

修士論文

急速通電加熱を用いた SKD11 の局所焼入れにおける 処理条件の焼入れ状態に及ぼす影響

指導教員 牧 清二郎 教授

平成 24 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

大石 晃平

目次

第1章	緒言	1
第2章	実験方法	2
	2.1 実験材料	2
	2.2 局所通電焼入れ実験	3
	2.3 焼入れ状態の評価	7
第3章	単発処理実験	9
	3.1 実験条件	9
	3.2 実験結果及び考察	11
	3.2.1 通電電圧の影響	11
	3.2.2 電極接触圧力の影響	14
	3.2.3 通電時間の影響	17
	3.2.4 通電条件と焼入れ状態の関係	19
	3.2.5 焼入れ深さに与える影響	24
第4章	単発処理の数値シミュレーション	27
	4.1 計算方法	27
	4.2 計算条件	29
	4.3 計算結果及び考察	34
	4.3.1 加熱過程での温度変化	34
	4.3.2 冷却過程での温度変化	42
第5章	連続処理実験	44
	5.1 実験条件	44
	5.2 実験結果及び考察	47
	5.3 実用化に向けた連続処理法の提案	52
第6章	結言	55
	参考文献	
	謝辞	
	付録 一 単発処理の数値シミュレーションに用いたC言語プログラム	

第1章 緒言

焼入れ処理とは、鋼をオーステナイト化温度域まで加熱し、その後急冷することによりマルテンサイトへ変態させ、硬さの向上を図る処理である。一般的な焼入れは、対象となる鋼全体を加熱し硬化させるが、金型のように部分的にしか負荷が掛からない場合、負荷の掛からない場所まで硬化させる必要はない。そこで、局所的に焼入れを行うことで鋼表面の硬さを部分的に向上させる局所焼入れが広く利用されている。

局所焼入れには、現行法としてレーザー焼入れや火炎焼入れが挙げられる。レーザー焼入れは鋼表面に精密な焼入れ処理が可能であり、近年、局所焼入れによく用いられる。しかし、レーザー焼入れは導入に多大な設備経費が必要であり¹⁾、中小企業においてその導入は容易なものではない。また、レーザーの取り扱いには危険が多く事故に繋がりやすい。一方、火炎焼入れは安価に局所焼入れを行うことができるが²⁾、そのためには加熱温度の見極めが重要となり、そこには熟練した技術が必要である。このことから、一般に加熱温度の制御は困難であり、量産品の加工には不向きである。

ところで、金属の加熱方法として古くから通電加熱が知られている。通電加熱は、導電性を有する材料に直接電気を流し、その際に発生するジュール発熱により加熱を行う方法である。通電加熱に必要な装置は比較的安価であり、通電条件によっては急速な加熱が可能である³⁾。また、加熱温度の制御も比較的容易であることから、焼入れ処理に適していると考えられる。そこで試験的に通電加熱を局所焼入れに利用したところ、被処理材表面の電極接触部だけをオーステナイト化温度域まで加熱し、局所的に焼入れ硬化処理を行えることが明らかとなった⁴⁾。よって、通電加熱を利用した処理方法はレーザー焼入れや火炎焼入れの代替法として利用可能だと考えられる。

本研究では、この急速通電加熱を利用した局所焼入れにおいて十分な焼入れ状態が得られる処理条件を明らかとするため、空冷によっても焼入れが可能な冷間ダイス鋼 SKD11 に対し局所通電焼入れを行い、処理条件が焼入れ状態に与える影響を調査した。また、局所通電焼入れにおける加熱・冷却過程の温度変化を把握するため、数値シミュレーションを行った。

第 2 章 実験方法

2.1 実験材料

被処理鋼材には，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（ $\phi 32$ ）を用い，これを長さ 20mm に切断し，円柱状試験片として実験に使用した．実験では，焼鈍処理（850℃，2h 保持，炉冷）を施した後，試験片の切断面にラップ仕上げを施し，その面に局所焼入れを行った．図 2.1 に実験に使用した試験片の写真を示す．

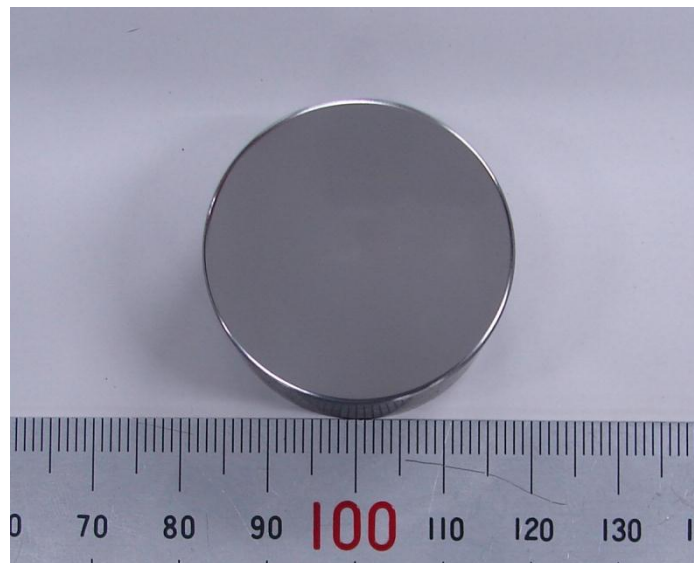


Fig.2.1 Test piece

2.2 局所通電焼入れ実験

図 2.2 に本実験に使用した局所通電焼入れ装置，図 2.3 にその概略図を示す．通電加熱に必要な電極には耐久性を考慮し，溶接用電極や電気接点として使用される銅タングステン（C30A2，日本タングステン㈱製）を使用した．図 2.4 に電極の詳細を示す．5mm の直径を有する電極先端部は，#2000 のエミリー紙によって研磨し，大きな損傷及び変形が発生するまで連続して使用した．上下の絶縁された銅版にこの電極と準備した SKD11 試験片（ $\phi 32 \times 20h$ ）をそれぞれ固定した後，試験片のラップ仕上げ面に電極を押し付け，その状態で通電を行うことにより電極の接触部を加熱した．従来の実験⁴⁾では，試験片への電極の押し付けにバネを使用していたが，本実験ではより実用化を想定し，エアシリンダを用いた機構に改良した．また，エアシリンダと銅板の間には，四隅に適度な弾性を有するウレタンワッシャを使用し，絶縁を行うと共に電極の片当たりを防ぐよう工夫した．図 2.5 に，エアシリンダにより加圧した際の接触部の様子を示す．通電加熱用電源には常用定格 10kVA の交流電源を用いた．電源の出力インピーダンスは，図 2.2, 2.3 に示す電極と試験片がそれぞれ固定された銅板間での負荷に対して約 $2.5m\Omega$ である．通電加熱の際に流れる電流は，比較的溫度変化に対し電気抵抗率の変動が小さい SUS304 を基準抵抗とし，端子間の電圧の値から電流を測定した．図 2.6 に，本実験に使用した基準抵抗を示す．

通電加熱後の冷却方法として，電極を試験片に接触させたまま保持させ冷却する方法と，通電完了後に電極を離し冷却する方法の 2 つの処理が考えられる．本実験では前者の冷却方法を採用し，通電完了後も 5s 以上，電極を試験片に押し付けたまま保持し，試験片の加熱部を冷却させた．



Fig.2.2 Photograph of the local hardening method using resistance heating

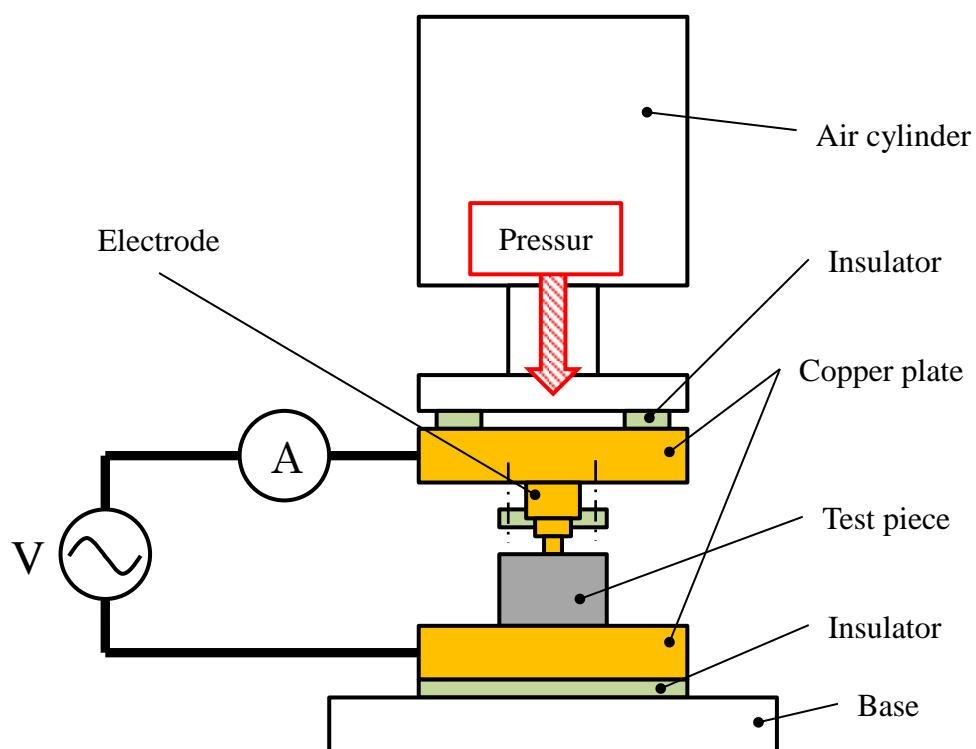


Fig.2.3 Illustration of the local hardening method using resistance heating

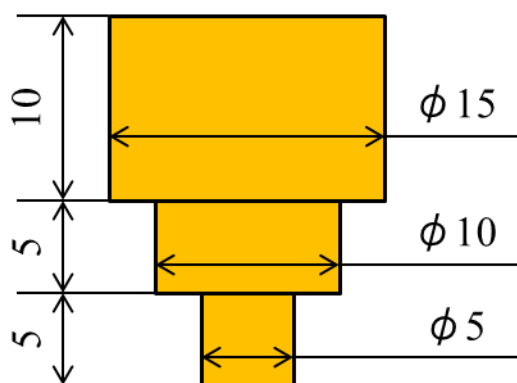


Fig.2.4 Shape and size of the electrode

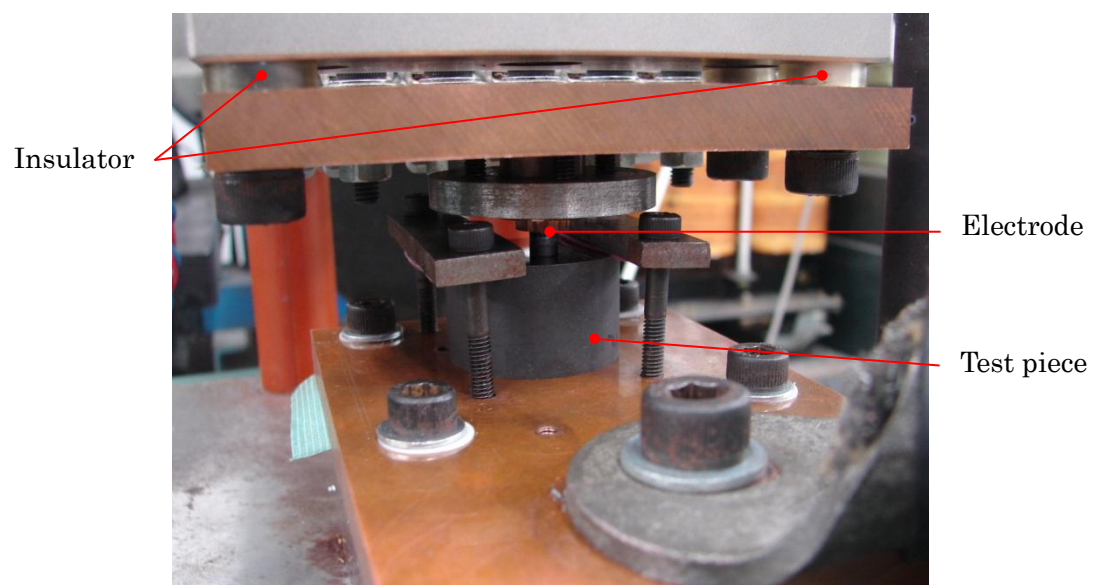


Fig.2.5 Contact part at time of pressurization



Fig.2.6 Standard resistance for measuring current

2.3 焼入れ状態の評価

局所通電焼入れ処理後は、試験片の電極接触部を目視観察するとともに、電極接触部の硬さをビッカース硬さ試験により測定することで焼入れ状態を調べた。図 2.7 に、本実験装置により局所焼入れを試みた試験片の電極接触部の表面写真の例を示す。試験片表面は、大気酸化による発色によって、通電により加熱された領域がよくわかる。電極先端の円形の接触形状が反映されて加熱領域も円形を呈している。この加熱領域の中心を加熱中心とし、その周囲の硬さ分布を調べた。

図 2.8 に、試験片表面及び深さ方向の硬さ分布の測定方法を示す。処理表面の硬さ分布は、加熱中心から 0.5mm の間隔で硬さ試験を行うことにより測定した。その際、変化が大きい箇所はその間の点も測定した。一方、深さ方向の硬さ分布は、試験片を加熱中心でファインカッターにより切断し、切断面を#2000 のエミリー紙によって研磨した後、加熱中心上に処理表面から 0.25mm の間隔で硬さ試験を行うことにより測定した。なお、ビッカース硬さ試験は共に、試験荷重 1.0kgf、加圧時間 10s の条件で行われた。

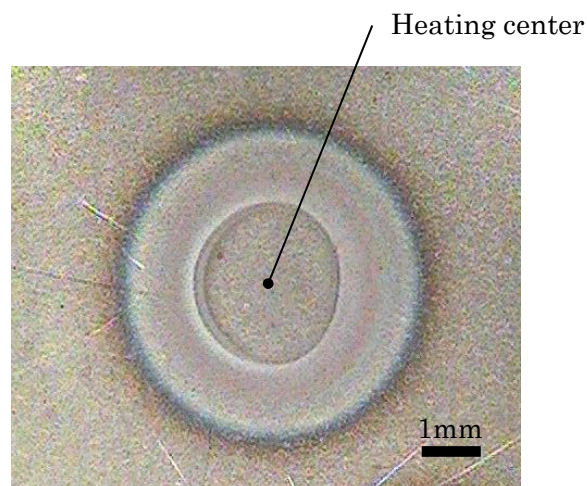
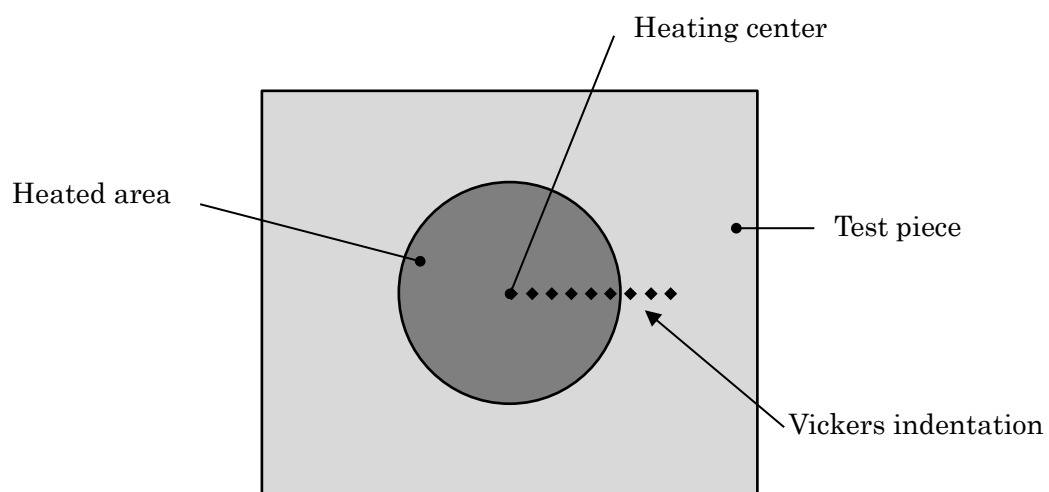
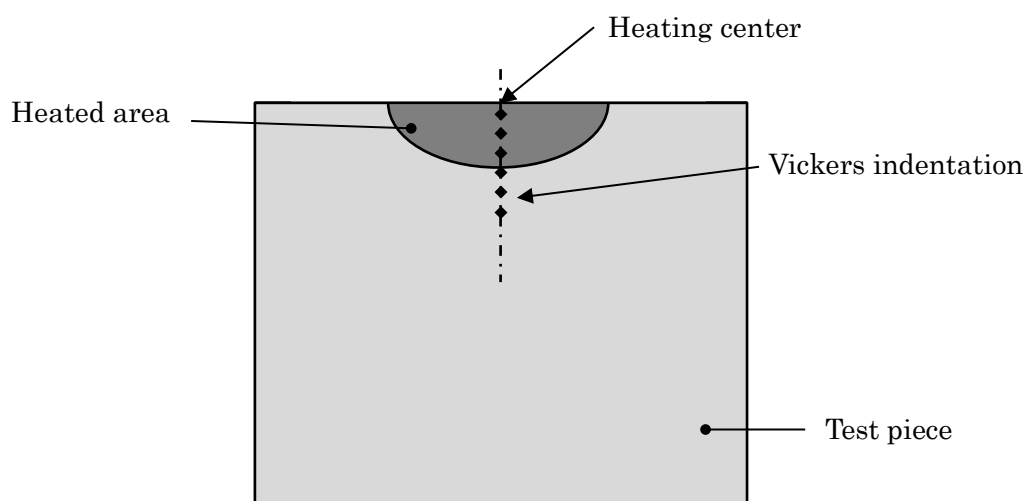


Fig.2.7 Example of treated surface



(a) Treated surface



(b) Depth direction

Fig.2.8 Method of measuring the hardness distribution

第3章 単発処理実験

3.1 実験条件

まず、単発で良好な焼入れ状態が得られる通電条件を調査するため、通電条件を変化させ局所通電焼入れ実験を行った。

本実験に用いた通電加熱用電源は、出力電圧（無負荷）を 0~10V の範囲で変化できる。そこで、この設定した電圧の値を通電電圧 E とし、0.5V 毎に変化させ時間制御により加熱を行った。なお、この加熱時間を通電時間 t とした。また、通電加熱には被処理材に対する電極の押し付け力が大きく影響することが知られている⁵⁾。本実験装置において電極の押し付けはエアシリンダにより行っており、その力はコンプレッサの空気圧により調整可能である。そこで、一定の空気圧を与えた際の電極先端部の押し付け力を、電極と銅板でロードセルを挟み込むことにより測定した。図 3.1 に、コンプレッサの空気圧 P と電極先端部での押し付け力 F の関係を示す。この関係は、一次式により近似することができ、空気圧 P より算出した押し付け力 F を電極先端部の公称面積で割ったものを電極接触圧力 p_c とした。

通電条件として、これら通電電圧 E 、通電時間 t 、電極接触圧力 p_c の 3 つのパラメータを変化させた。

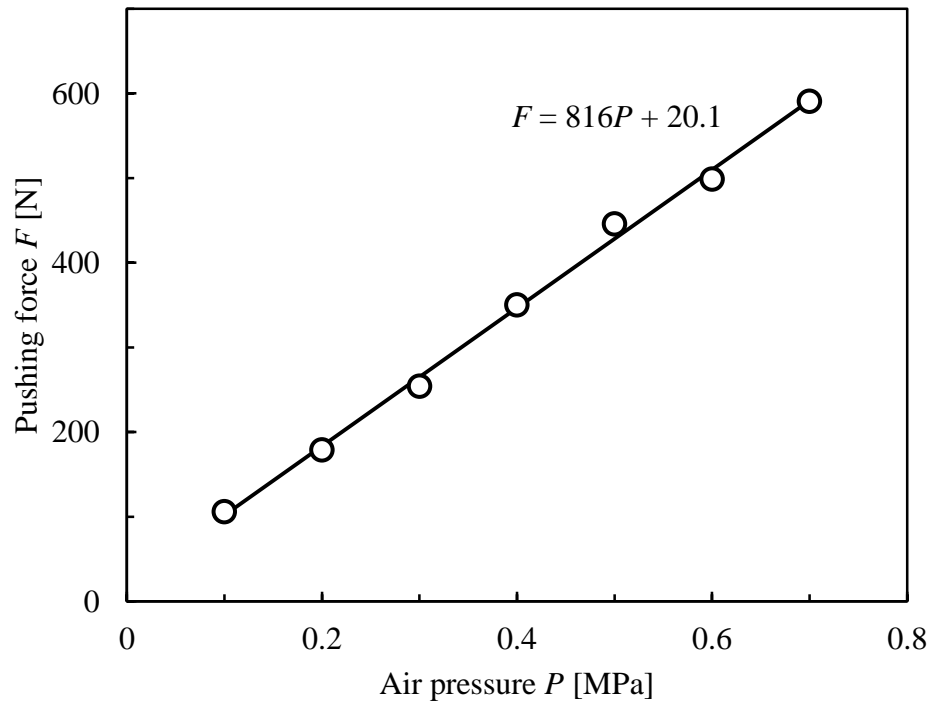


Fig.3.1 Relationship between air pressure and pushing force

3.2 実験結果及び考察

3.2.1 通電電圧の影響

図 3.2 に、電極接触圧力 $p_c = 21.8\text{MPa}$ 、通電時間 $t = 2\text{s}$ にて通電電圧 E を変化させた場合の電極接触部における硬さ分布の変化を示す。なお、図中の破線は加熱中心を電極中心と見たときの電極の公称半径を示している。図 3.3 に、その時の処理表面の写真を示す。通電加熱では通電電圧の増加により入熱量が増加するが、それを示すように、加熱領域は通電電圧の増加に伴い拡大している。しかし、通電電圧の低い 4.5V の条件では焼入れによる硬化は全く認められず、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 になると焼入れによる硬化域が一部認められるようになる。しかし、加熱中心は硬化しておらず、電極径内において加熱中心から少し離れた位置に環状に硬化域が発達している。さらに電圧が増加して 5.5V になると加熱中心部も硬化し始める。しかし、その硬さは周囲に比べると低く、均一な焼入れ硬化が行われているとは言えない。電圧が 6.0V 以上になると加熱中心部でも 500HV_1 以上の硬さが得られるようになる。 500HV_1 以上の値を示す領域を焼入れ硬化域として見てみると、その範囲は、電圧が 6.0V では中心から電極半径 2.5mm に対し約 70% までの範囲であり、電圧が 6.5V では約 90% までの範囲に拡大している。

さらに電圧を増加させていくことにより硬化領域は拡大していくと考えられるが、電圧が 7.0V の条件では入熱が過多となり、電極の一部が熔融し、試験片の処理表面に溶着した。このような場合、電極及び試験片の処理表面に大きく損傷を与える結果となる。本法の実用化を考えると、被処理材が無傷であること及び電極の長寿命化が要求されるので、このような損傷の発生は絶対に避けなければならない。よって、電圧 7.0V の条件は焼入れ硬化が認められても不適當であり、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 $E = 6.0\sim 6.5\text{V}$ の範囲が適當であると言える。

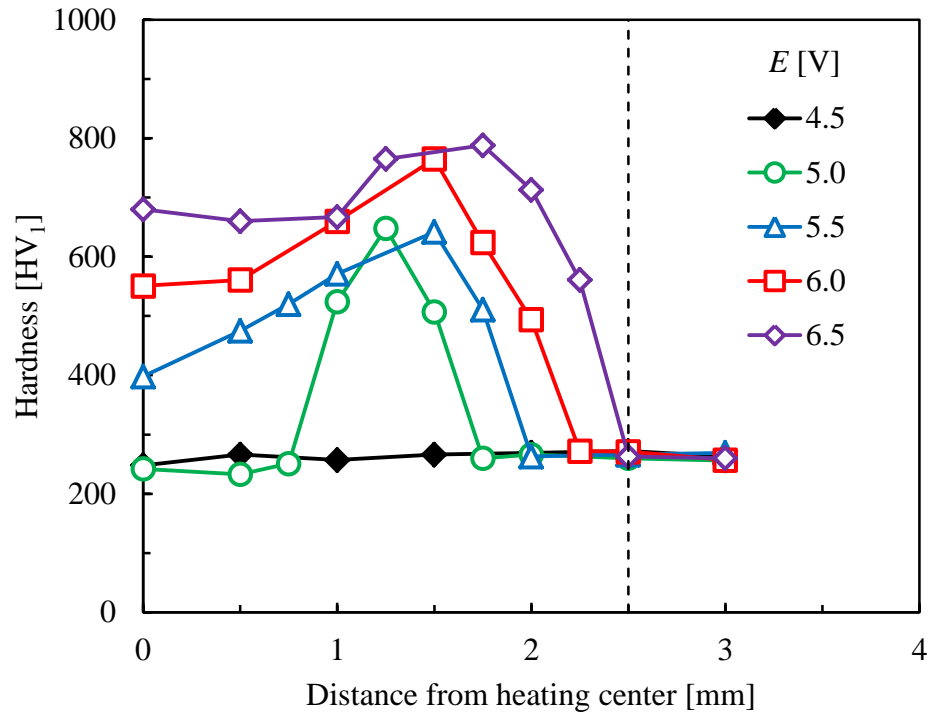


Fig.3.2 Hardness development in contact area, showing influence of electrifying voltage E

(Contact pressure $p_c = 21.8\text{MPa}$, Electrifying time $t = 2\text{s}$)

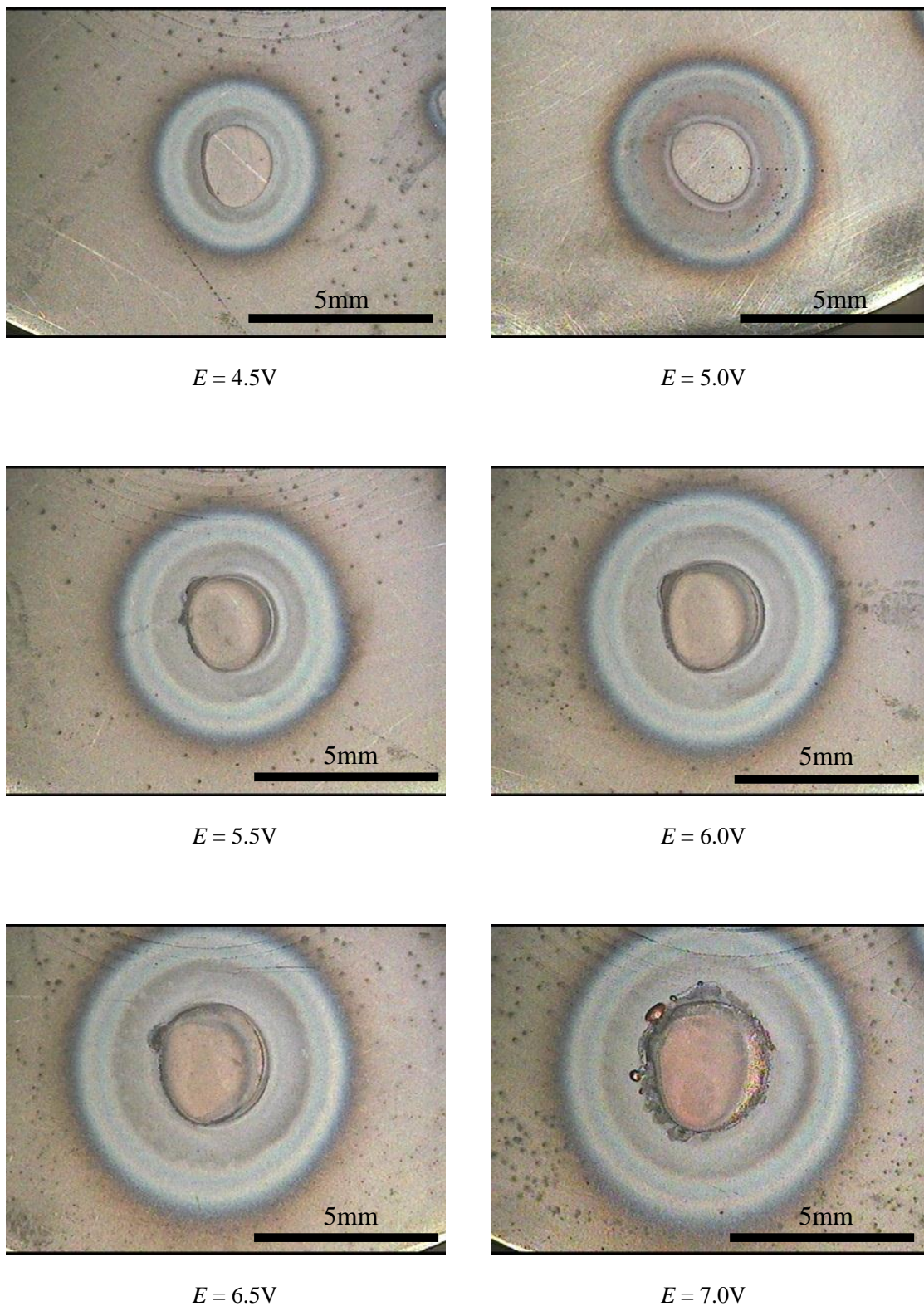


Fig.3.3 Photographs of treated surfaces, showing influence of electrifying voltage

3.2.2 電極接触圧力の影響

図 3.4 に、通電電圧 $E = 5.0V$ 、通電時間 $t = 2s$ にて電極接触圧力 p_c を変化させた場合の電極接触部における硬さ分布の変化を示す。また図 3.5 に、その時の処理表面の写真を示す。接触圧力が大きい $30.1MPa$ では、オーステナイト化温度まで入熱量が足らず、焼入れによる硬化が全く認められない。接触圧力を $21.8MPa$ に減少させると、加熱中心部では焼入れによる硬化が認められないものの、加熱中心から $2.5mm$ の位置にある電極半径より内側にて環状の硬化領域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、硬化が認められなかった加熱中心部も硬化し始める。しかし、中心部の硬さは十分とは言えず、この条件では均一な焼入れ硬化を得るには至らない。接触圧力をさらに減少させていくと均一な硬化が得られると期待されるが、図 3.5 に示すように接触圧力 $5.2MPa$ の条件では、接触圧力の減少が過度であったため試験片の一部に電極の溶着を伴う表面損傷が発生した。

ここで、接触圧力の減少に伴い硬化領域が発達した理由について考える。金属の接触は、接触圧力が低いほど接触面積が小さくなる。電極と試験片の接触においても同じことが言え、接触面積の低下により接触抵抗は増加し、接触部におけるジュール発熱は増加する。接触圧力の減少はこれらが効果的に働き、加熱温度が高くなったことが、硬化領域の発達に繋がったものと考えられる。よって、通電電圧の増加と同様、電極接触圧力を減少させることは、加熱温度の上昇すなわち加熱効率の向上策として有効であると考えられる。

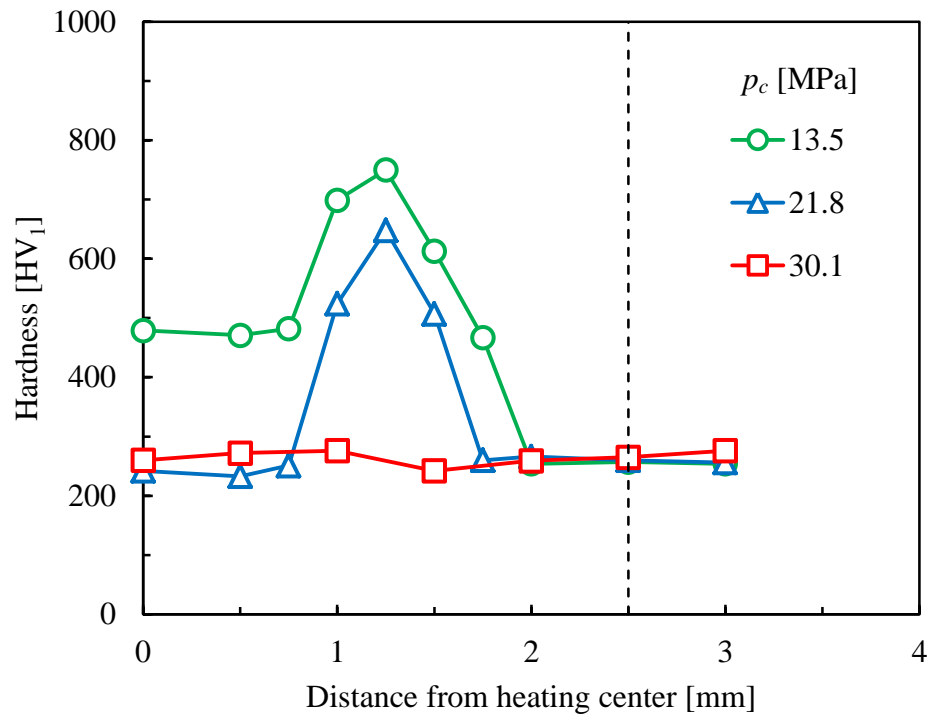


Fig.3.4 Hardness development in contact area, showing influence of contact pressure p_c .

(Electrifying voltage $E = 5.0\text{V}$, Electrifying time $t = 2\text{s}$)

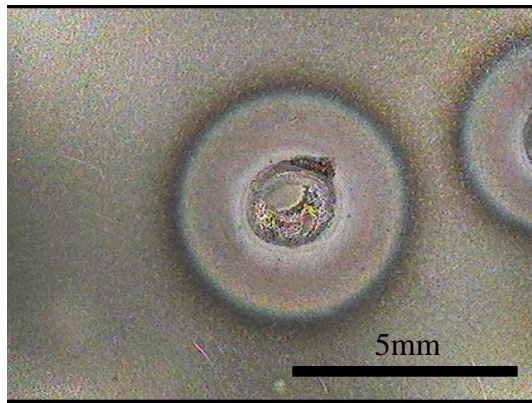
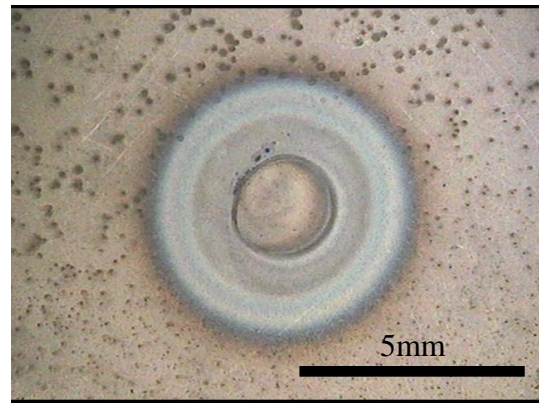
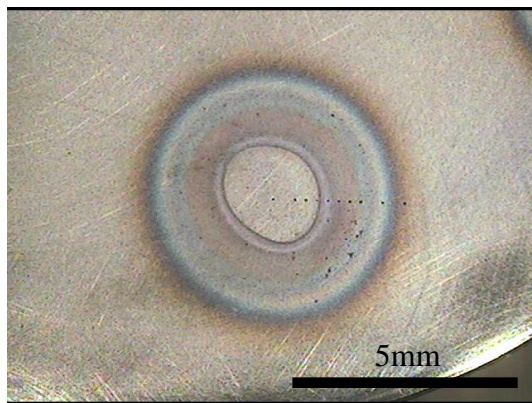
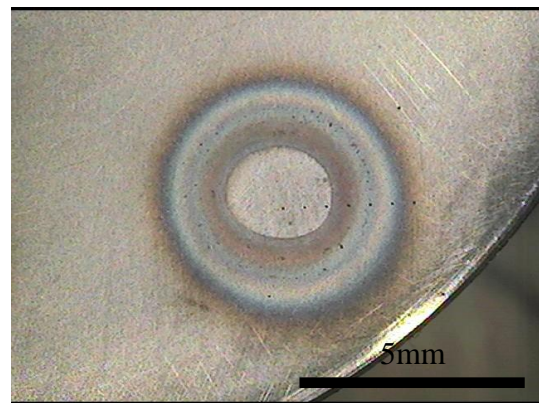
 $p_c = 5.2\text{MPa}$  $p_c = 13.5\text{MPa}$  $p_c = 21.8\text{MPa}$  $p_c = 30.1\text{MPa}$

Fig.3.5 Photographs of treated surfaces, showing influence of contact pressure

3.2.3 通電時間の影響

図 3.6 に、通電電圧 $E = 6.5V$ 、電極接触圧力 $p_c = 21.8MPa$ にて通電時間 t を 1s と 2s に変化させた場合の電極接触部におけるそれぞれの硬さ分布を示す。また図 3.7 に、その時の処理表面の写真を示す。通電時間が 2s の条件は、加熱中心部まで十分に硬化され、均一な焼入れ硬化が認められる。一方、通電時間が 1s の条件では、加熱中心部で硬さが低下しており、硬化領域もやや減少している。

どちらの条件も最大硬さは同程度だが、図 3.7 が示す様に温度の上昇により酸化発色した領域は、通電時間 1s の条件では通電時間 2s の条件に比べ小さくなっている。このことから、加熱温度は同程度であったが、通電時間の短い 1s の条件では熱の拡散が不十分であったと考えられる。しかし、上記の条件では通電時間を半分に大きく減少させたものの、通電電圧や電極接触圧力といった他の通電パラメータに比べその影響は小さい。よって、通電電圧と電極接触圧力により十分な加熱が行える通電条件では、通電時間の短縮すなわち処理時間の短縮を行う事ができると考えられる。

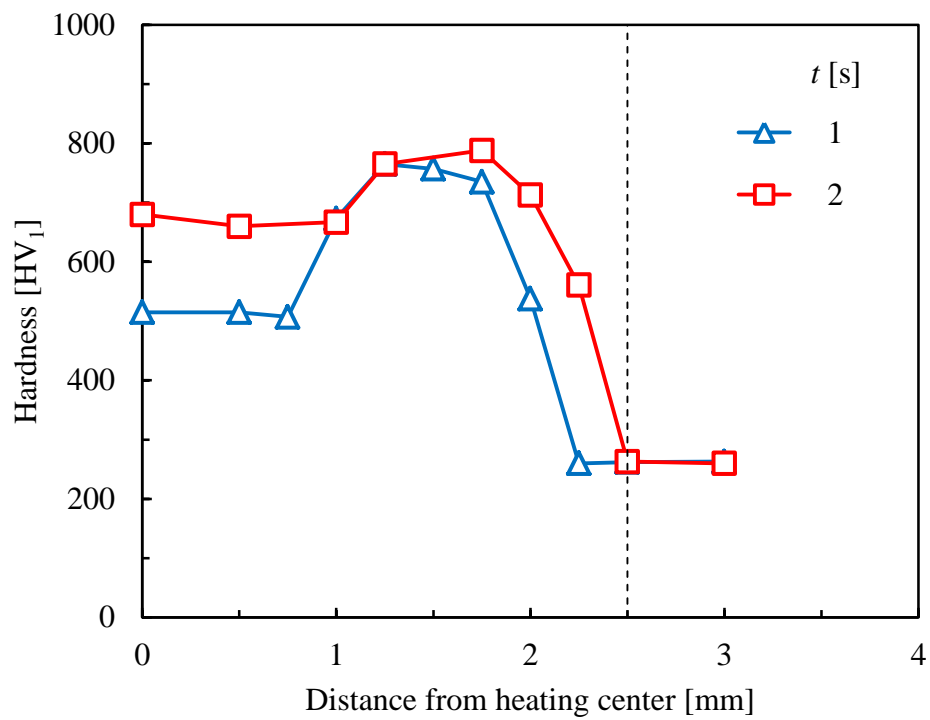


Fig.3.6 Hardness development in contact area, showing influence of electrifying time t
(Electrifying voltage $E = 6.5\text{V}$, Contact pressure $p_c = 21.8\text{MPa}$)

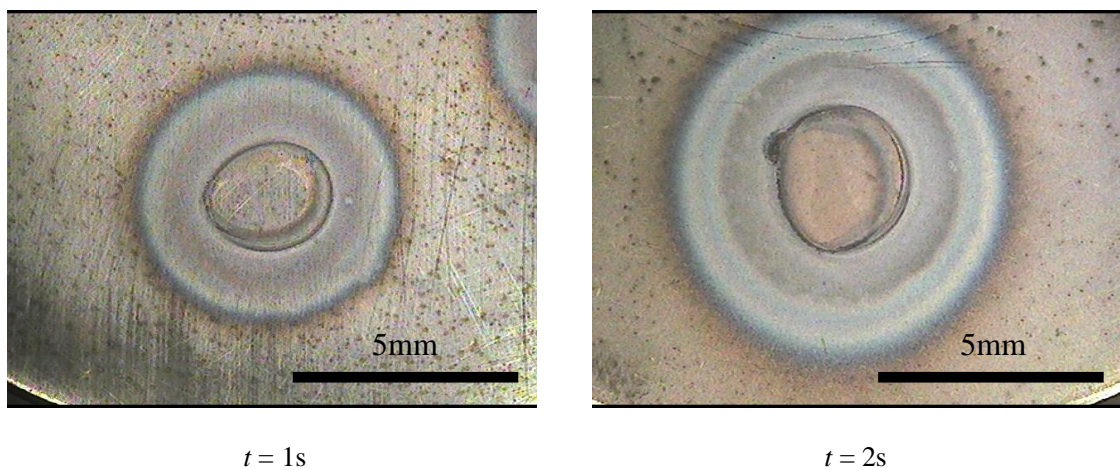


Fig.3.7 Photographs of treated surfaces, showing influence of electrifying time

3.2.4 通電条件と焼入れ状態の関係

図 3.8 に、局所通電焼入れの単発処理における通電条件と焼入れ状態の関係を示す。各グラフは一定の通電時間 t で整理されており、それぞれ横軸に通電電圧 E 、縦軸に電極接触圧力 p_c をとった。図中の \times 印は焼入れ硬化が認められなかった条件、 \triangle 印は加熱中心の硬さが不十分な環状の焼入れ硬化が認められた部分的な焼入れ状態にあった条件、 \circ 印は均一な焼入れ状態が得られた条件、 $*$ 印は入熱過多により電極の溶融を伴う試験片処理表面に損傷が生じた条件を示す。なお、硬さの値が 500HV_1 以上を示した場合を焼入れによる硬化が認められたと判断した。

この結果から、処理条件として適切な均一な焼入れ硬化が得られる通電条件は、電極の溶融を引き起こす通電条件領域の低電圧側に隣接した比較的せまい範囲に存在していることがわかる。また、通電電圧の増加及び電極接触圧力の減少により、硬化領域は環状の焼入れ硬化から均一な焼入れ硬化状態に移行していることがわかる。しかし、電極接触圧力が極端に低い条件では均一焼入れの条件は非常に狭い、もしくはそれに至る前に電極の溶融が発生していると考えられる。

通電時間 1s の条件は、通電時間 2s の条件に比べ、通電電圧に関して少し高圧側への移行が見られる。しかし、電極の溶融が発生する条件はほとんど変わっておらず、均一な焼入れ硬化が得られる通電条件の範囲はより狭くなる。

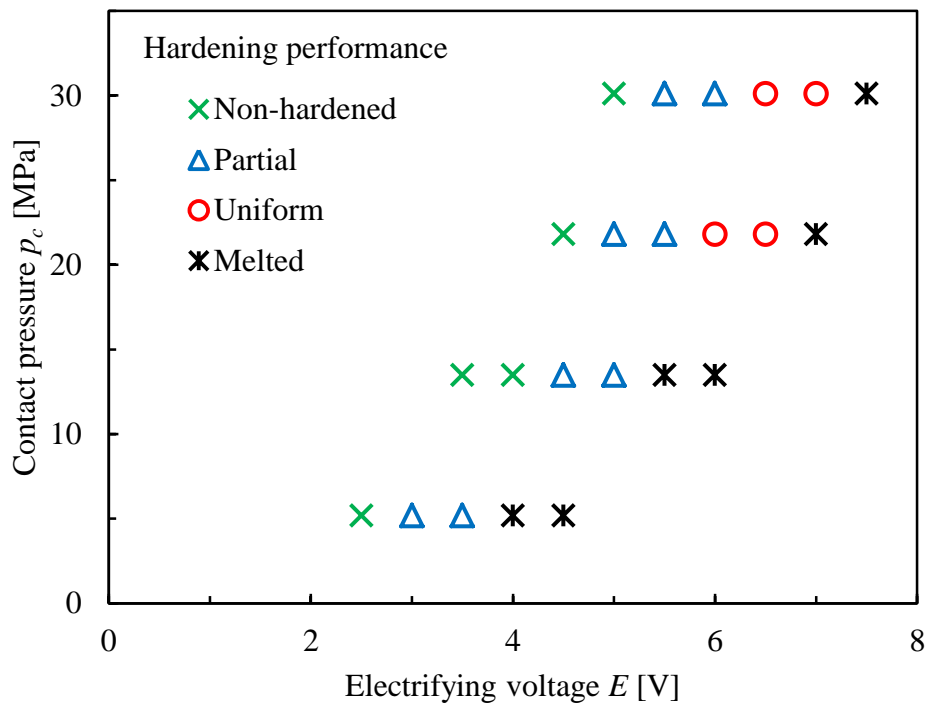
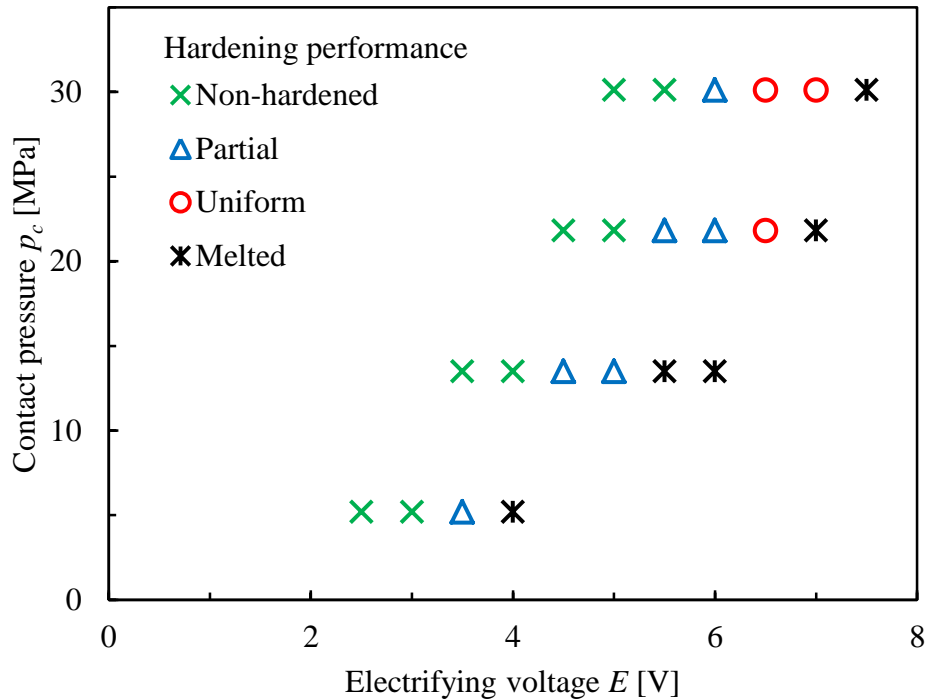
(a) Electrifying time $t = 2s$ (b) Electrifying time $t = 1s$

Fig.3.8 Relationship between hardening performance and electrifying condition

図 3.8 では、通電条件の一つとして通電電圧により、均一焼入れが可能な通電条件を明らかとした。しかし、本実験で通電電圧は無負荷電圧であり、被処理材の抵抗や電源装置の出力インピーダンスによっても焼入れ状態は左右されると考えられ、普遍的な結果を示しているとは言えない。そこで、通電加熱はジュール発熱により加熱しており、それは電極を流れる電流に依存することが知られている。したがって、通電条件と焼入れ状態の普遍的な関係を示すには、通電電圧の代わりに電流量によって把握する必要がある。

図 3.9 に、図 3.8 により均一焼入れが可能であった条件での、通電加熱時の電流実効値の時間変化を示す。各条件とも、通電初期でやや乱れ高い値が示されているが、その後ほぼ一定の値を示している。そこで、通電加熱中の電流実効値の平均を電極先端部の公称面積で割り、公称電流密度 J を算出した。通電条件として、通電電圧 E の代わりにこの公称電流密度 J で焼入れ状態との関係を整理した。

図 3.10 に、その結果を示す。この結果から、通電時間 2s で単発の局所通電焼入れを行う場合、電極接触圧力 $p_c = 21.8\text{MPa}$ の条件では公称電流密度 $J = 110 \sim 120\text{A/mm}^2$ の範囲、電極接触圧力 $p_c = 30.1\text{MPa}$ の条件では公称電流密度 $J = 130 \sim 140\text{A/mm}^2$ の範囲が適当だと言える。また、通電時間を 1s に減少させた場合、公称電流密度はそれらの上限値近辺が適当である。なお、本実験では通電電圧を 0.5V 刻み、電極接触圧力を 4 段階に変化させた結果からこれらの通電条件を推奨したが、通電条件をより細かく設定することによって、より広い均一焼入れが可能な通電条件の範囲を示すことができると考えられる。

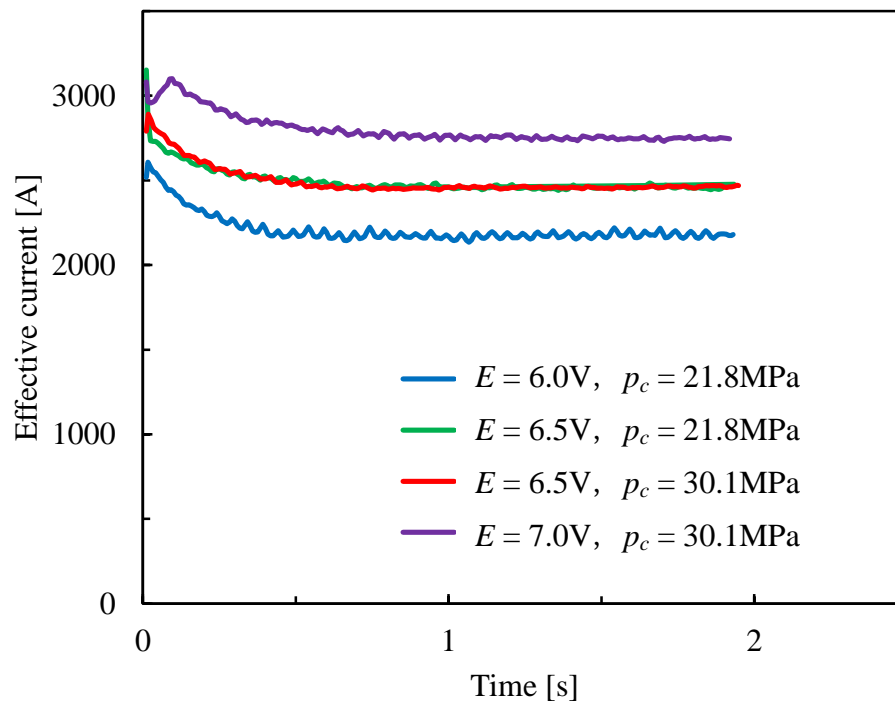


Fig.3.9 Variation of effective current with time during electrification

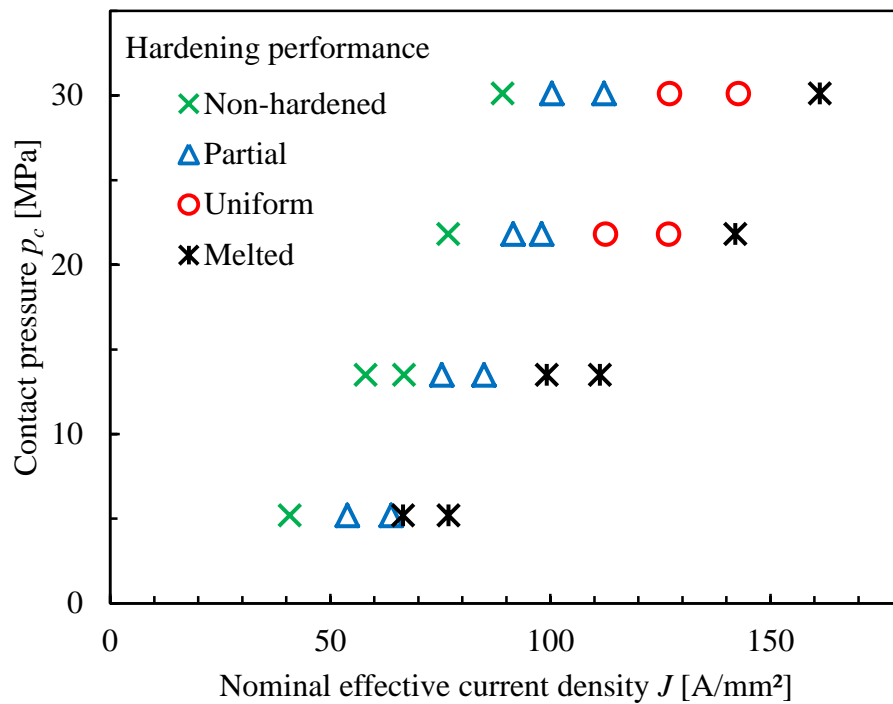
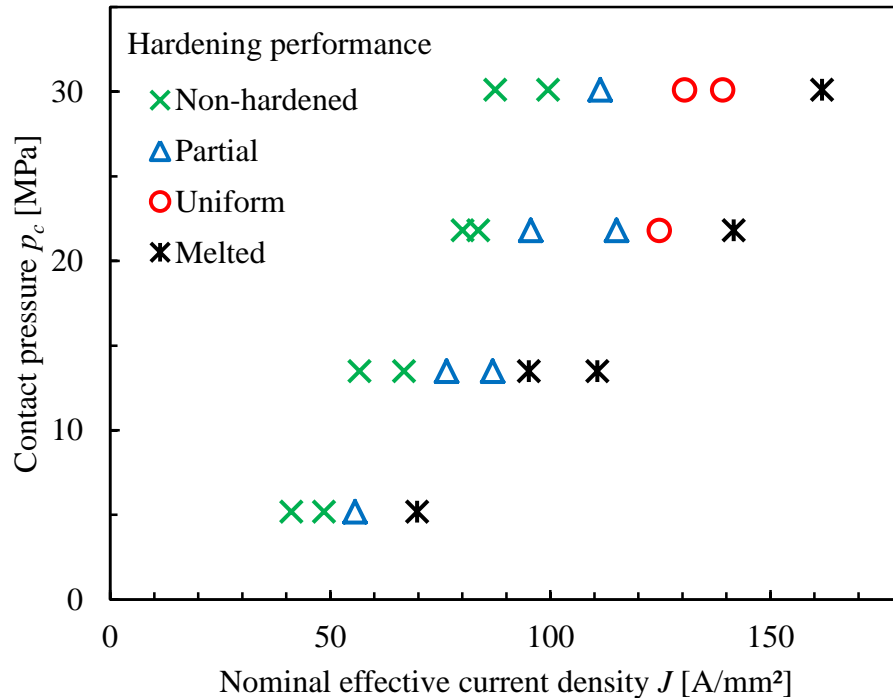
(a) Electrifying time $t = 2s$ (b) Electrifying time $t = 1s$

Fig.3.10 Universal relationship between hardening performance and electrifying condition

3.2.5 焼入れ深さに与える影響

前項までは試験片の処理表面の硬さに着目した。しかし、実際に機械や装置の部品に焼入れ処理を行った際、処理表面は十分な硬さが得られていても、内部の硬さが急激に低下していれば陥没や剥離が発生し、故障の原因となる。よって、深さ方向の硬さ向上も重要である。

表 3.1 に、図 3.8 から得られた均一焼入れが可能な通電条件を示す。通電条件(a)を基準とし、通電条件(b)は通電電圧が低く、通電条件(c)は電極接触圧力が高い条件である。また、通電条件(d)は通電時間が短くなっている。これらの通電条件で局所通電焼入れを行った。

図 3.11 に、各通電条件での深さ方向の硬さ分布を示す。また図 3.12 に、その時の断面の写真を示す。各通電条件とも、深さが 0.25mm の点では処理表面よりも高い硬さが得られた。硬さはその後、しばらく一定の値を示したのち、なだらかに低下した。通電条件(a), (b), (c)を比較した場合、硬さ分布や断面写真に大きな違いは見られないことから、通電電圧（公称電流密度）と電極接触圧力が焼入れ深さに与える影響は小さいと考えられる。しかし、通電時間が短い通電条件(d)では、硬さが大きく低下している。また、通電時間が 2s の場合、深さ 1.0mm 程度まで処理表面より高い硬さが得られ、その後低下したのに対し、通電時間が 1s の通電条件(d)は、それより浅い位置から硬さの低下が始まっている。これらは処理表面の硬さ同様、通電時間の短いことにより熱の拡散が不十分であったためだと考えられる。したがって、十分な焼入れ深さを得るためには通電時間を長く設定する必要があると考えられる。

Table 3.1 Electrifying conditions

	Electrifying voltage E [V]	Contact pressure p_c [MPa]	Electrifying time t [s]
(a)	6.5	21.8	2
(b)	6.0	21.8	2
(c)	6.5	30.1	2
(d)	6.5	21.8	1

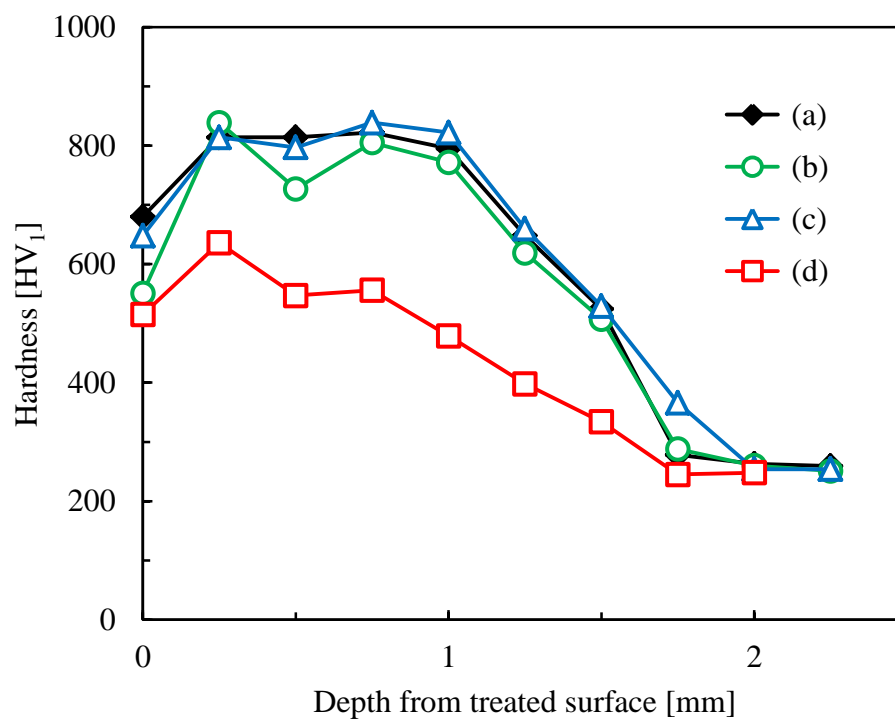
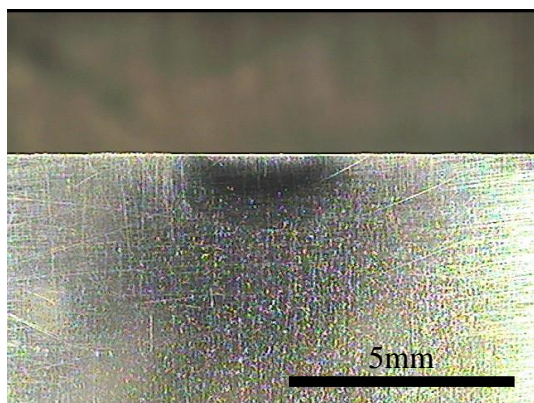
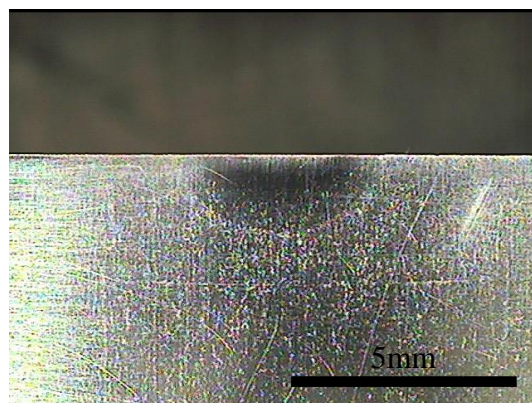


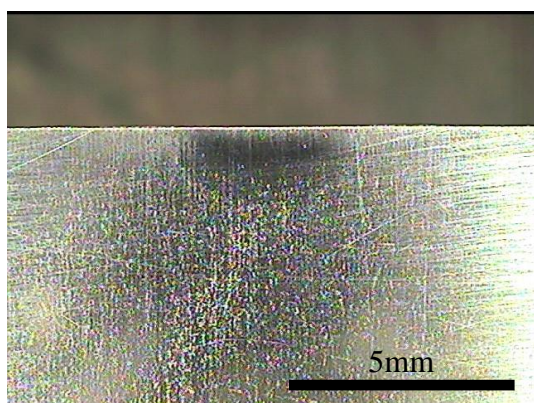
Fig.3.11 Hardness development in depth direction, showing influence of electrifying condition



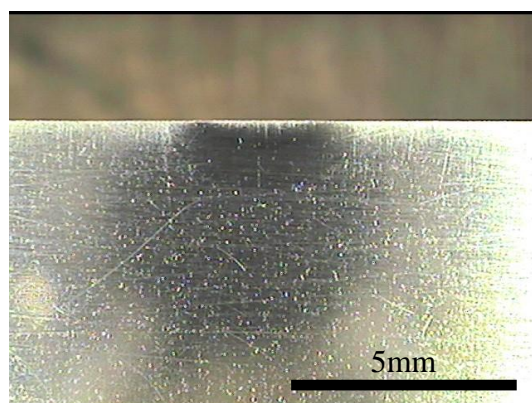
Electrifying condition (a)



Electrifying condition (b)



Electrifying condition (c)



Electrifying condition (d)

Fig.3.12 Photographs of cross section, showing influence of electrifying condition

第4章 単発処理の数値シミュレーション

局所通電焼入れ実験では処理中、電極と試験片が接触状態にあるため、電極接触面及び試験片内部の温度変化を調べることができない。そこで、数値シミュレーションにより単発処理時の加熱・冷却過程における温度変化の把握を試みた。

4.1 計算方法

図4.1に、本シミュレーションで考えた局所通電焼入れの計算モデルを示す。被処理材である試験片を電極と銅板により挟み、その上下に一定の電圧を印加するモデルを考える。試験片、電極、銅板といった各モデルはいくつかの小さな要素で分割しており、各要素の中心に抵抗体を配置し抵抗回路網を構成している。

電極、銅板のそれぞれ上端、下端の要素で、ある量の電流の流入及び流出が短時間あった場合を考える。その時、それ以外の要素ではキルヒホッフの法則より、電流の流入・流出の総和が0である。この関係を連立方程式により計算することで、各要素の電位を算出することができる⁶⁾。そして、要素間の電圧及び電気抵抗から、要素間を流れる電流を求めることができ、それらをさらに設定した電圧（通電電圧 E ）を印加した時の値に変換する。これら要素間の電流と電気抵抗から、この時間に通電により生じたエネルギーを算出し、それらのエネルギーは各要素の温度上昇に使用される。また、この間、接する要素間では熱伝導による熱の移動が発生している。これは、各要素の温度とその間の熱伝導率から移動するエネルギー量を算出することで求めることができる。こうしてある短時間、通電した際の各要素の温度を算出する。

以上の計算を設定した時間（通電時間 t ）に達するまで繰り返し行い、通電加熱による温度変化を算出した。冷却過程では、上記の熱伝導による各要素のエネルギーの増減だけを計算し、熱の移動、拡散による温度変化を算出した。なお、冷却過程では、通電加熱後、電極を接触させたまま保持した条件と、離す条件の2つのモードを仮定した。

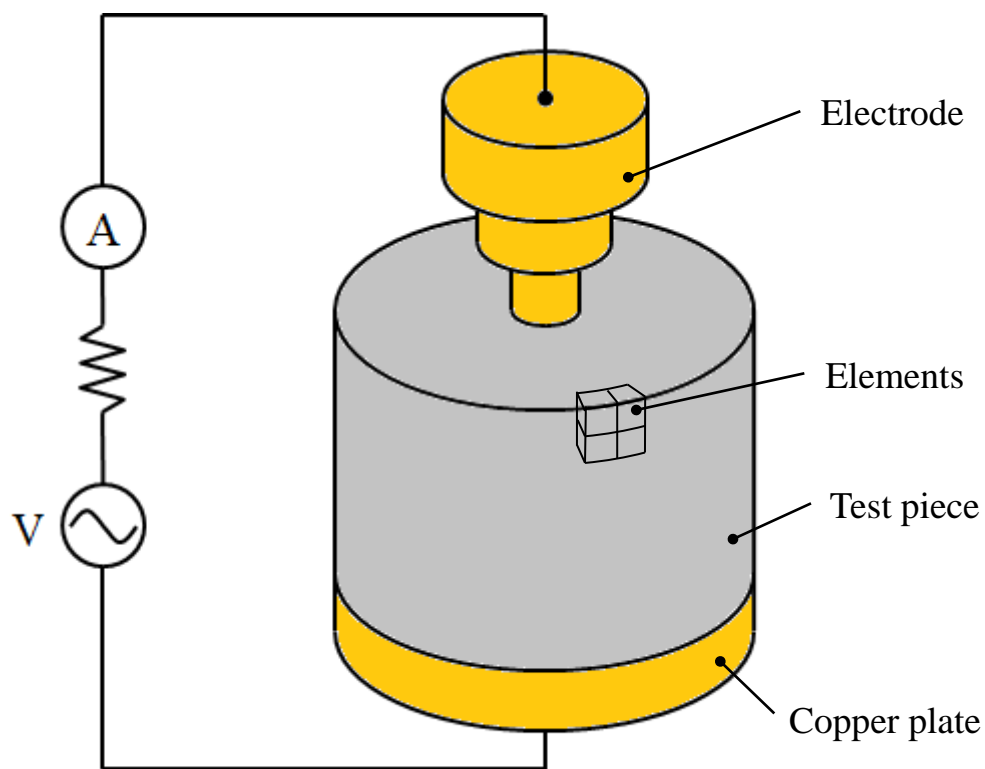


Fig.4.1 Simulation model of the local resistance hardening

4.2 計算条件

図 4.2 に、実際に本シミュレーションで用いた計算モデル、及びその寸法を示す。計算は 3 次元の要素配列ではなく図のような軸対象モデルとし、電極と試験片の接触部およびその近傍は 1 辺が 0.25mm の正四角形要素に分割した。そして、計算速度の向上のため、接触部から離れる部分では要素分割を指数関数的に粗くし、計 1500 個の要素で分割した。また、計算モデルの寸法は、実際の電極及び試験片の寸法を反映させた（第 2 章参照）。

各要素の物性値は、試験片を構成する要素には SKD11、電極及び銅板を構成する要素には C30A2 の値をそれぞれ適用した。図 4.3 に、本シミュレーションで用いた SKD11 の各物性値の温度変化を示す。電気抵抗率と比熱については焼鈍材に対する実測値から、近似または一次補間により算出した。しかし、熱伝導率については精度よく測定できなかったため、焼入れ材に対する公表値⁷⁾であるが、温度に関して一次式で近似して用いた。また、C30A2 の物性値⁸⁾については、温度変化は無視した。表 4.1 に、室温 25°C での SKD11, C30A2 の電気抵抗率、比熱、熱伝導率、密度を示す。なお、実際はこの計算モデルよりはるかに体積の大きい銅板、及び銅板に固定されている電極上端部に関しては密度の値を大きく設定している。また、図 4.2 中、白色の要素は、電気抵抗率を極端に高い値、熱伝導率を 0 に近い値に設定し、電極及び試験片の周囲は絶縁断熱状態を仮定した。

実験では、通電条件として通電電圧、通電時間の他、電極接触圧力が焼入れ状態に大きく影響を与えていた。これは先にも述べたように電極接触圧力の増減により、接触面積が増減することが原因だと考えられる。そこで、シミュレーションにおいても接触面積率を仮定し計算を行った。図 4.4 に、接触面積率を仮定した際の接触部の計算モデルを示す。実験で使用した電極の先端部は、エミリー紙によって研磨したため、微小ではあるが凸形状だと考えられる。したがって、理想的には図 4.4(a)の全面接触状態だが、電極接触圧力を減少させることにより、図 4.4(b),(c)の様に外部での接触状態が維持されていない状態になると考えられる。ここで、接触面積率 ε は、実際に接触している要素の面積（図 4.4 中赤線部の半径を有する）を電極先端の公称面積で割った値である。そして、この接触面積率 ε は、電極接触圧力 p_c と正の相関関係にあると考えられる。なお、本シミュレーションでは接触面積率を一定と考え計算を行ったが、実際には、電極は温度の上昇により軟化するため、

接触面積率は変動していくと考えられる。

計算は、初期温度 25°C、内部インピーダンス 2.5mΩ、時間ステップ 0.05ms とし、通電電圧 E 、接触面積率 ε を変化させ行った。なお、これらの数値シミュレーションは C 言語を用い計算した。付録に、加熱過程の温度変化を計算するために用いたプログラムを示す。そこで、計算の詳細及び計算に使用した数式を示す。

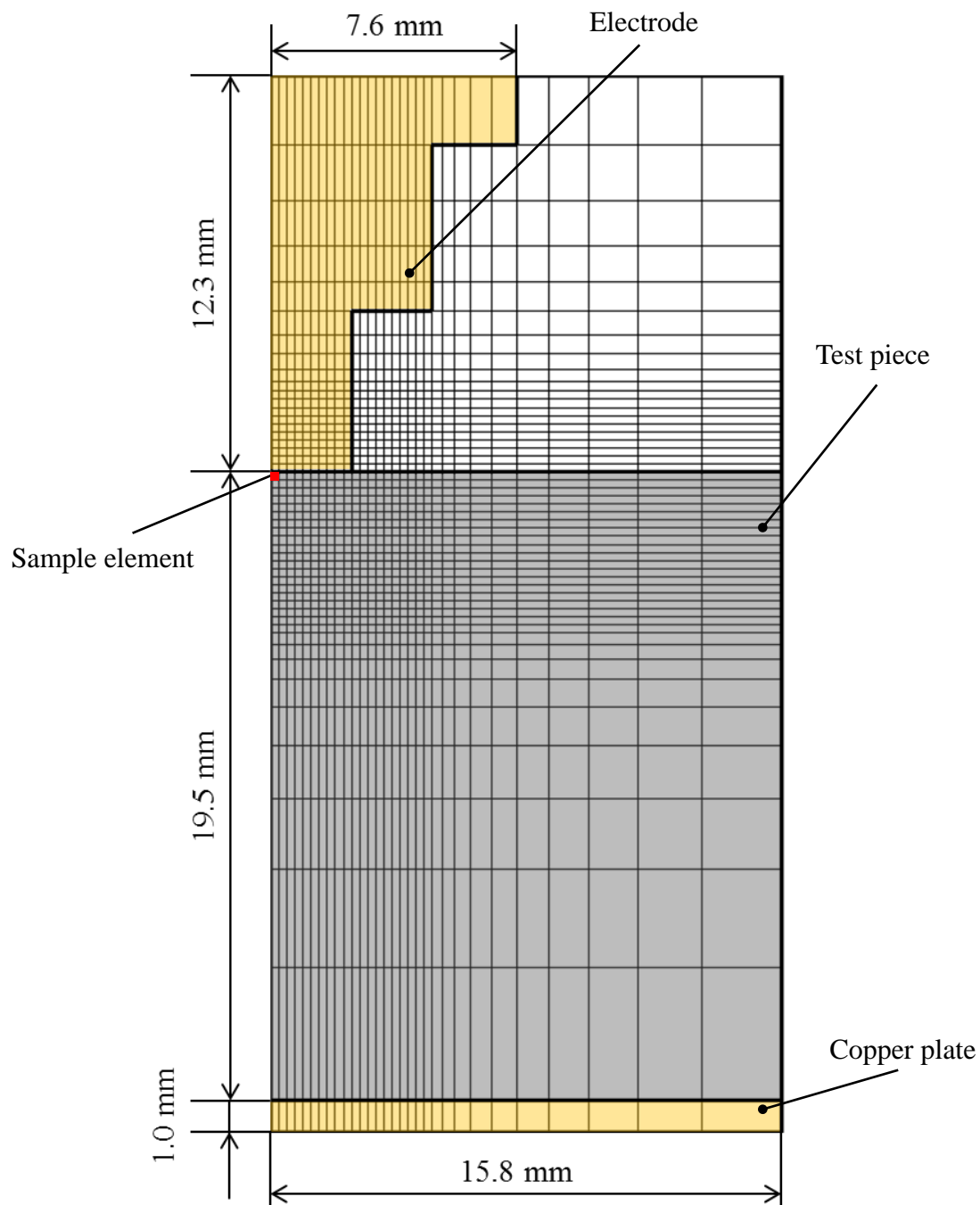
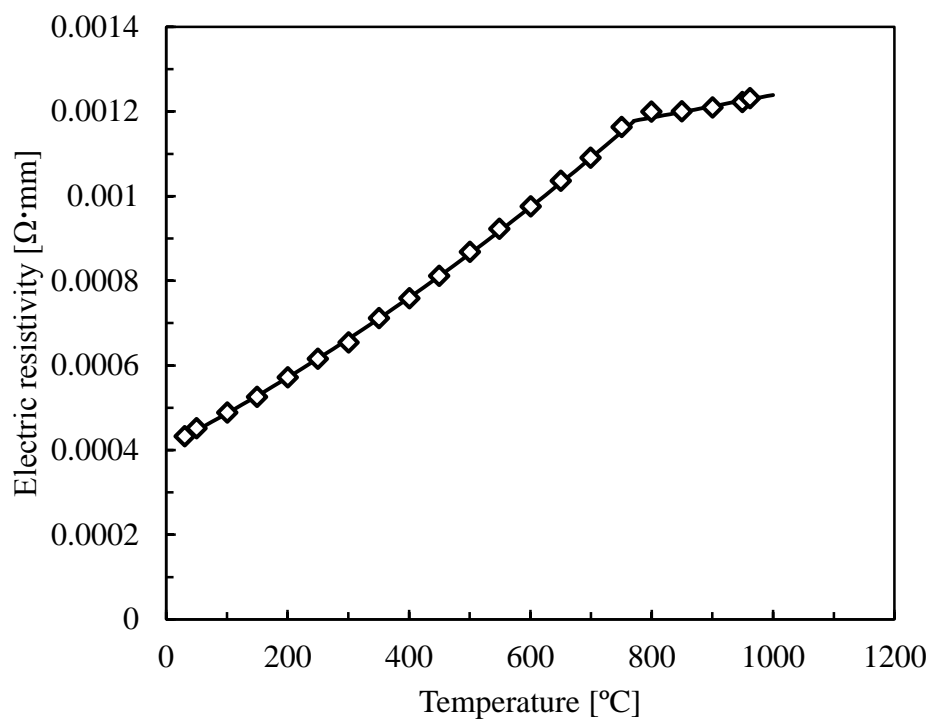
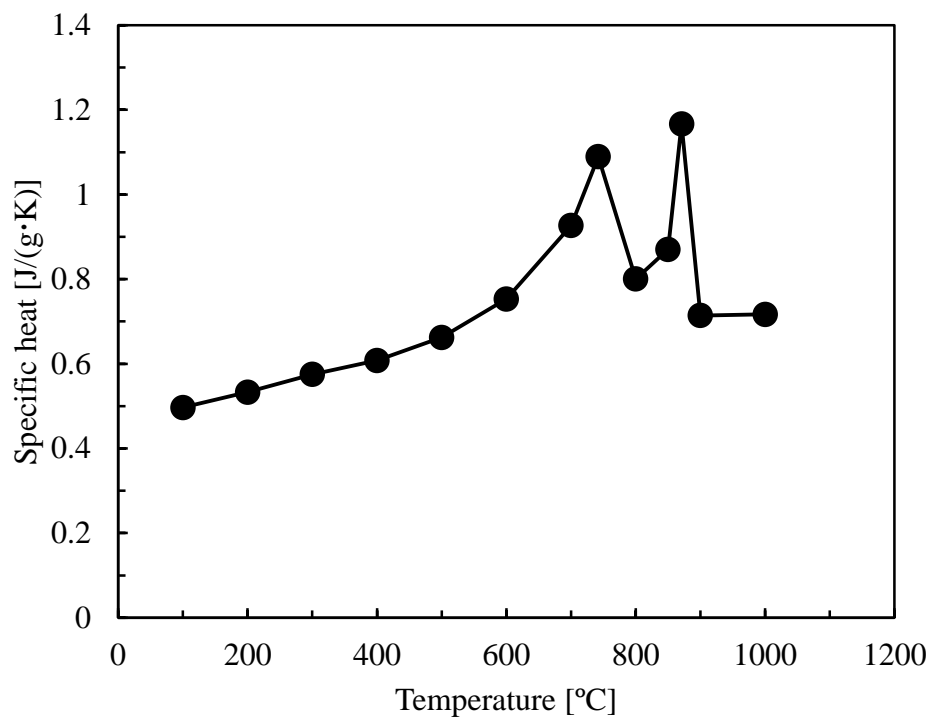


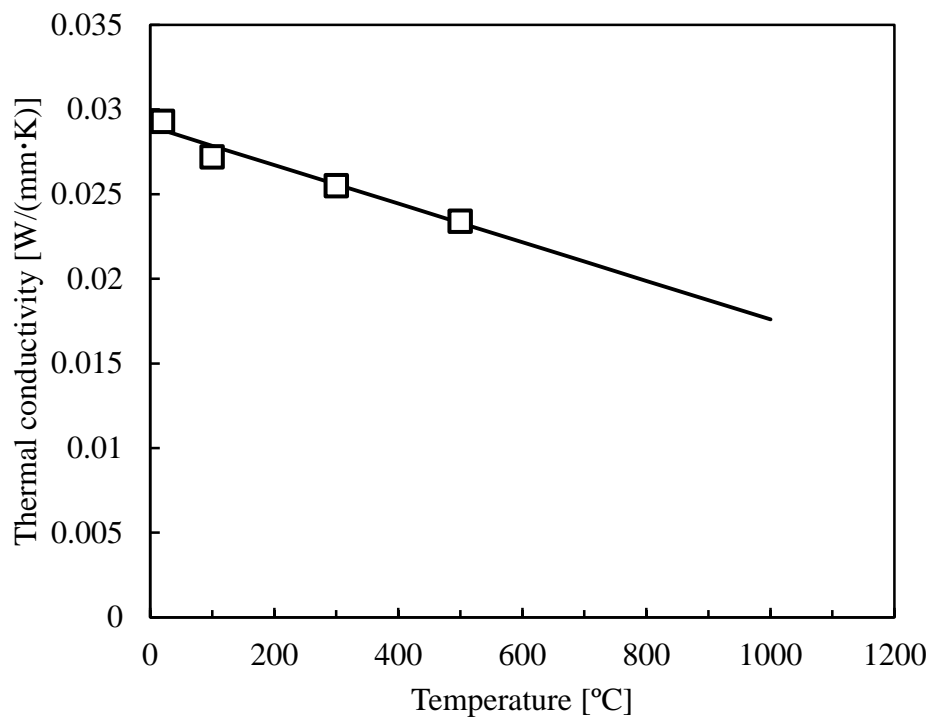
Fig.4.2 Shape and size of axisymmetric simulation model



(a) Variation of electric resistivity with temperature



(b) Variation of specific heat with temperature



(c) Variation of thermal conductivity with temperature

Fig.4.3 Variation of physical property of SKD11 with temperature

Table 4.1 Physical property of SKD11 and C30A2 at room temperature 25°C

	r [$\Omega \cdot \text{mm}$]	c [$\text{J}/(\text{g} \cdot \text{K})$]	k [$\text{W}/(\text{mm} \cdot \text{K})$]	ρ [g/mm^3]
SKD11	42.7×10^{-5}	0.494	0.0287	7.70×10^{-3}
C30A2	3.6×10^{-5}	0.221	0.260	14.2×10^{-3}

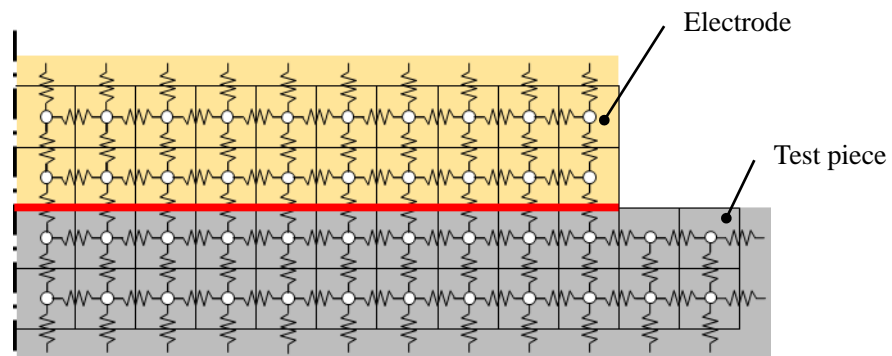
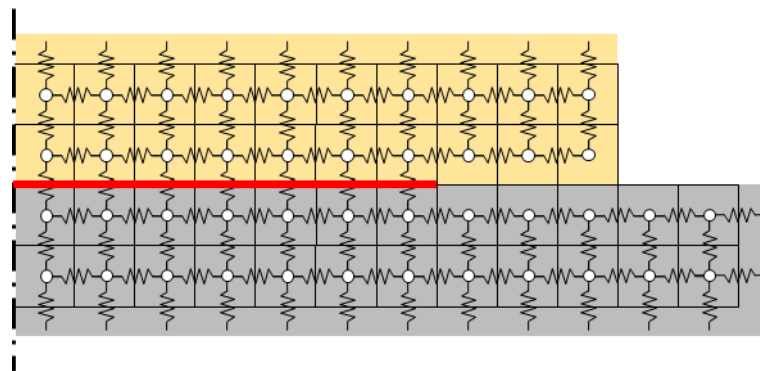
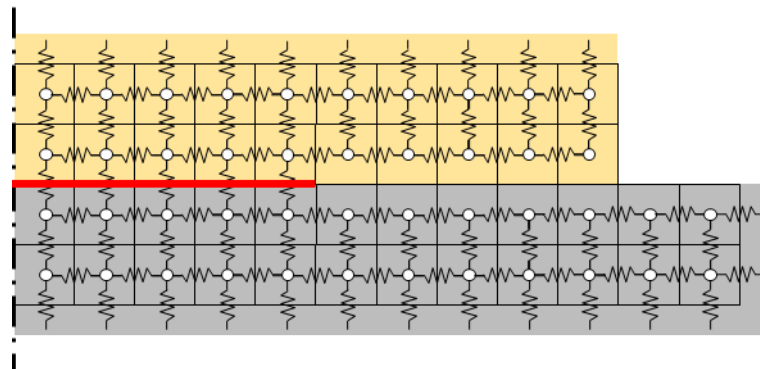
(a) Contact area ratio $\varepsilon = 1$ (b) Contact area ratio $\varepsilon = 0.49$ (c) Contact area ratio $\varepsilon = 0.25$

Fig.4.4 Contact model by contact area ratio

4.3 計算結果及び考察

4.3.1 加熱過程での温度変化

まず、電極全面が接触している状態である接触面積率 $\varepsilon = 1$ の条件で、通電電圧 E を変化させ、試験片表面の中心要素 (図 4.2) の温度変化を計算した。図 4.5 に、その結果を示す。通電電圧が 6V の条件では通電時間 2s で 200°C 程度だが、8V では 400°C、10V では 800°C 以上と、通電電圧を上げることにより入熱量が増加し、到達温度は上昇している。SKD11 の焼鈍し温度は 830~880°C⁷⁾ であることから、800°C を上回った辺りで一部オーステナイト化が発生していると考え、この条件では通電電圧が 10V の時に加熱中心が硬化する。しかし、図 3.8 が示したように、実験ではそれより低い通電電圧であっても十分な硬化領域が得られた。したがって、実際の接触面積は電極先端部の公称面積よりも小さいと考えられる。

図 4.6 に、通電電圧 $E = 5V$ にて接触面積率 ε を変化させた場合の試験片表面の中心要素の温度変化を示す。全面接触状態である接触面積率が 1 の条件では通電時間 2s で 130°C 程度なのに対し、接触面積率を 0.49, 0.25 と下げるにより到達温度は 250°C, 850°C と上昇している。これは、接触面積は電極接触圧力と正の相関があるため、接触圧力を減少させていくことにより硬化領域が発達していった実験結果をよく表している。また、十分な加熱結果が得られた接触面積率が 0.25 の条件では、1s の時点で 700°C と高い温度を示しているように、図 4.5, 図 4.6 共に、温度勾配は通電初期で大きい、熱の拡散により徐々に勾配は小さくなっている。実験において、通電時間を減少させても処理表面の硬さはあまり低下しなかった理由が、このシミュレーション結果から理解できる。

図 4.7 に、各接触面積率 ε にて通電電圧 E を変化させ 2s の通電加熱を行った際の、試験片表面の中心要素の到達温度を示す。図 4.5 でも示したように、通電電圧の増加により到達温度は上昇している。そして、接触面積率が低い条件ほどそれは顕著である。つまり、接触面積率が低いほど、加熱中心をオーステナイト化温度まで加熱するのに必要な通電電圧が低いことを示している。これが、電極接触圧力が低い条件では、焼入れに必要な通電電圧及び公称電流密度が低いという実験結果が得られた理由だと考えられる。

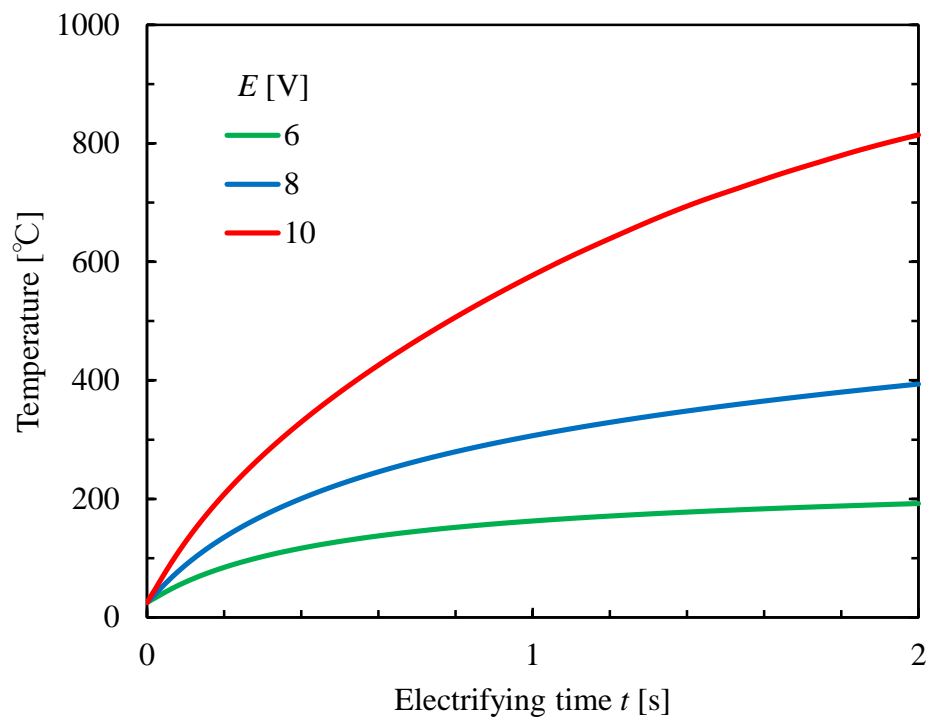


Fig.4.5 Variation of temperature with electrifying voltage E (Contact area ratio $\varepsilon = 1$)

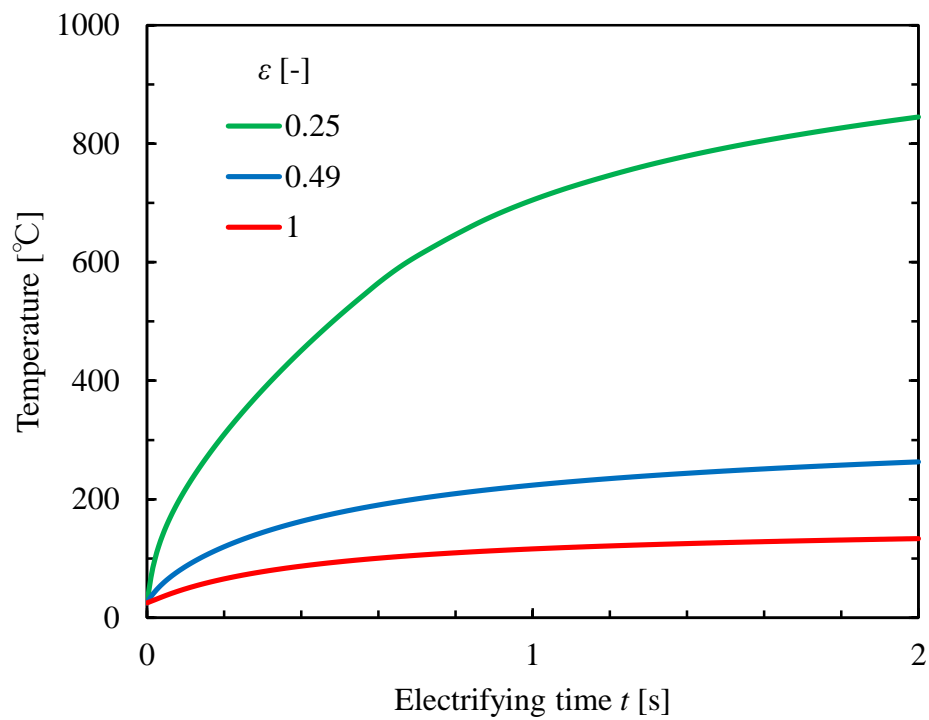


Fig.4.6 Variation of temperature with contact area ratio ε (Electrifying voltage $E = 5$ V)

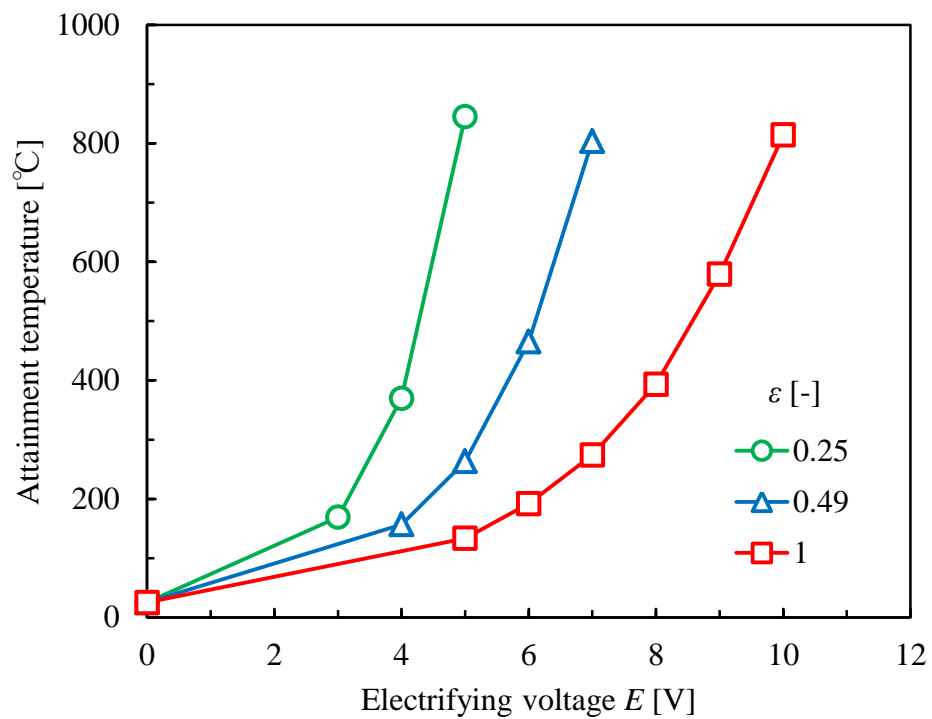


Fig.4.7 Influence of electrifying voltage E and contact area ratio ε on temperature
(Electrifying time $t = 2\text{s}$)

図 4.8 に、図 4.7 において到達温度が 800°C を上回った通電条件での、試験片及び電極の温度分布を示す。また図 4.9 に、その時の試験片表面要素の温度を示す。図中の破線は電極の公称半径を示している。なお、各条件とも通電時間は 2s である。加熱領域はやや異なるものの、どの通電条件においても試験片は電極接触部近傍において高い温度が示されている。そして、試験片表面の中心要素は 800°C 程度だが、その周囲は 1000°C 以上と中心要素よりも高い温度である。これは、熱伝導率が極めて高い C30A2 の電極によって、試験片の電極と接触している要素では、熱が大きく奪われているためだと考えられる。したがって、図 4.9 に示すように、試験片の表面には環状に高温域が生じる。この現象により実験では、硬化領域が環状に発達していったと考えられる。

また、3 条件とも中心部は同程度の温度だが、最高温度は接触面積率が低い条件ほどそれぞれ 100°C 程度高い。図 3.8 や図 3.10 で示したように、実験において電極接触圧力が低い条件では均一焼入れが行える条件は認められなかった。接触圧力が低い条件とは、シミュレーションにおける接触面積率が低い条件であり、この時、加熱中心の温度と環状に存在する最高温度との差は大きい。したがって、このような条件では加熱中心がオーステナイト化温度域に達する前に、試験片の最高温度部と接触状態にある電極表面が溶融したと考えられる。また、電極が溶融するまでに加熱中心がオーステナイト化温度域に達したとしても、温度差が大きいため均一焼入れが行える条件は狭くなる。

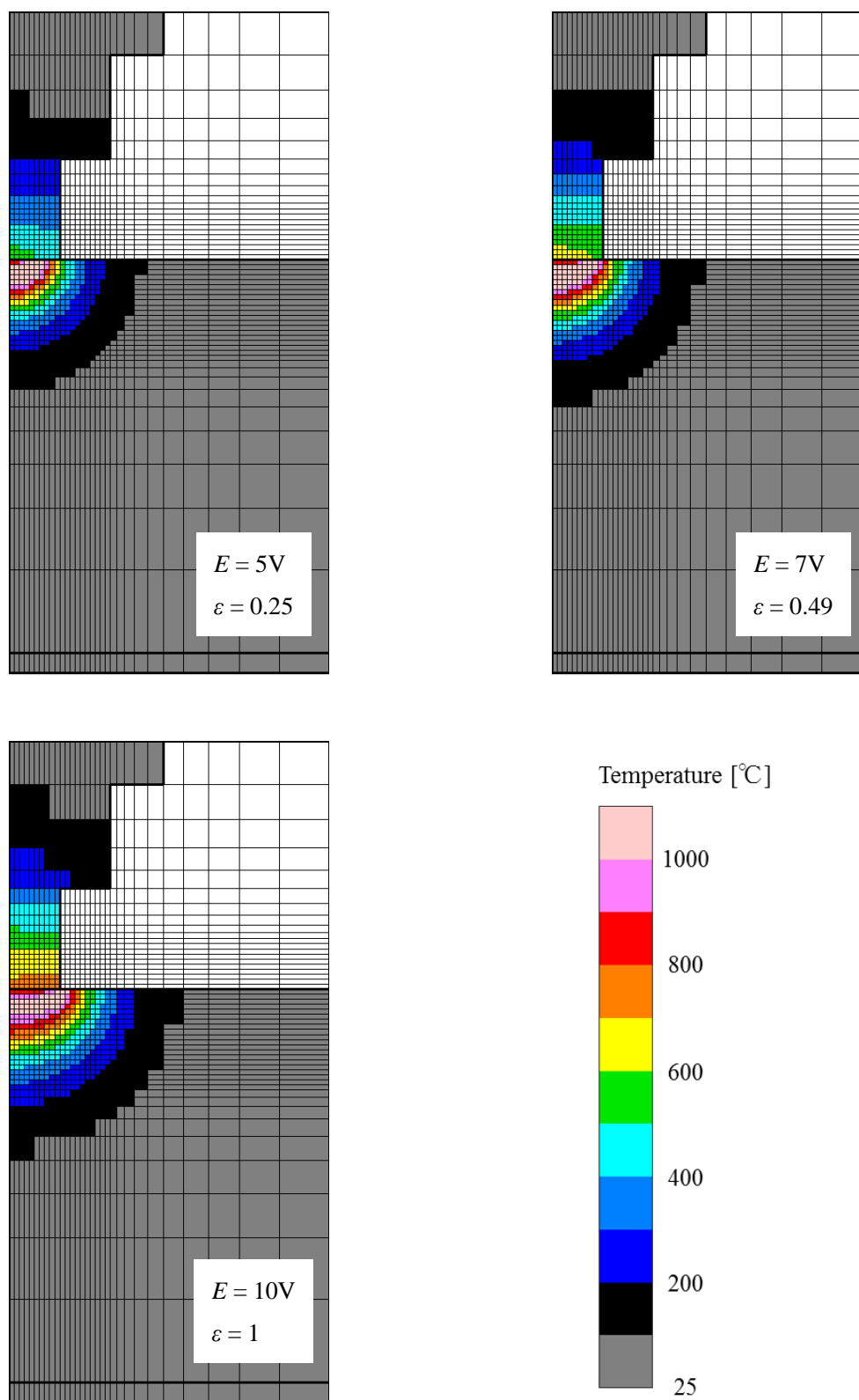


Fig.4.8 Temperature distribution, showing influence of electrifying voltage E and contact area ratio ε
(Electrifying time $t = 2s$)

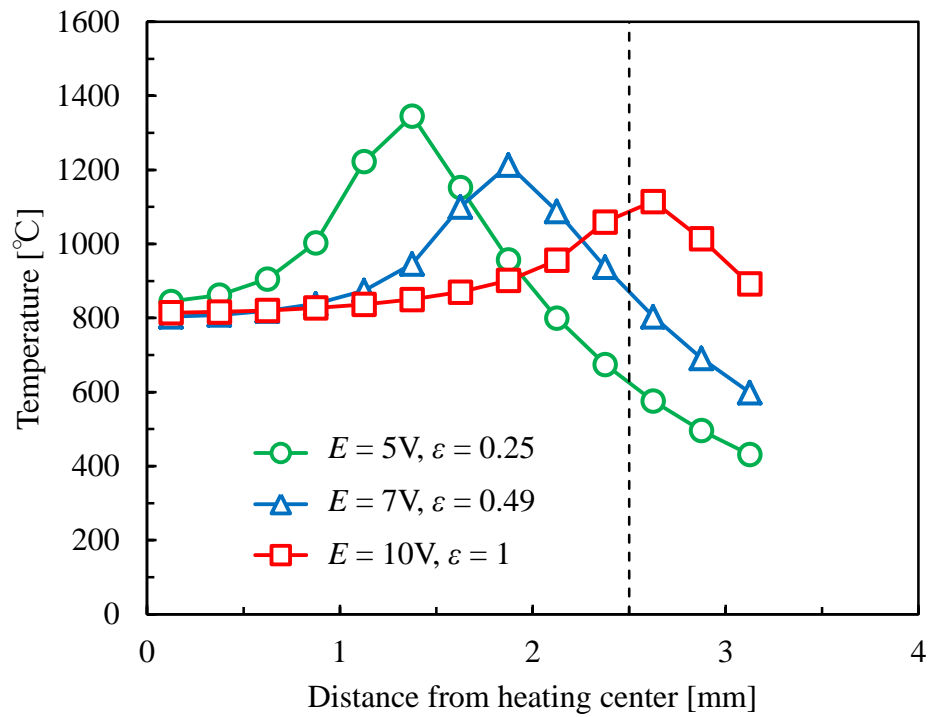


Fig.4.9 Temperature in test piece surface, showing influence of electrifying voltage E and contact area ratio ε (Electrifying time $t = 2\text{s}$)

図 4.10 に、通電電圧 $E = 5V$ 、接触面積率 $\varepsilon = 0.25$ にて通電時間 t が 1s と 2s の時の、試験片及び電極の温度分布を示す。通電時間が短い 1s の条件であっても $1000^{\circ}C$ 以上の高温域が認められるが、通電時間の長い 2s の条件に比べ、全体の加熱領域は狭くなっている。これは、通電時間が短いことで、入熱量が少なかったこと、熱の拡散が不十分であったことが原因として考えられる。

図 4.11 に、図 10 で示した温度分布の試験片中心要素の深さ方向の温度を示す。どちらの通電時間も表層部の温度は比較的低温で、深くなるにつれ上昇していき、その後緩やかに減少していく。この結果から、図 3.11 に示したように深さ方向の硬さは、処理表面より高い値を示した後、なだらかに低下していった理由が理解できる。また、通電時間が短い条件では全体的に温度が低いことから、実験において、通電時間の減少により深さ方向の硬さが低下したことがわかる。

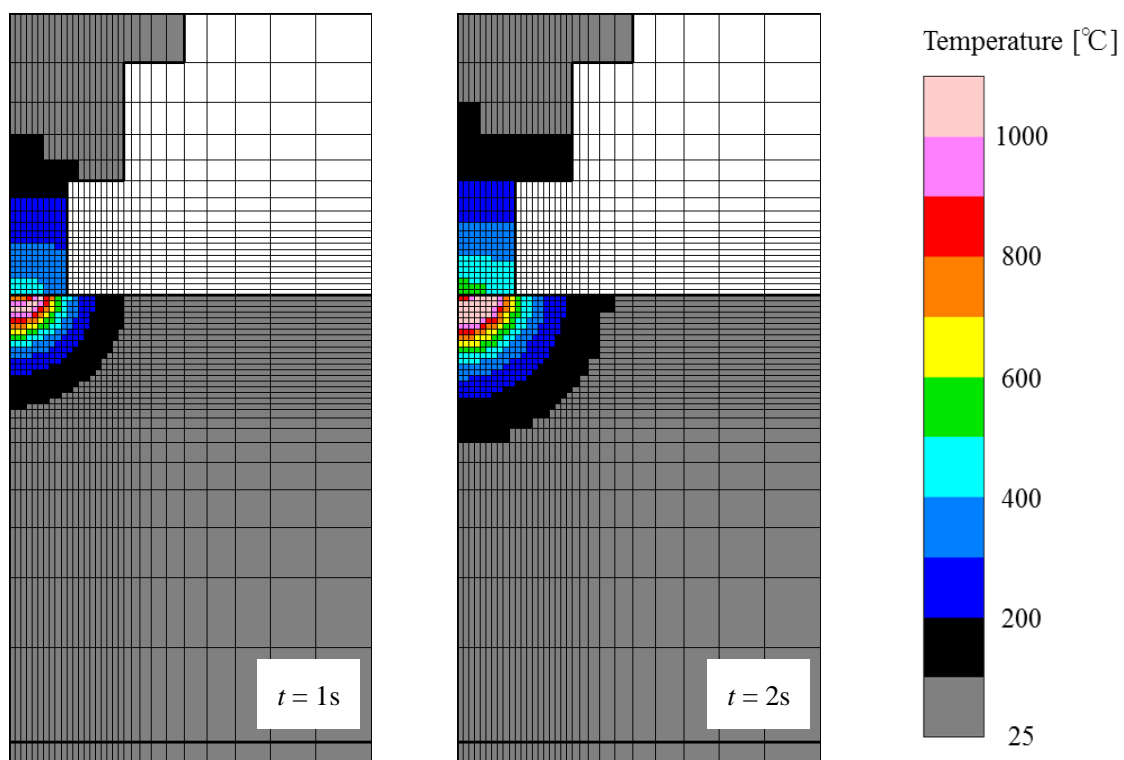


Fig.4.10 Temperature distribution, showing influence of electrifying time t
(Electrifying voltage $E = 5V$, Contact area ratio $\varepsilon = 0.25$)

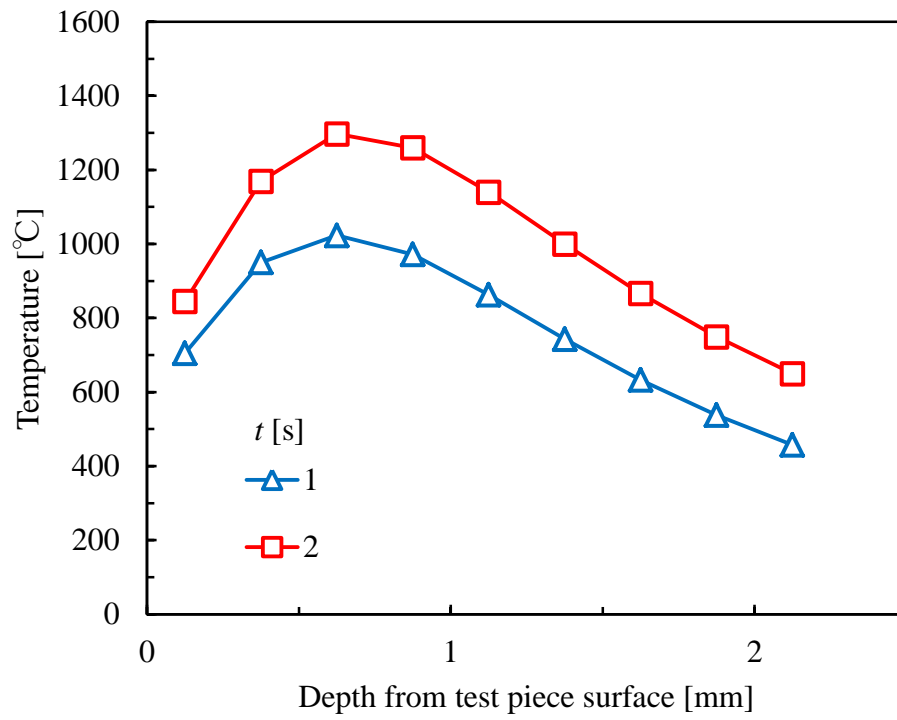


Fig.4.11 Temperature in depth direction, showing influence of electrifying time t
(Electrifying voltage $E = 5V$, Contact area ratio $\varepsilon = 0.25$)

4.3.2 冷却過程での温度変化

図 4.12 に、図 4.8 に温度分布を示した 3 条件における、試験片表面の中心要素の冷却過程での温度変化を示す。なお、図において、通電完了後も試験片に電極を接触させて冷却させた条件を実線、通電完了と同時に試験片から電極を離して冷却させた条件を破線により示す。どの条件であっても、熱の拡散、移動だけで十分な冷却速度が得られることがわかる。同じ冷却条件で通電条件の影響を比べた場合、図 4.8 に示した加熱領域が狭い、通電電圧が低く接触面積率が小さい条件ほど、その冷却速度は大きい。

続いて冷却条件で比べた場合、電極を接触させた条件では、試験片表面の中心要素は冷却過程においても電極に熱を奪われ続けるため、通電完了時を最高温度としそのまま時間の経過により減少していく。一方の電極を離した条件では、電極を離した直後に温度が一旦上昇している。試験片表面の要素は、電極を離したことで電極に熱を奪われることはなく、反対に周囲の 1000°C を超えた高温域から熱伝導によって熱を与えられたため、温度が上昇したのだと考えられる。温度上昇後は周囲の温度と同程度になったため、試験片内での熱拡散により温度は減少していく。本シミュレーションでは、試験片外部は断熱状態であり、熱伝達や熱放射の影響は無視して計算を行っているため、実際の局所通電焼入れ処理では、ここまでの温度上昇は認められないと考えられる。しかし、この結果は、冷却過程において通電完了と同時に試験片から電極を離すことにより、環状の部分的な焼入れ状態が得られた通電条件であっても均一焼入れが行える可能性を示している。

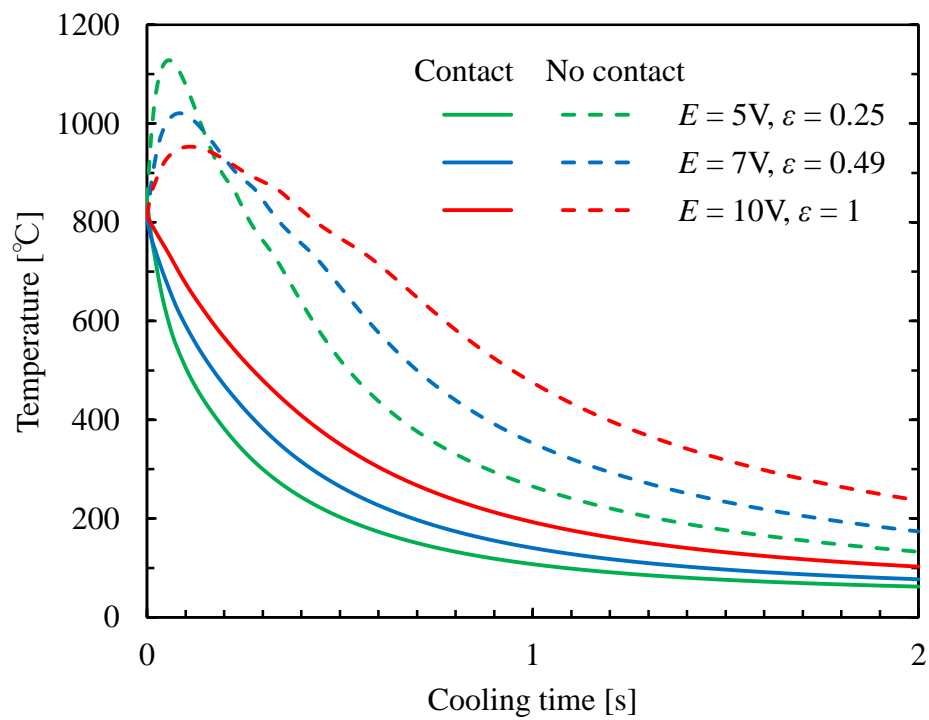


Fig.4.12 Variation of temperature with contact situation of electrode in cooling process

第5章 連続処理実験

単発処理では通電条件を適切に設定することで、電極径内において均一な焼入れ状態を得ることができた。しかしその硬化面積は比較的狭く、実際に局所焼入れを行う場合にはより広い硬化範囲が望まれる場合がある。線状・面状により広い硬化範囲を得る方法として、硬化範囲を重ね合わせる連続処理が考えられる。そこで、連続処理後の焼入れ状態を調査した。

5.1 実験条件

連続処理実験では、単発処理実験と同様に局所通電焼入れを行った後、電極を後退させ、試験片を一定方向にずらし加熱中心を変化させ線状に焼入れを行った。なお、その際、試験片が十分に冷却されてから次点以降の処理を行った。これは、十分に冷却されていない箇所と同じ入熱量を与えると、その箇所は高温に達し溶融が発生すると考えられたからである。しかし、この処理方法を実用化する場合、試験片冷却のための待機時間は処理効率を下げることとなる。そこで図 5.1 に、実用化する際の処理順序の例を示す。図中の数字は処理する順番を示す。溶接時の処理順序の様に、処理する箇所を毎回離すよう工夫することで、無駄な待機時間を必要とせず本実験と同じ結果が得られる。

図 5.2 に、本連続処理で得られる硬化領域の予想図を示す。ここで、試験片をずらす幅、つまり電極中心間の距離をピッチと定義する。本実験では先端形状が円形の電極を使用しているため硬化領域は円形である。よって、連続処理で硬化領域を重ね合わせていくためにはピッチを硬化領域の直径以下に設定する必要がある。図 5.3 に、図 3.8 より均一焼入れが可能であった、電極接触圧力 $p_c = 21.8\text{MPa}$ 、通電時間 $t = 2\text{s}$ 、通電電圧 E がそれぞれ 6.5V 、 6.0V で単発処理を行った際の硬さ分布を示す。なお、図には加熱中心を基準とし縦方向、及び横方向の硬さ分布をそれぞれ示した。この図から、硬化領域はおおよそ直径 4mm の範囲であることがわかる。したがって、これらの通電条件でピッチを 2mm と 3mm に設定して実験を行った。処理後の焼入れ状態の評価では単発処理と同様、ビッカース硬さ試験により処理表面の硬さを測定したが、その際、連続処理では表面の酸化が激しく加熱中心の見

極めが困難であったため、処理表面を#2000のエミリー紙によって研磨した後、硬さの測定を行った。

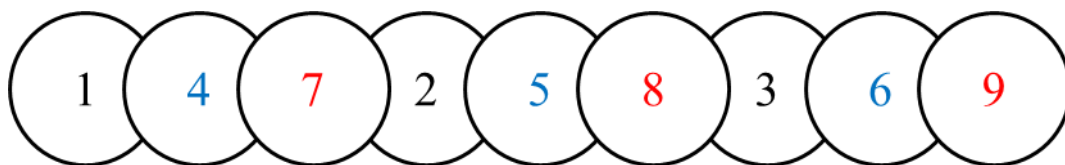


Fig.5.1 Example of the order of treatment in practical treatment

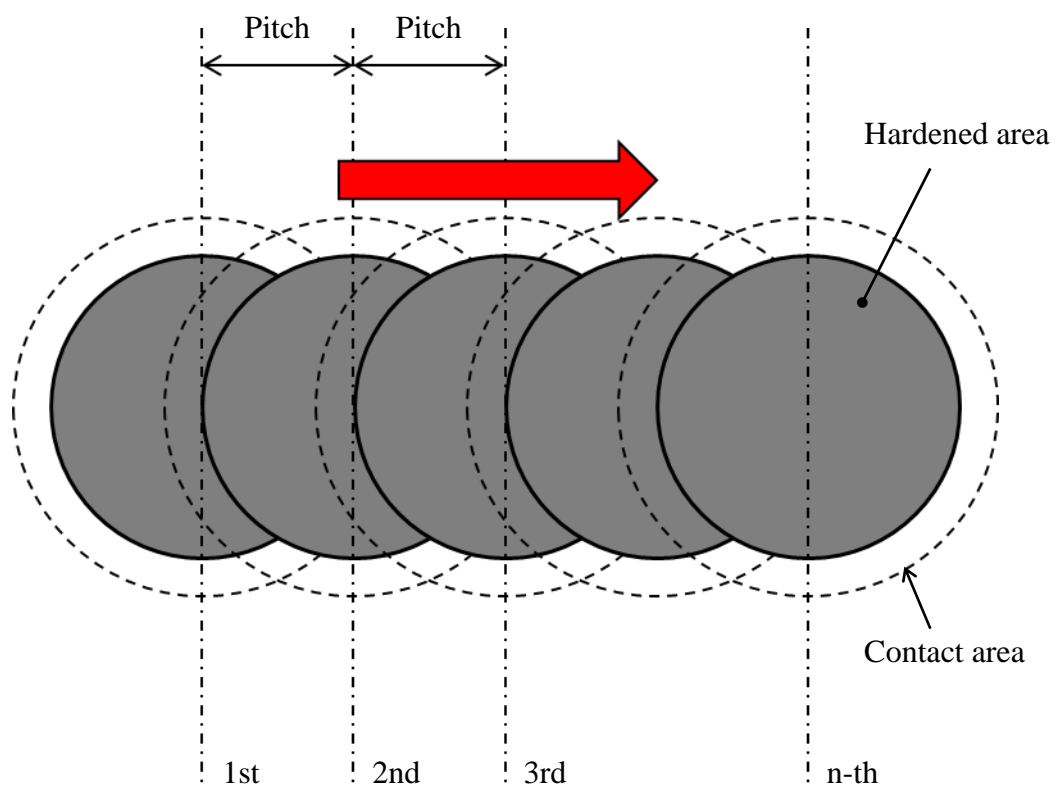


Fig.5.2 Illustration of expected continuous treatment result

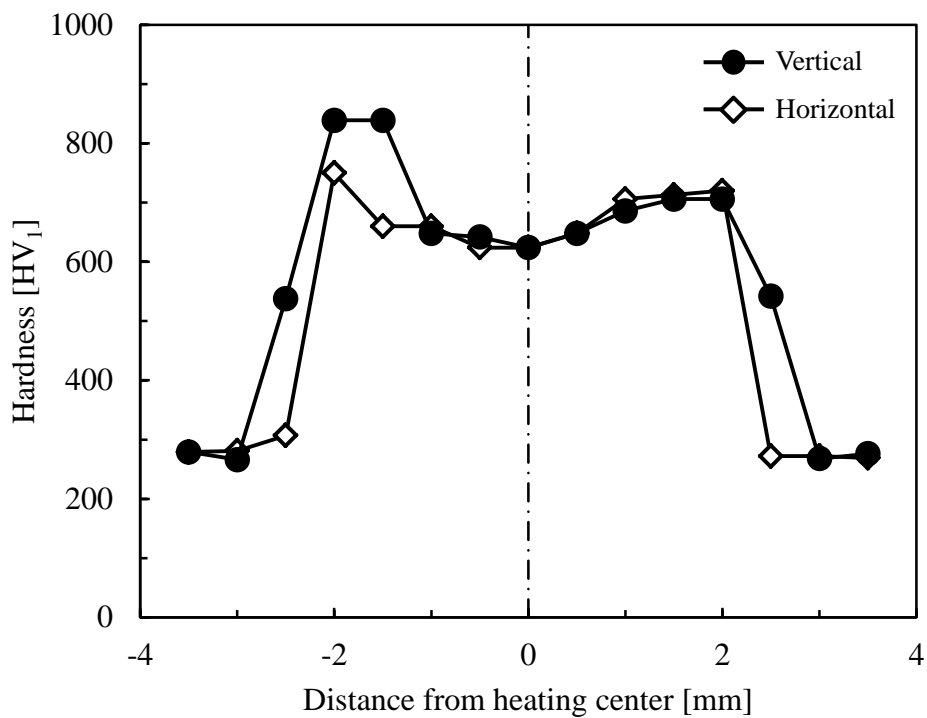
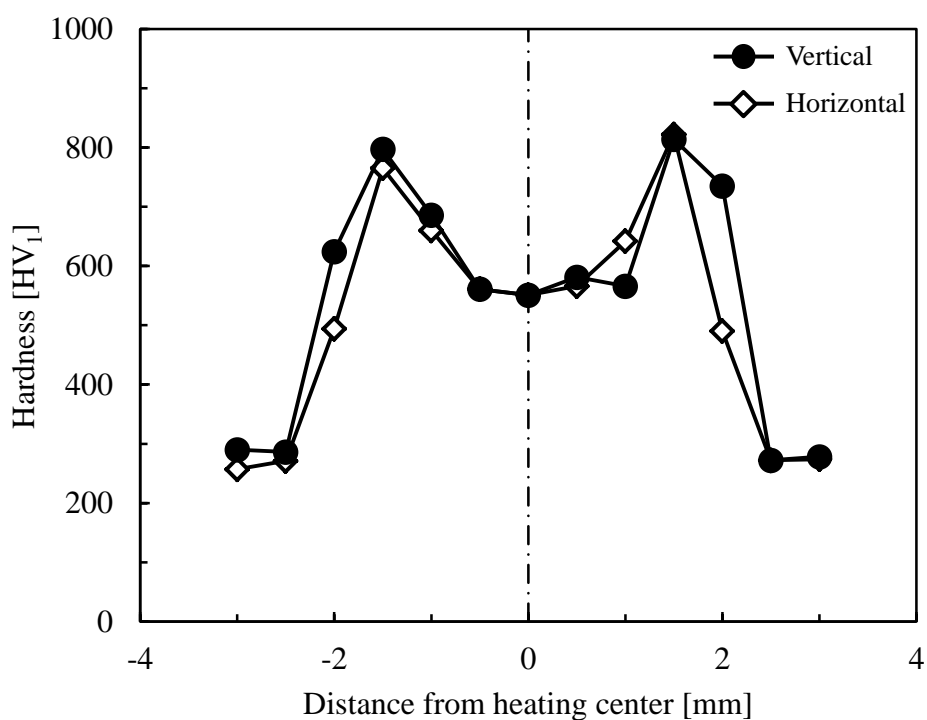
(a) Electrifying voltage $E = 6.5\text{V}$ (b) Electrifying voltage $E = 6.0\text{V}$

Fig.5.3 Hardness development in contact area by single treatment
 (Contact pressure $p_c = 21.8\text{MPa}$, Electrifying time $t = 2\text{s}$)

5.2 実験結果及び考察

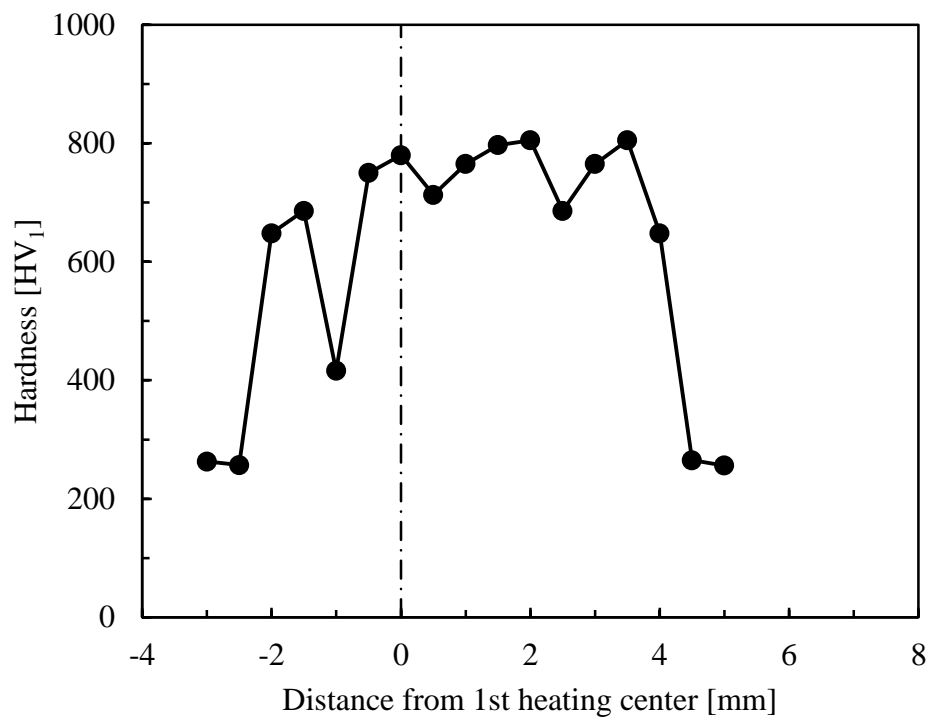
図 5.4 に、通電電圧 $E = 6.5V$, $2mm$ のピッチで 2 点処理を行った際の処理表面の硬さ分布及びその写真を示す。また図 5.5 に、ピッチを $3mm$ に広げた際の処理表面の硬さ分布及びその写真を示す。なお、図中の一点鎖線は 1 点目の加熱中心を示しており、左から右の順に処理を行った。電極には大きな損傷は見られなかったものの、ピッチが $2mm$ の条件では、試験片表面が一部溶融した様子が観測された。しかし、ピッチを $3mm$ に広げることで処理表面の溶融は防ぐことができた。また、どちらのピッチ条件においても、2 点目の処理により $4mm$ の硬化領域が形成されていると考えられるが、その外側 $0.5mm$ 離れた点では硬さが大きく低下している。そしてそれより離れた箇所では 1 点目の処理によって硬化したと考えられる硬化領域が観測された。

続いて、試験片表面の溶融を防ぐために、通電電圧を $6.0V$ に下げ複数点連続処理を行った。その結果を図 5.6, 図 5.7 に示す。なお、図 5.6 は $2mm$ のピッチで 5 点、図 5.7 は $3mm$ のピッチで 4 点連続処理を行った際の硬さ分布及びその写真である。この条件においても、ピッチが $2mm$ の条件では処理表面に溶融が発生した。そして、ピッチは $2mm$ で一定にも関わらず、5 点目の処理部は明らかにずれている。また、ピッチが $3mm$ の条件では、図 5.5 に示した結果と同様に、後行処理による硬化領域のすぐ外側で硬さの大きな低下が観測された。

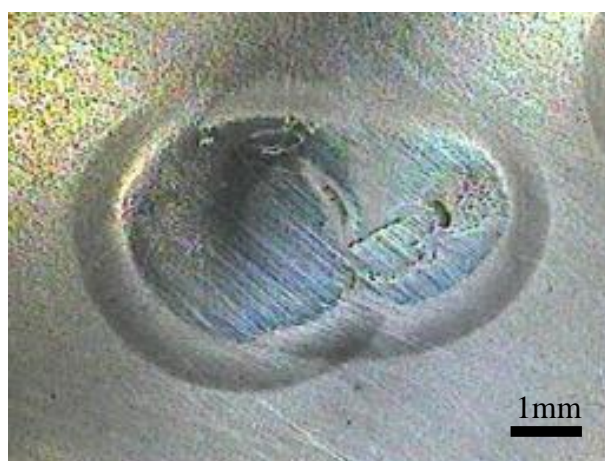
ここで、硬化範囲を重ね合わせる連続処理では、上記のような現象が生じた原因を考える。まず、ピッチが短い条件では処理表面に溶融が発生した原因だが、それには試験片表面の粗さが影響していると考えられる。局所通電焼入れ後の処理表面は、酸化や電極の押し付けにより表面の粗さが大きくなる。表面の粗さが大きいと接触面積は小さくなり入熱量が増加する。ピッチが短くなるとこの処理後の表面に干渉する面積が増加するため、相対的に入熱量が増え溶融に至ったと考えられる。また電極も、粗い表面に押し付けられたことにより、接触表面が微小に変形し、それによって加熱中心がずれたのだと考えられる。

次に、硬化領域を重ね合わせた場合、後行処理の硬化領域の周囲の狭い範囲内で硬さの低下が観測されたが、その原因として焼戻しが考えられる。SKD11 の場合、低温焼戻しでは硬さの低下は発生しないが、 $540^{\circ}C$ 以上の高温焼戻しでは空冷により硬さが低下する^{7),9)}。

よって、後行処理の硬化領域の周囲の狭い範囲内でこの高温焼戻しが発生していると考えられる。また、このことから、図 5.6 に示した条件では大きな硬さの低下は一見観測されていないが、非常に狭い範囲で硬さが低下していると考えられる。

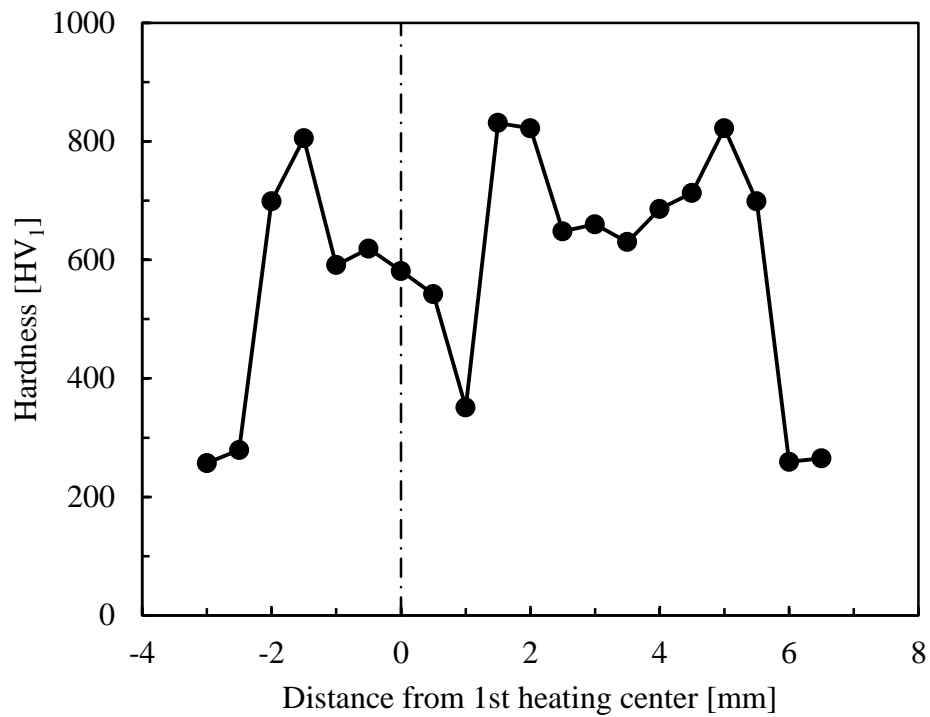


(a) Hardness development in treated surface

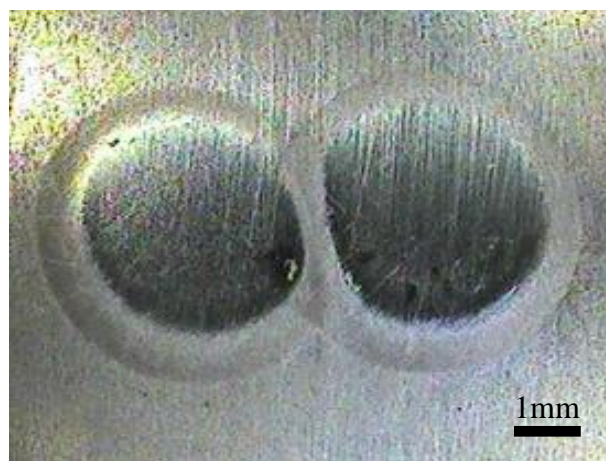


(b) Photograph of treated surface

Fig.5.4 Influence of 2nd treatment on hardness developed by 1st treatment
(Electrifying voltage $E = 6.5V$, 2mm in pitch)

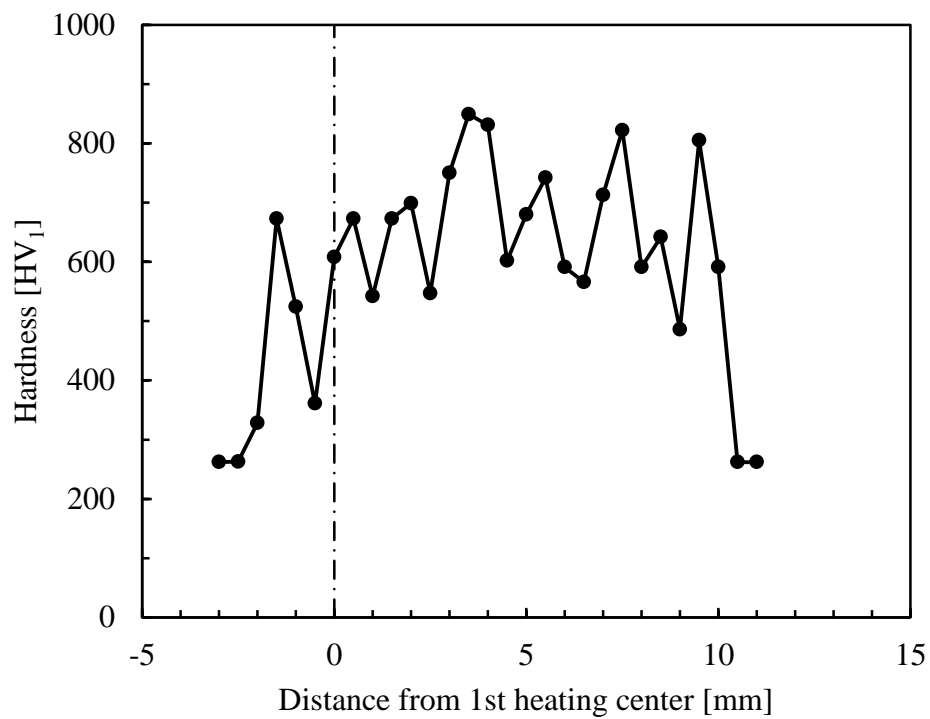


(a) Hardness development in treated surface

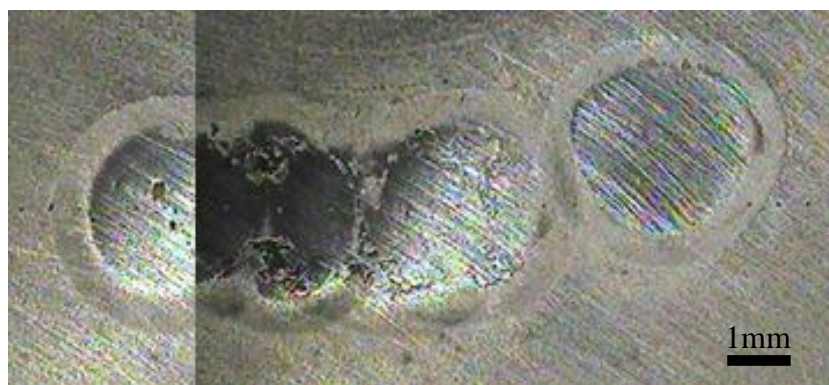


(b) Photograph of treated surface

Fig.5.5 Influence of 2nd treatment on hardness developed by 1st treatment
(Electrifying voltage $E = 6.5V$, 3mm in pitch)



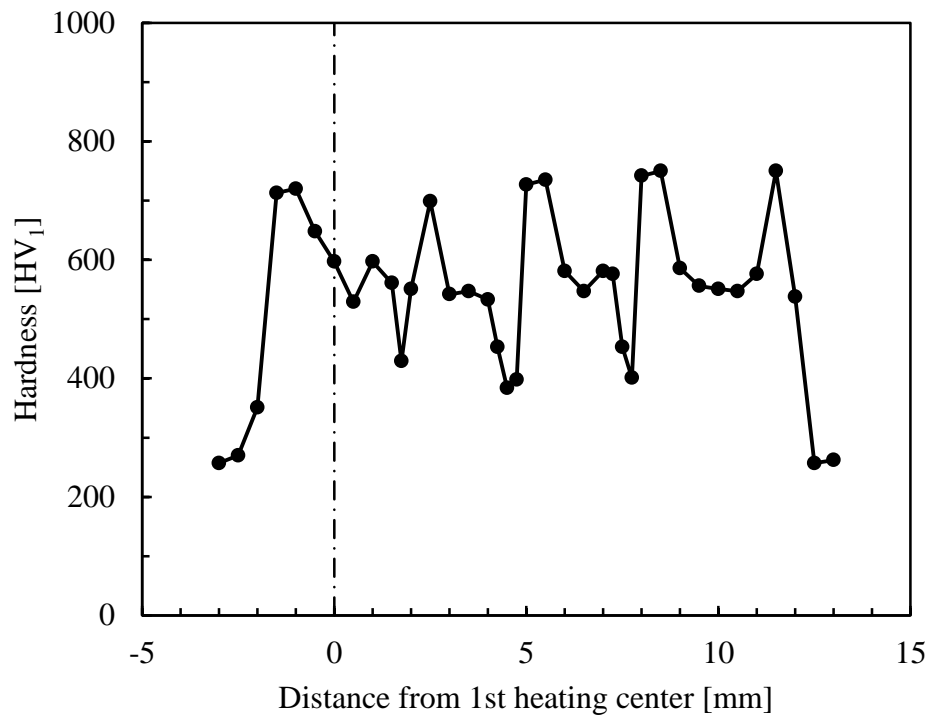
(a) Hardness development in treated surface



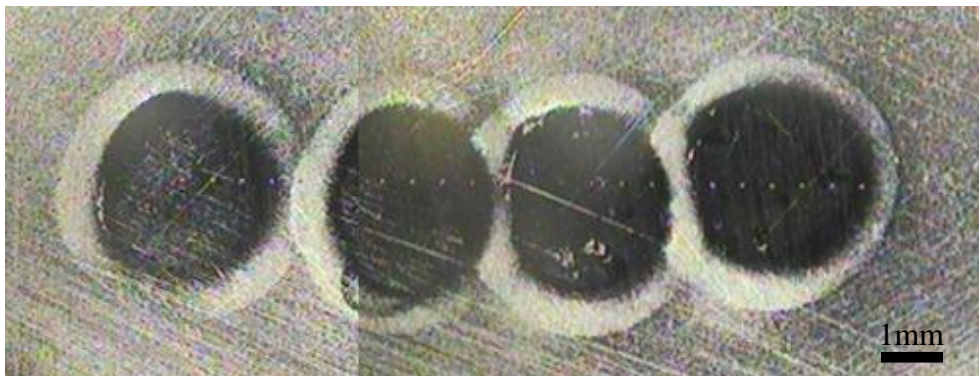
(b) Photograph of treated surface

Fig.5.6 Influence of subsequent treatment on hardness developed by preceding treatment

(Electrifying voltage $E = 6.0V$, 2mm in pitch)



(a) Hardness development in treated surface



(b) Photograph of treated surface

Fig.5.7 Influence of subsequent treatment on hardness developed by preceding treatment

(Electrifying voltage $E = 6.0V$, 3mm in pitch)

5.3 実用化に向けた連続処理法の提案

処理表面の溶融はピッチを広く設定することにより防ぐことができるが、この連続処理における硬さの低下は実用化において無視できない。そこで、局所通電焼入れの連続処理には、硬化領域を重ねる方法ではなく、被処理材表面を加熱し続け、冷却過程を挟まない加熱方法が必要となる。

図 5.8 及び図 5.9 に、被処理材表面を連続して加熱できると考えられる局所通電焼入れの連続処理方法の例を示す。図 5.8 に示す方法は、シーム溶接のように円盤状の電極を転がしながら接触させ、通電する方法である。この方法は一度の処理で広い面積を処理することができ、電極の消耗も少ないと考えられる。しかし、接触面が線状で狭くなるため、スパークが発生する可能性があり、それを防ぐために比較的大きな電極が必要となる。一方、図 5.9 に示す方法は、電極を押しつけた状態で摺動させながら通電する方法である。この方法は複雑な機構を必要とせずに行うことができる。しかし、摺動させるため電極の消耗が早く、接触の状態も不安定となりやすい。そこで、この処理方法の場合、電極としてシャントワイヤの様な導電性を有するワイヤ束の使用も考えられる。今後これらの連続処理方法を検討していく必要がある。

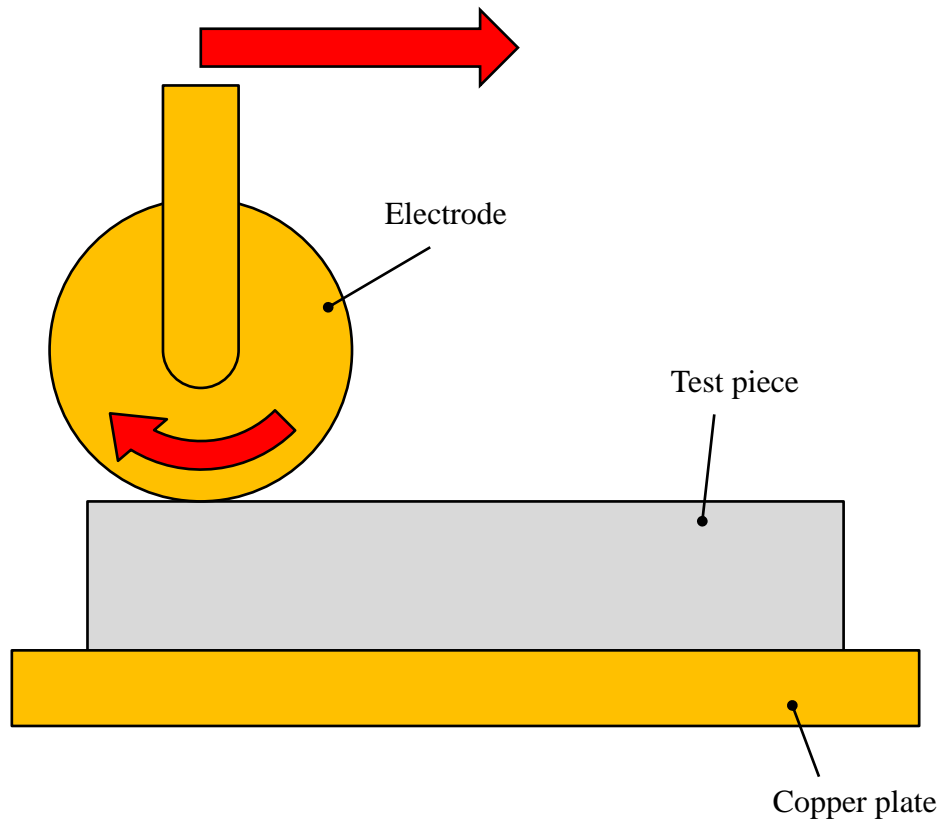


Fig.5.8 Example of the continuous treatment without cooling process on the way
(Resistance heating method by rolling electrode)

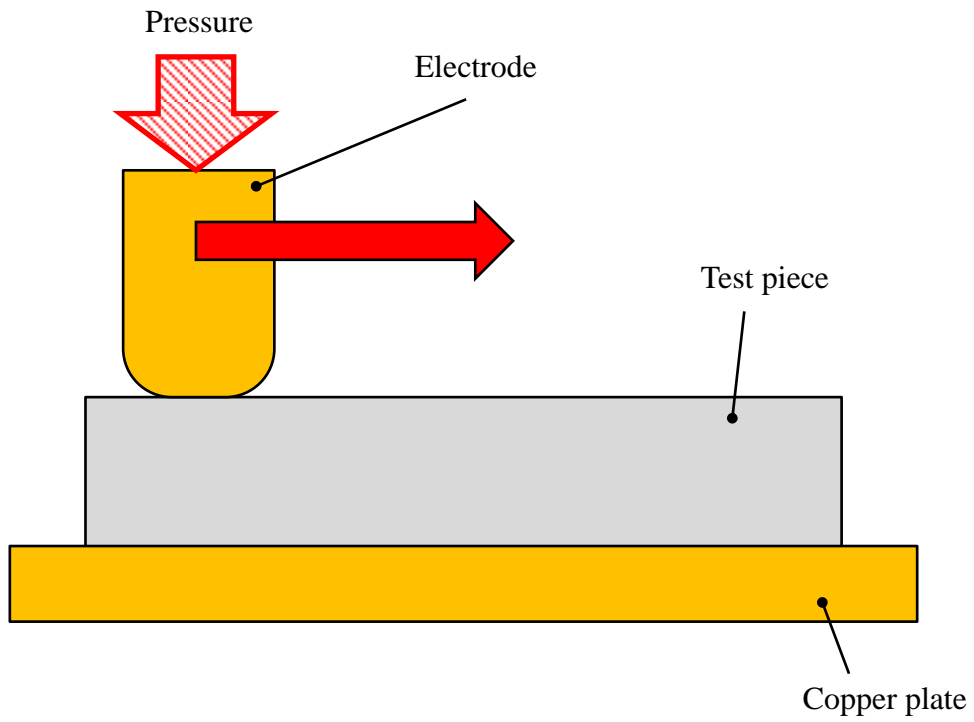


Fig.5.9 Example of the continuous treatment without cooling process on the way
(Resistance heating method by sliding electrode)

第6章 結言

通電加熱を利用した局所焼入れ法の開発を目的に、焼入れ状態に及ぼす処理条件の影響を局所通電焼入れ実験及び数値シミュレーションにより調査した。その結果、以下の知見を得た。

- (1) 電極接触部の焼入れ状態には通電電圧と電極接触圧力が大きく影響し、通電電圧の増加及び電極接触圧力の減少により、電極径内において環状に硬化領域が発達した。
- (2) 一定の通電時間に対して焼入れ状態を公称電流密度と電極接触圧力の2因子で表現すると、均一な焼入れ状態が得られる通電条件の範囲は、処理表面に損傷を生じる入熱過多の領域に隣接した限られた範囲である。その範囲は通電時間の減少により縮小した。
- (3) 均一焼入れ状態において深さ方向の硬さは、通電時間が2sの場合、深さ1.0mm程度まで処理表面より高い値が得られ、それ以降ならかに低下した。また、通電時間の減少により深さ方向の硬さは低下した。
- (4) 局所通電焼入れの単発処理における温度変化の数値シミュレーションは、電極と試験片の接触面積率を仮定することにより実験結果をよく説明した。
- (5) 線状、面状の硬化範囲を得るため、硬化領域を重ね合わせた場合、後行処理の硬化領域の周囲の狭い範囲内で高温焼戻しによる硬さの低下が発生した。

参考文献

- 1) I.R. Pashby, S. Barnes, B.G. Bryden : Surface hardening of steel using a high power diode laser, *Journal of Materials Processing Technology* 139 (2003) pp.585–588
- 2) M.K. Lee, G.H. Kim, K.H. Kim, W.W. Kim : Control of surface hardnesses, hardening depths, and residual stresses of low carbon 12Cr steel by flame hardening, *Surface and Coatings Technology* 184 (2004) pp.239–246
- 3) Seijiro Makia, Minoru Ishiguro, Ken-Ichiro Mori, Hiroyasu Makino : Thermo-mechanical treatment using resistance heating for production of fine grained heat-treatable aluminum alloy sheets, *Journal of Materials Processing Technology* 177 (2006) pp.444–447
- 4) 牧 清二郎, 松田 晋平, 中西 栄徳 : 通電加熱を利用した鋼の部分焼入れ, [No.10-29] 日本機械学会第18回機械材料・材料加工技術講演会(M&P2010)CD-ROM 論文集, (2010), No.305
- 5) S. Aslanlar : The effect of nucleus size on mechanical properties in electrical resistance spot welding of sheets used in automotive industry, *Materials and Design* 27 (2006) pp.125–131
- 6) 箕輪 功, 中村 充伸 : 接触スポット内部の電流密度分布のシミュレーション, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J76-C-II, No.10, (1993), pp.637-642
- 7) F-SKD11 テクニカルデータ, http://www.futaba.co.jp/dbps_data/_material/_localhost/precision/plate/PDF/tech_deta_F-SKD11.pdf
- 8) 総合物性表, http://日本タングステン株式会社.com/goods/midasi/shousai/g_prd2001.htm
- 9) 来次 浩芝, 山田 隆広 : 冷間工具鋼の疲労特性に及ぼす焼戻し温度の影響, 山形県立産業技術短期大学校紀, Vol. 4, (2008), pp.3-6

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川上 博士准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。

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。

付録 ー 単発処理の数値シミュレーションに用いた C 言語プログラム

```
#include <stdio.h>
#include <conio.h>
#include <math.h>

double dx0,dy0,dx[1501],dy[1501],dr[1501],dh[1501],rr,hh,dxx[1501],dyy[1501],
      a0,aa,bb,a[1501][1501],b[1501],ak[1501],bk,rinv[1501][4],c[1501][4],
      et[1501],er[1501],ek[1501],ec[1501],ed[1501],
      qc[1501],qt[1501],pai,tsam,tmax,ste,tt,rt,e0,b0,cr,t,aet[201],at[201],ai,
      skt[14],skc[14];

int main(void)
{
    int i,j,k,n,n2,s,z,zz,in,jn,ne,wt,re,he,as,nel[1501][4],neln[1501],nn,xxx;
    char file[256];
    FILE *fp;
    pai=3.141593;           //円周率
    in=51;                  //縦方向の節点数
    jn=31;                  //横方向の節点数
    ne=(in-1)*(jn-1);      //要素数
    rt=25;                  //室温 [°C]
    dx0=0.25;              //基準横幅 [mm]
    dy0=0.25;              //基準縦幅 [mm]
    tt=2;                   //通電時間 [s]
    ste=40000;             //ステップ数
    re=10;                  //電極径の要素数
    he=20;                  //電極高さの要素数
    printf("設定電圧[V]¥nE0 = ");
    scanf("%lf",&e0);      //設定電圧 [V]
    printf("¥n");
    b0=1;                   //基準電流 [A/mm^2]
```

```

printf("接触要素数[-]¥nCR = ");
scanf("%lf",&cr); //接触要素数 [-]
printf("¥n");
printf("キーを押してスタート¥n");
getch();

/*要素寸法の定義*/
k=0;
hh=0;
for(i=1;i<=in-1;i++){
    rr=0;
    for(j=1;j<=jn-1;j++){
        k++;
        dx[k]=dx0;
        dy[k]=dy0;
        if(j>20){ dx[k]=dx0*pow(2,0.33*(j-20));}
        if(i<11){ dy[k]=dy0*pow(2,0.31*(11-i));}
        if(i>40&& i<50){ dy[k]=dy0*pow(2,0.45*(i-40));}
        if(i==50){ dy[k]=dy0*4;}
        rr=rr+dx[k];
        dr[k]=rr;
        dh[k]=hh-dy[k];
    }
    hh=hh-dy[k];
}
for(i=1;i<=ne;i++){
    dxx[i]=dr[i]-dx[i]/2;
    dyy[i]=dh[i]+dy[i]/2;
}

/*接する要素の定義*/
k=0;
for(i=1;i<=in-1;i++){
    for(j=1;j<=jn-1;j++){
        k++;
        if(i==1&&j==1){

```

```

        neln[k]=1;
        nel[k][0]=k+(jn-1);
        nel[k][1]=k+1;
    }
else if(i==1&&j==jn-1){
    neln[k]=1;
    nel[k][0]=k-1;
    nel[k][1]=k+(jn-1);
}
else if(i==in-1&&j==1){
    neln[k]=1;
    nel[k][0]=k-(jn-1);
    nel[k][1]=k+1;
}
else if(i==in-1&&j==jn-1){
    neln[k]=1;
    nel[k][0]=k-(jn-1);
    nel[k][1]=k-1;
}
else if(i==1){
    neln[k]=2;
    nel[k][0]=k-1;
    nel[k][1]=k+(jn-1);
    nel[k][2]=k+1;
}
else if(i==in-1){
    neln[k]=2;
    nel[k][0]=k-(jn-1);
    nel[k][1]=k-1;
    nel[k][2]=k+1;
}
else if(j==1){
    neln[k]=2;
    nel[k][0]=k-(jn-1);
    nel[k][1]=k+(jn-1);
    nel[k][2]=k+1;
}

```

```

    }
    else if(j==jn-1){
        neln[k]=2;
        nel[k][0]=k-(jn-1);
        nel[k][1]=k-1;
        nel[k][2]=k+(jn-1);
    }
    else{
        neln[k]=3;
        nel[k][0]=k-(jn-1);
        nel[k][1]=k-1;
        nel[k][2]=k+(jn-1);
        nel[k][3]=k+1;
    }
}
}

```

/*初期温度の設定*/

```

for(k=1;k<=ne;k++){
    et[k]=rt;
}

```

/*試料(SKD11)の比熱*/

```

skt[1]=100;   skc[1]=0.49675;
skt[2]=200;   skc[2]=0.53284;
skt[3]=300;   skc[3]=0.574761;
skt[4]=400;   skc[4]=0.607811;
skt[5]=500;   skc[5]=0.66216;
skt[6]=600;   skc[6]=0.753208;
skt[7]=700;   skc[7]=0.926816;
skt[8]=742;   skc[8]=1.08948;
skt[9]=800;   skc[9]=0.800264;
skt[10]=850;  skc[10]=0.870254;
skt[11]=871;  skc[11]=1.166743;
skt[12]=900;  skc[12]=0.713922;
skt[13]=1000; skc[13]=0.716889;

```

```

/////*通電加熱計算*////
z=1;
zz=1;
as=1;
wt=0;
xxx=0;
for(i=1;i<=200;i++){
    at[i]=0;
    aet[i]=0;
}
for(s=1;s<=ste;s++){
    t=s*(tt/ste);
    printf("step %d (%f sec)¥n",s,t);
    wt++;
    xxx++;

    /*物性値の定義*/
    k=0;
    for(i=1;i<=in-1;i++){
        for(j=1;j<=jn-1;j++){
            k++;
            /*試料(SKD11)の物性値*/
            if(i>he&& i!=in-1){
                if(et[k]<=770){
                    er[k]=(40.8+0.0753*et[k]+0.0000317*et[k]*et[k])*0.00001;    //電気抵抗率 [Ω*mm]
                }
                else{
                    er[k]=(97.3+0.0266*et[k])*0.00001;
                    //電気抵抗率 [Ω*mm]
                }
                ek[k]=0.029-0.0000114*et[k];
                //熱伝導率 [W/(mm*K)]
            }
            for(n=1;n<=11;n++){
                if(et[k]<=skt[n+1]){

```



```

ec[k]=(skc[n+1]-skc[n])*(et[k]-skt[n])/(skt[n+1]-skt[n])+skc[n];      //比熱 [J/(g*K)]
                                break;
                                }
                                if(et[k]>skt[12]){

ec[k]=(skc[13]-skc[12])*(et[k]-skt[12])/(skt[13]-skt[12])+skc[12];  //比熱 [J/(g*K)]
                                break;
                                }
                                }
                                ed[k]=7.70*0.001;      //密度 [g/mm^3]
                                }
                                /*銅電極(C30A2)の物性値*/
                                else if(j<=re||(i<=5&&j<=2*re)||i==1&&j<=25)||i==in-1){
                                er[k]=3.6*0.00001;    //電気抵抗率 [Ω*mm]
                                ek[k]=260*0.001;      //熱伝導率 [W/(mm*K)]
                                ec[k]=221*0.001;      //比熱 [J/(g*K)]
                                ed[k]=14.2*0.001;     //密度 [g/mm^3]
                                if(i==1||i==in-1){ed[k]=ed[k]*50;}
                                }
                                /*絶縁断熱体の物性値*/
                                else{
                                er[k]=100000000;    //電気抵抗率 [Ω*mm]
                                ek[k]=0.00000001;    //熱伝導率 [W/(mm*K)]
                                ec[k]=1;              //比熱 [J/(g*K)]
                                ed[k]=1;              //密度 [g/mm^3]
                                }
                                }
                                }

/*要素間の電気抵抗率*/
for(i=1;i<=ne;i++){
    for(j=1;j<=ne;j++){
        a[i][j]=0;
    }
}

for(i=1;i<=ne;i++){

```

```

        for(j=0;j<=neln[i];j++){
            n=nel[i][j];
            if(n-i==1){

rinv[i][j]=dy[i]*2*pai*dr[i]/(0.5*dx[i]*er[i]+0.5*dx[n]*er[n]);
                }
                else if(n-i==-1){

rinv[i][j]=dy[i]*2*pai*(dr[i]-dx[i])/((0.5*dx[i]*er[i]+0.5*dx[n]*er[n]));
                }
                else{

rinv[i][j]=pai*(dr[i]*dr[i]-(dr[i]-dx[i])*(dr[i]-dx[i]))/(0.5*dy[i]*er[i]+0.5*dy[n]*er[n]);
                }

if((i>(jn-1)*(he-1)+cr&& i<=(jn-1)*(he-1)+re)&&(n>(jn-1)*he+cr&&n<=(jn-1)*he+re)){
                rinv[i][j]=0;
            }

if((i>(jn-1)*he+cr&& i<=(jn-1)*he+re)&&(n>(jn-1)*(he-1)+cr&&n<=(jn-1)*(he-1)+re)){
                rinv[i][j]=0;
            }
            a[i][n]=a[i][n]+rinv[i][j];
            a[i][i]=a[i][i]-rinv[i][j];
        }
    }

    /*基準電流の計算*/
    for(i=1;i<=ne;i++){
        b[i]=0;
    }
    for(n=1;n<=25;n++){
        b[n]=b0*pai*(dr[n]*dr[n]-(dr[n]-dx[n])*(dr[n]-dx[n]));
        n2=ne-(jn-1)+n;
        b[n2]=-b0*pai*(dr[n2]*dr[n2]-(dr[n2]-dx[n2])*(dr[n2]-dx[n2]));
    }

```

/*ガウスの消去法による各要素の電位計算*/

```
for(k=1;k<=ne;k++){
    a0=a[k][k];
    if(a0==0&&k==ne){
        if(b[k]<0.000001&&b[k]>-0.000001){
            break;
        }
        printf("%n!!! error1 !!!%n");
        getch();
    }
    for(i=1;i<=ne-1;i++){
        if(a0!=0){
            break;
        }
        for(j=k;j<=ne;j++){
            ak[j]=a[k][j];
        }
        bk=b[k];
        for(j=k;j<=ne;j++){
            a[k][j]=a[k+i][j];
        }
        b[k]=b[k+i];
        for(j=k;j<=ne;j++){
            a[k+i][j]=ak[j];
        }
        b[k+i]=bk;
        a0=a[k][k];
    }
    if(a0==0){
        printf("%n!!! error2 !!!%n");
        getch();
    }
    for(j=k;j<=ne;j++){
        a[k][j]=a[k][j]/a0;
    }
}
```

```

    b[k]=b[k]/a0;
    for(i=1;i<=ne;i++){
        if(i!=k&& a[i][k]!=0){
            a0=a[i][k];
            for(j=k;j<=ne;j++){
                a[i][j]=a[i][j]-a0*a[k][j];
            }
            b[i]=b[i]-a0*b[k];
        }
    }
}
bb=b[ne-jn+2];
for(i=1;i<=ne;i++){
    b[i]=b[i]-bb;
}

/*設定電圧負荷時の電流値への変換*/
for(i=1;i<=ne;i++){
    for(j=0;j<=neln[i];j++){
        n=nel[i][j];
        c[i][j]=(b[n]-b[i])*rinv[i][j];
    }
}
aa=e0/(0.0025+abs(b[1])/(b0*pai*dr[25]*dr[25]))/(b0*pai*dr[25]*dr[25]);
//内部インピーダンス 0.0025[Ω]
ai=aa*b0*(b0*pai*dr[25]*dr[25]);
printf("%f[A]¥n",ai);
for(i=1;i<=ne;i++){
    for(j=0;j<=neln[i];j++){
        c[i][j]=c[i][j]*aa;
    }
}

/*通電により発生するエネルギー*/
for(i=1;i<=ne;i++){
    qc[i]=0;
}

```

```

        for(j=0;j<=neln[i];j++){
            n=nel[i][j];
            if(n-i==1){

q=c[i][j]*c[i][j]*er[i]*0.5*dx[i]/(dy[i]*2*pai*dr[i])*(tt/ste);
            }
            else if(n-i==1){

q=c[i][j]*c[i][j]*er[i]*0.5*dx[i]/(dy[i]*2*pai*(dr[i]-dx[i]))*(tt/ste);
            }
            else{

q=c[i][j]*c[i][j]*er[i]*0.5*dy[i]/(pai*(dr[i]*dr[i]-(dr[i]-dx[i])*(dr[i]-dx[i])))*(tt/ste);
            }

if((i>(jn-1)*(he-1)+cr&& i<=(jn-1)*(he-1)+re)&&(n>(jn-1)*he+cr&&n<=(jn-1)*he+re)){
            q=0;
        }

if((i>(jn-1)*he+cr&& i<=(jn-1)*he+re)&&(n>(jn-1)*(he-1)+cr&&n<=(jn-1)*(he-1)+re)){
            q=0;
        }
        qc[i]=qc[i]+q;
    }
}

/*熱伝導により発生するエネルギー*/
for(i=1;i<=ne;i++){
    qt[i]=0;
    for(j=0;j<=neln[i];j++){
        n=nel[i][j];
        if(n-i==1){

q=dy[i]*2*pai*dr[i]/(0.5*dx[i]/ek[i]+0.5*dx[n]/ek[n])*(et[n]-et[i])*(tt/ste);
        }
        else if(n-i==1){

```

```

q=dy[i]*2*pai*(dr[i]-dx[i])/(0.5*dx[i]/ek[i]+0.5*dx[n]/ek[n])*(et[n]-et[i])*(tt/ste);
    }
    else{

q=pai*(dr[i]*dr[i]-(dr[i]-dx[i])*(dr[i]-dx[i]))/(0.5*dy[i]/ek[i]+0.5*dy[n]/ek[n])*(et[n]-et[i])*(tt/ste);
    }

if((i>(jn-1)*(he-1)+cr&& i<=(jn-1)*(he-1)+re)&&(n>(jn-1)*he+cr&&n<=(jn-1)*he+re)){
    q=0;
}

if((i>(jn-1)*he+cr&&i<=(jn-1)*he+re)&&(n>(jn-1)*(he-1)+cr&&n<=(jn-1)*(he-1)+re)){
    q=0;
}
qt[i]=qt[i]+q;
}
}

/*各要素の温度*/
for(n=1;n<=ne;n++){

et[n]=et[n]+(qc[n]+qt[n])/(pai*(dr[n]*dr[n]-(dr[n]-dx[n])*(dr[n]-dx[n]))*dy[n]*ed[n]*ec[n]);
}
tsam=et[he*(jn-1)+1];
tmax=0;
nn=0;
for(n=1;n<=ne;n++){
    if(et[n]>tmax){
        tmax=et[n];
        nn=n;
    }
}
printf("Tsample = %f\n",tsam); //電極直下の中心となる要素の温度 [°C]
printf("Tmax = %f , n = %d\n",tmax,nn); //要素の最大温度 [°C]

```

```

/*1000°Cに達した際の温度分布*/
if(tmax>=1000&&z==1){
    sprintf(file, "./%fsec.csv",t);
    fp=fopen(file,"w");
    for(i=1;i<=ne;i++){
        fprintf(fp,"%d,%f,%f,%f\n",i,dxx[i],dyy[i],et[i]);
    }
    fclose(fp);
    z=0;
}

```

```

/*中心要素が 1000°Cに達した際の温度分布*/
if(tsam>=1000&&zz==1){
    sprintf(file, "./%fsec.csv",t);
    fp=fopen(file,"w");
    for(i=1;i<=ne;i++){
        fprintf(fp,"%d,%f,%f,%f\n",i,dxx[i],dyy[i],et[i]);
    }
    fclose(fp);
    zz=0;
}

```

```

/*1500°Cに達した際の温度分布*/
if(tmax>=1500){
    printf("over heating\n");
    sprintf(file, "./%fsec.csv",t);
    fp=fopen(file,"w");
    for(i=1;i<=ne;i++){
        fprintf(fp,"%d,%f,%f,%f\n",i,dxx[i],dyy[i],et[i]);
    }
    fclose(fp);
    break;
}

```

```

/*0.1sec ごとの温度分布*/
if(xxx==2000){

```

```

        sprintf(file, "./%fsec.csv",t);
        fp=fopen(file,"w");
        for(i=1;i<=ne;i++){
            fprintf(fp,"%d,%f,%f,%f\n",i,dxx[i],dyy[i],et[i]);
        }
        fclose(fp);
        xxx=0;
    }
    if(wt==200){
        aet[as]=tsam;
        at[as]=t;
        as++;
        wt=0;
    }
}

/*電極直下の中心となる要素の温度変化*/
sprintf(file, "%.1fs%.1fV.csv",tt,e0);
fp=fopen(file,"w");
fprintf(fp,"TT[sec],E0[V]\n%f,%f,%f\n",tt,e0,cr);
for(i=1;i<=200;i++){
    fprintf(fp,"%f,%f\n",at[i],aet[i]);
}
fclose(fp);

printf("TT = %f [sec]\nE0 = %f [V]\n\nfinish\n",tt,e0);

return(0);
}

```