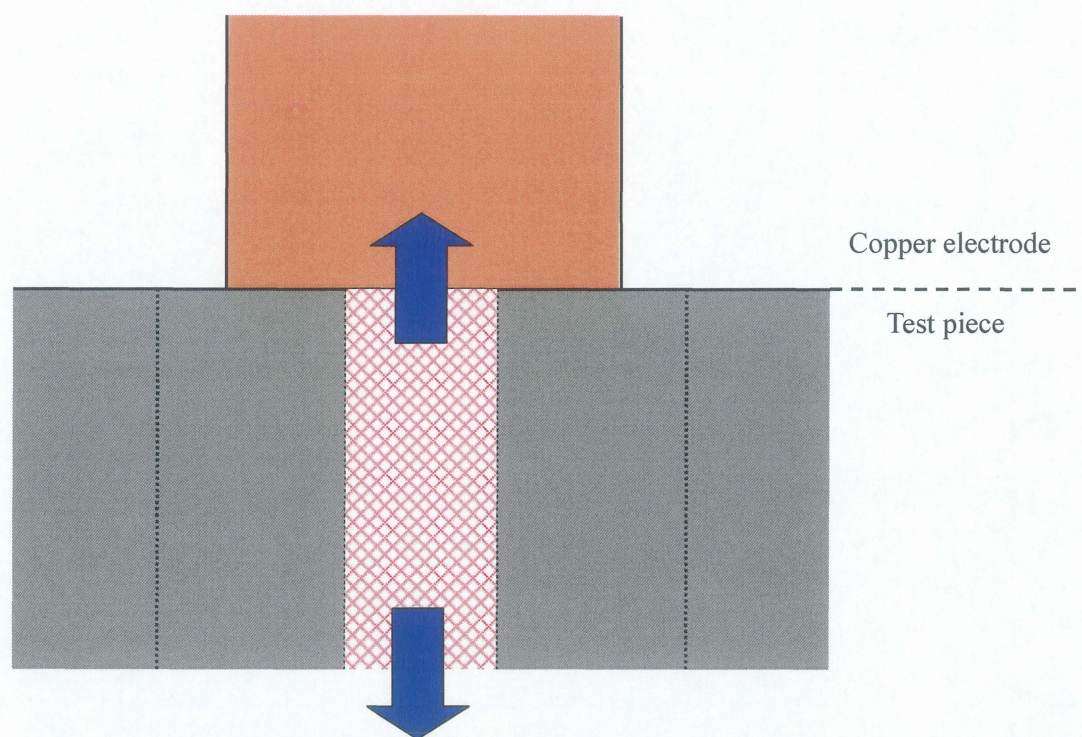


Fig.4.17 Model of cooling after resistance heating (inside)

スパーク発生限界を調査した項において、電圧は材料の抵抗値によって変動することを述べたが、加熱による温度上昇により抵抗値が変化し、電圧の変動が起こることも知られている。そこで、通電焼入れが可能であった条件(電極接触圧力 9.8, 19.6, 29.4MPa, 通電電圧 1.5, 2.0, 2.5V)において、電流、電圧がどのような変化をするかを調べた。本研究において、電源から変圧器を通して試験片表面までの負荷については着目せずに、無負荷電圧で考えて来た。では、試験片と銅電極間では負荷を考えた場合、どの程度の電圧が掛かっているかを調査した。

図 4.18 には通電開始から終了までの電流値の推移、図 4.19 には電圧値の推移を示す。共に実効値に変換している。結果として、電流、電圧が 1.0 秒までは大きな乱れが生じており、その後に安定している。金属の電気抵抗は温度上昇とともに乱れが生じるということが知られており、電流、電圧の波形の乱れた原因と考えられる。また電流、電圧安定した原因は電極と試験片との接触が安定したと考えられる。ここで、予備実験で通電電圧 2.5V、電極接触圧力 29.4MPa の条件で通電時間 0.5, 1.0, 2.0 秒としてそれぞれ通電加熱し、表面硬さを測定した結果、通電時間 0.5, 1.0 秒の場合は硬さが向上しないことがわかっている。焼入れは鋼をオーステナイト化温度まで加熱が必要であることから 0.5, 1.0 秒の通電時間ではオーステナイト化温度にまで加熱できないということになる。このことから 1.0 秒まで電流、電圧が安定せず 1.0 秒以降に安定したもう一つの原因はオーステナイト化温度に到達したことによるものであると考えられる。

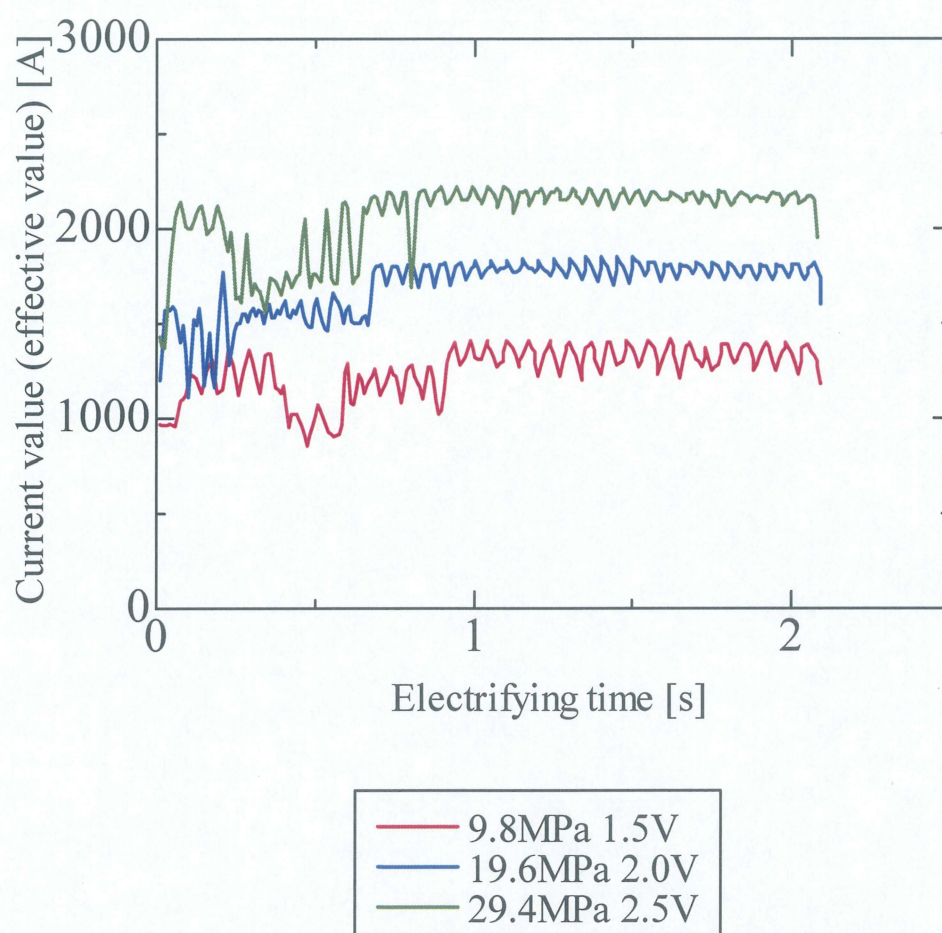


Fig.4.18 Variation of current with time during electrification

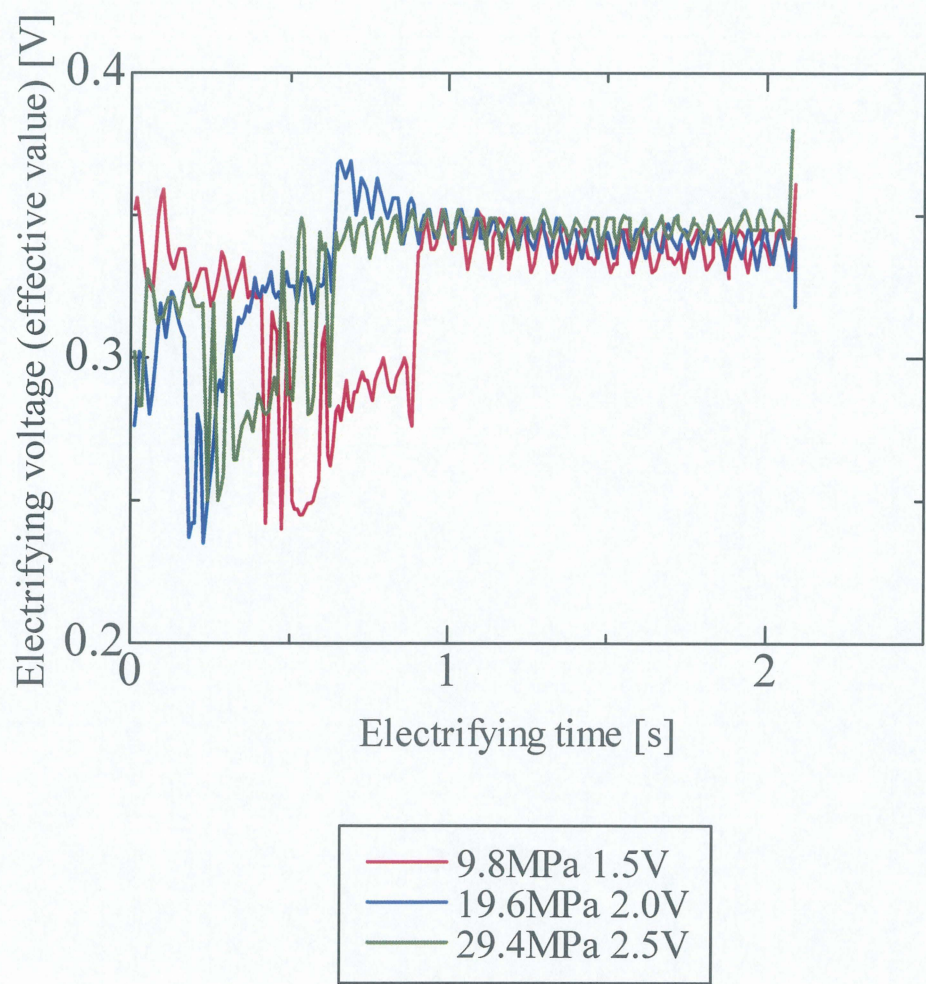


Fig.4.19 Variation of voltage with time during electrification

4-3 多点通電焼入れ

本項では前項にて調査した単発焼入れを複数行う事で焼入れ硬化範囲の拡大を試みた。加熱条件は電極接触圧力 19.6MPa, 通電電圧 2.5V, 通電時間 2.0 秒で行った。前項にて直径 3.5mm の電極を使用した際の部分焼入れ範囲は接触面すべてが硬化したのではなく、直径 2.0mm の範囲で硬化することがわかっている。そこで加熱中心の距離、つまりピッチを 1.0mm, 2.0mm の二種類で多点通電焼入れを行った。

まず、ピッチが長い 2.0mm の場合の多点焼入れを行い、一点目への熱の影響を調べた。図 4.20 にはピッチを 2.0mm にして通電焼入れを行った場合の硬さ分布を示した。グラフ上の破線は公称接触面積、実線は硬化範囲を示している。硬さに多少の乱れがあるが、測定誤差であると考えられる。一点目部分の硬さを見ると、二点目を加熱した時の熱が一点目の焼入れ部分に影響して硬さが低下するのではないかと予想していたが、結果としては十分な硬さを保てており、全体を見ると、二点目の焼入れ硬化部分まではほぼ一定の硬さを保っている。図 4.21 にはピッチ 2.0mm にて多点焼入れを行った際の試験片の表面写真を示した。図 4.21 を見ると重なりが少ないので重なり部分の硬化範囲がせまくなっている。次にピッチが短い 1.0mm の場合の多点焼入れを行い、一点目への熱の影響を調べた。図 4.22 にピッチを 1.0mm にして通電焼入れを行った場合の硬さ分布を示した。この短いピッチでも熱の影響は無く、先程のピッチ 2.0mm と同様に、一点目の焼入れ硬さは低下していない。図 4.23 にはピッチ 1.0mm で多点焼入れを行った際の試験片の表面写真を示した。

以上のことから、単発焼入れを複数回行うことで焼入れ硬化範囲の拡大は可能である事がわかった。本研究で使用した銅電極は純銅であるため柔らかいので、銅タングステンやクロム銅の様な硬い銅素材を使用することが望ましいと考えられる。

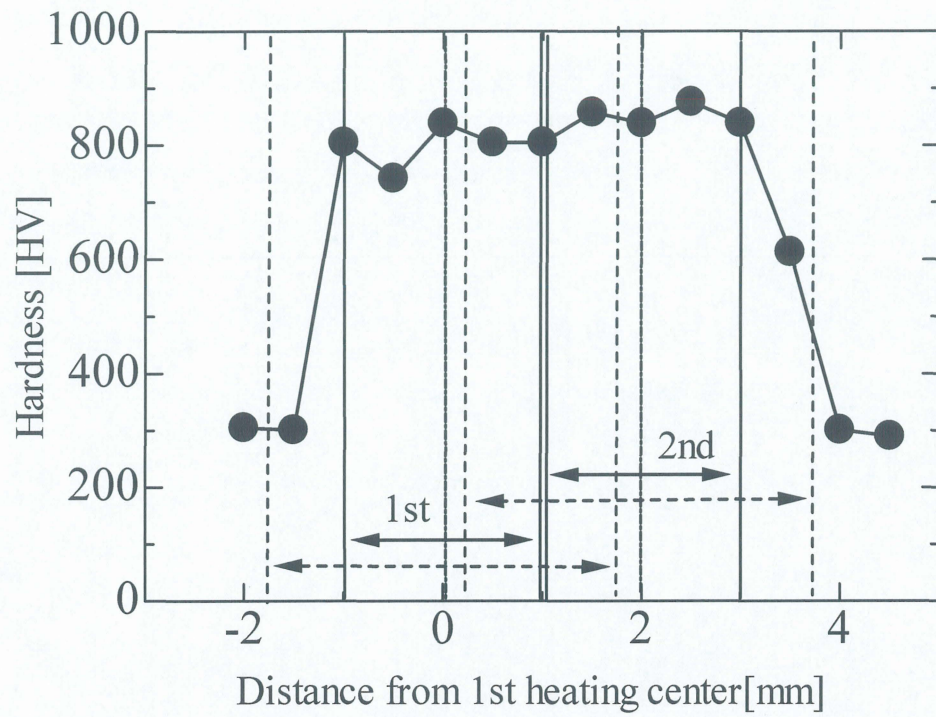


Fig.4.20 Influence of subsequent treatment upon hardness developed by preceding treatment (2mm in pitch)

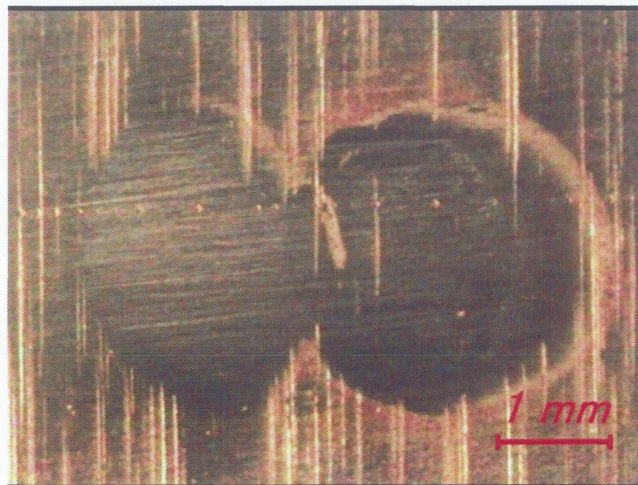


Fig.4.21 Surface of hardened test piece (2.0mm in pitch)

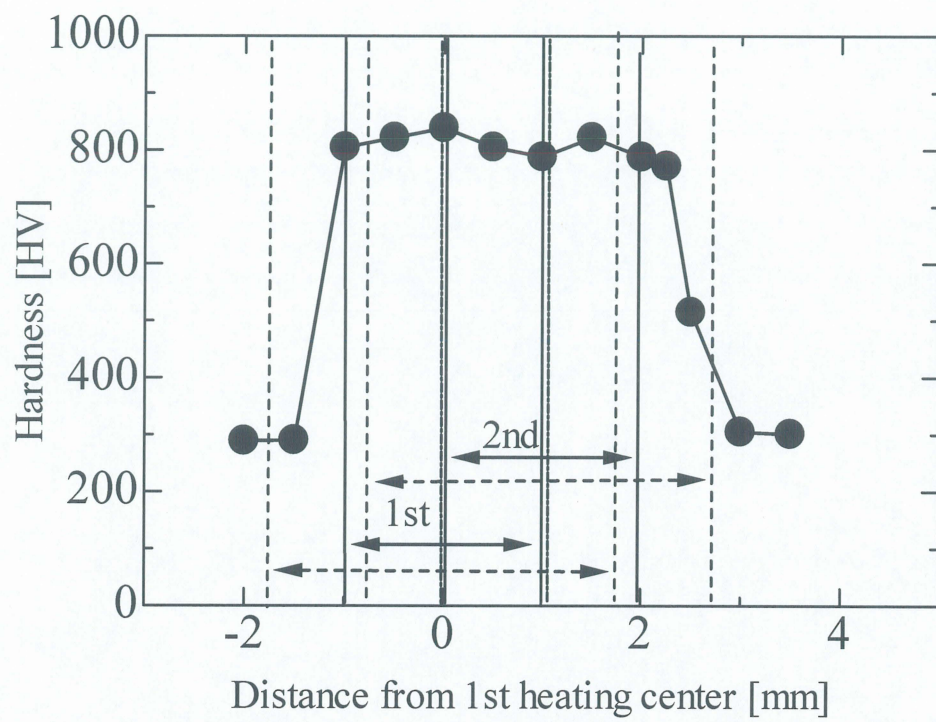


Fig.4.22 Influence of subsequent treatment upon hardness developed by preceding treatment (1mm in pitch)

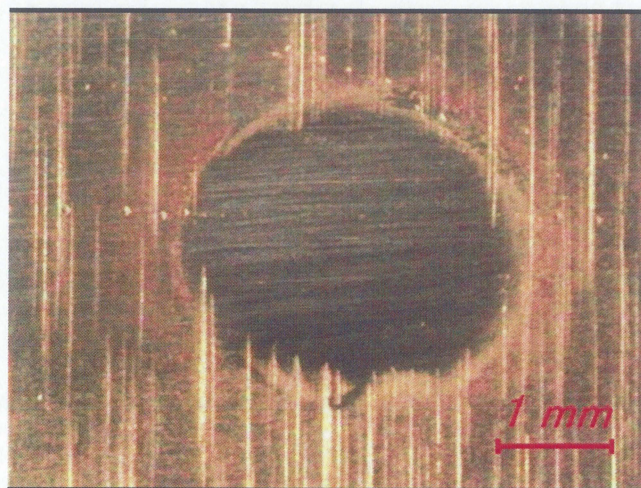


Fig.4.23 Surface of hardened test piece (1.0mm in pitch)

第5章 結言

金型の部分焼入れへの応用を背景に，通電加熱を利用した鋼の部分焼入れ法の開発を試み，以下の知見を得た．

- (1) 電極接触圧力と公称電流密度とスパーク発生の有無の関係を調べた結果，接触圧力が高い程，スパークの発生しない限界公称電流密度が増加し，安全域が広がる．例として，接触圧力 9.8MPa に対して限界電流密度 $117\text{A}\cdot\text{mm}^2$ ，29.4MPa に対して $208\text{A}\cdot\text{mm}^2$ 近傍で限界安全条件である．
- (2) 通電条件が硬さに及ぼす影響に関して，スパーク発生境界付近の条件で十分な硬さを得る．例として，電極接触圧力 9.8MPa で公称電流密度 $106\text{A}\cdot\text{mm}^2$ ，29.4MPa で $216\text{A}\cdot\text{mm}^2$ で焼入れが可能であった．
- (3) 電極径の影響に関して，3.5mm 径では電極接触圧力 29.4MPa，通電電圧 2.5V の場合，焼入れ硬化範囲は直径 2.0mm の範囲を硬化できた．5.0mm 径の場合，電極接触圧力 29.4MPa で通電電圧 5.0V の場合，焼入れは可能だが，一部で偏当りが原因と思われる硬化しない範囲が生じた．
- (4) 深さ方向の硬さ分布に関して，電極接触圧力 29.4MPa，通電電圧 2.5V，通電時間 2.0 秒で通電焼入れを行った際の深さ方向の硬さ分布は表面の硬さ分布と同様の傾向で広がっており，焼入れ硬さを得た最大深さは 1.0mm であった．
- (5) 多点通電焼入れに関して，先行の焼入れ部分の硬さに対して，後行の焼入れ時の熱によって硬さが減少するような影響はなく，面状の焼入れについても本加熱法の適用の可能性が示唆された．

参考文献

- 1) YSS 火炎焼入鋼 http://www.hitachi-metals-ts.co.jp/product/pdf/kaen_a.pdf
- 2) SX105V の諸特性 http://www.hasegawasteel.co.jp/sx105v_2.pdf
- 3) 牧 清二郎 , 濱本 篤 , 斉藤 翔一 , 森 謙一郎 : 抵抗加熱を利用した高張力鋼板のダイクエンチ , 塑性と加工 , Vol.48 , No.553 (2007) , pp.140-144
- 4) Maki, S . and Mori, K : Semisolid forging of titanium alloy making use of rapid resistance heating , Proc. of the 11th World Conference on Titanium (JIMIC) , Ti-2007 Science and technology, Vol.2 , (2007) , pp.877-880.
- 5) 坂本 卓 : 「熱処理」基礎のきそ , 日刊工業新聞社 , (2009) , pp.81-82
- 6) 社団法人 日本鉄鋼協会 : 新版鉄鋼技術講座 第3巻 鋼材の性質と試験 , 株式会社 地人書館 , (1977) , pp.54-58
- 7) 社団法人 日本鉄鋼協会 : 新版鉄鋼技術講座 第4巻 鋼材加工法 , 株式会社 地人書館 , (1978) , pp.175-177 , 273-280
- 8) Jae-Ho LEE , Jeong-Hwan JANG , Byeong-Don JOO , Young-Myung SON , Young-Hoon MOON : Laser surface hardening of AISI H13 tool steel , Trans.Nonferrous Met.Soc.China 19 (2009) pp.917-920
- 9) Henrikki Pantsar : Relationship between processing parameters, alloy atom diffusion distance and surface hardness in laser hardening of tool steel , Journal of materials processing Technology 189 (2007) pp.435-440

謝辞

本研究を遂行するにあたり，終始懇切丁寧なご指導賜りました牧 清二郎教授に深く感謝致します。

また，論文作成するにあたり多くの御助言とご指導を賜りました 中西 栄徳助教，ならびに論文作成にあたり御査読いただいた鈴木 実平教授に深く感謝致します。

さらに，実験を遂行するにあたり多くのご協力をいただきました中川 浩希技術専門職員，ならびに集積加工システム研究室の皆様方に深く感謝致します。

また，本研究で使用した試験片は(株)高津製作所のご好意により用意提供していただいたことを記して，心より御礼申し上げます。

最後に，幾多のご協力を頂きながら，ここに御氏名を掲載できなかった方々に対してその失礼をお詫びすると共に，謹んで御礼申し上げます。