

修士論文

急速通電加熱を利用した鋼のエッジ焼入れに関する研究

指導教員 牧 清二郎 教授

平成 26 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

大野 正稀

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 実験装置	3
	2.3 焼入れ状態の評価	7
第3章	実験結果及び考察	9
	3.1 通電条件と焼入れ状態の関係	9
	3.1.1 通電電圧の影響	9
	3.1.2 電極接触圧力の影響	12
	3.1.3 通電条件の焼入れ状態への影響	15
	3.2 電極径と焼入れ状態の関係	18
	3.2.1 実験結果	18
	3.2.3 電極径による比較	21
第4章	温度分布と硬化の関係	22
	4.1 サーモグラフィによる温度分布の測定	22
	4.1.1 測定方法	22
	4.1.2 放射率の補正	23
	4.1.3 測定結果	25
	4.2 温度分布のシミュレーション	29
	4.2.1 計算理論・計算モデル	29
	4.2.2 計算条件	31
	4.2.3 計算結果及び考察	38
第5章	結言	42
	参考文献	
	謝辞	
	付録 ー 数値シミュレーションに用いた FORTRAN77 プログラム	

第1章 緒言

鋼の焼入れ処理とは、被処理材をオーステナイト化温度域まで加熱し、急冷することで組織をマルテンサイト変態させ、硬さの向上を図る熱処理である。一般には、対象とする鋼材全体を加熱、冷却して硬化を得る。しかし、金型のように一部にのみ負荷が加わる被処理材であれば、全体を硬化させる必要はない。そこで、負荷の加わる部分についてのみ焼入れ処理を行うことで、全体の靱性を維持しつつ必要な硬さを得ることができる。このような焼入れ法を局所焼入れと言う。

現在、局所焼入れ法として火炎焼入れやレーザー焼入れが広く用いられている。しかし、火炎焼入れは設備が安価だが、焼入れの成否を左右する鋼の加熱温度の見分けが難しく、熟練した技術が必要となる。一方で、レーザー焼入れは火炎焼入れと比べると、比較的容易に鋼材表面に焼入れ処理を行うことができる。しかし、設備の導入に多大な経費が必要であり、中小の企業では容易に導入できるものではない。

ところで、金属の加熱方法の一つとして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通電し、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、条件によっては急速な加熱も可能である。通電加熱に必要なとされる交流電源は安価な設備であり、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、急速な通電加熱を局所焼入れに適応したところ、被処理材の表面の電極接触部のみをオーステナイト化温度まで加熱し、局所的に焼入れ硬化を得ることに成功した^{1),2)}。

本研究では、これまでの鋼材平面への焼入れの応用として、ダイス鋼 SKD11 のエッジに本手法を適応し、基本的特性について調査した。また、通電加熱処理中の鋼材の温度分布をサーモグラフィにより測定し、処理により得られた硬さや数値シミュレーションとの比較を行った。

第2章 実験方法

2.1 実験材料

被処理剤には、オーステナイト化温度からの空冷により焼入れ硬化を得ることが可能³⁾なダイス鋼SKD11の丸棒(φ32)を用いた。これを長さ20mmに切断し切断面をラップ盤で研磨した後、バフ仕上げを施した。これを半月状に切断し、弦に相当する直線のエッジに局所焼入れを行った。図2.1に実験に用いた試験片を示す。

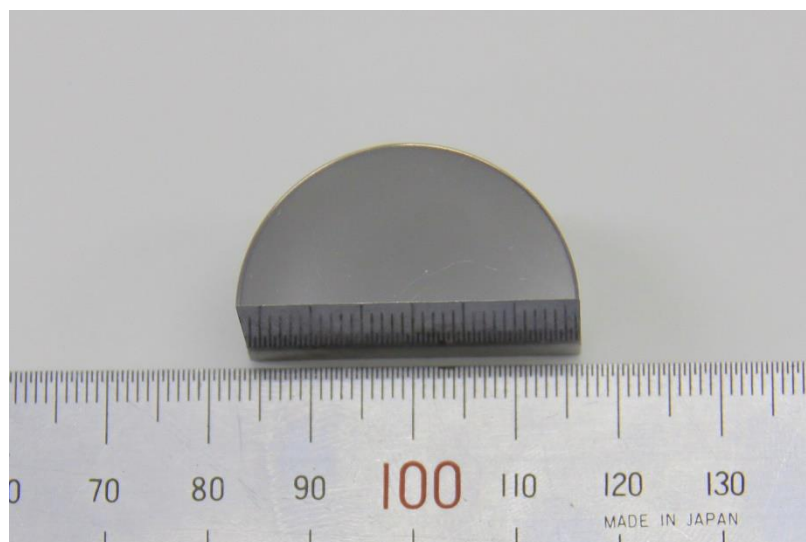


Fig. 2.1 Test piece

2.2 実験装置

図 2.2 に本実験に用いた局所焼入れ装置，図 2.3 にその概略図を示す．通電加熱に用いる電極には耐久性などを考慮し，スポット溶接や電気接点として用いられる銅タングステン（C30A2，日本タングステン株）を採用した．図 2.4 に電極の形状を示す．電極先端の試験片との接触面は半円形状である．なお，この面は実験ごとに#2000 のエメリー紙で研磨し，使用した．

装置構造から絶縁された 2 枚の銅板の上側に電極を，下側に試験片を固定した後，エアシリンダによって電極を試験片表面に押し付ける．このとき図 2.5 に示すように，電極先端面の直線箇所が試験片エッジに一致するように設置した．その状態で銅板間に通電を行うことで試験片の電極接触部を加熱した．エアシリンダによる押し付け力はコンプレッサの空気圧によって調整される．そこで，一定の空気圧を与えた際の押し付け力をロードセルにより測定し，キャリブレーションを行った．その結果から得られたコンプレッサの空気圧 P と押し付け力 F の関係を図 2.6 に示す．電極接触圧力 p_c については，このグラフから算出された F を電極接触部の公称面積で除した値を用いた．

通電加熱用の電源には出力(無負荷)を 0~10V の範囲で任意に変化できる常用定格 10kA 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 に示した電極と試験片がそれぞれ固定される銅板間での負荷に対して約 $1.4\text{m}\Omega$ である．通電加熱中の電流量は，温度変化に対して電気抵抗率の変動が比較的小さい SUS304 の丸棒（ $\phi 25 \cdot$ 端子間距離 100mm）を標準抵抗として，実験時に測定した端子間の電圧から計算した．図 2.7 に本実験に使用した装置中の基準抵抗を示す．

通電加熱後の試験片の冷却方法として，電極を接触させた状態で保持するものと，通電終了直後に電極を離すものの 2 種類が考えられる．本実験では前者を採用し，通電終了から 5s 以上電極を試験片に押し付けた状態で保持，冷却を行った．

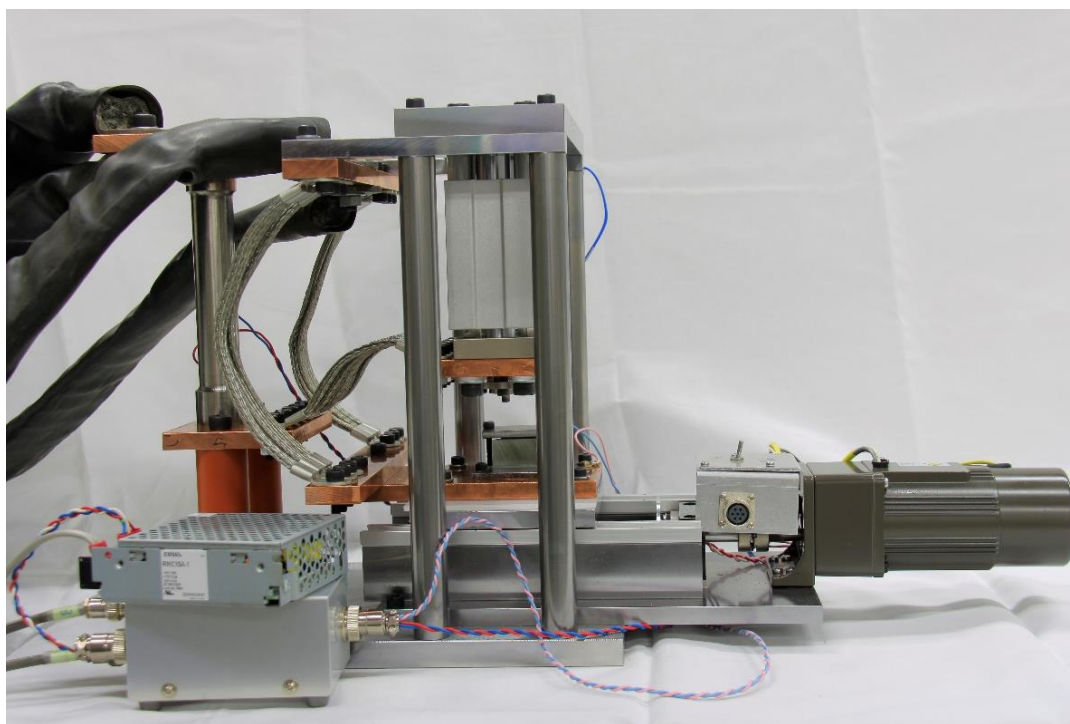


Fig. 2.2 Setup of local hardening using resistance heating

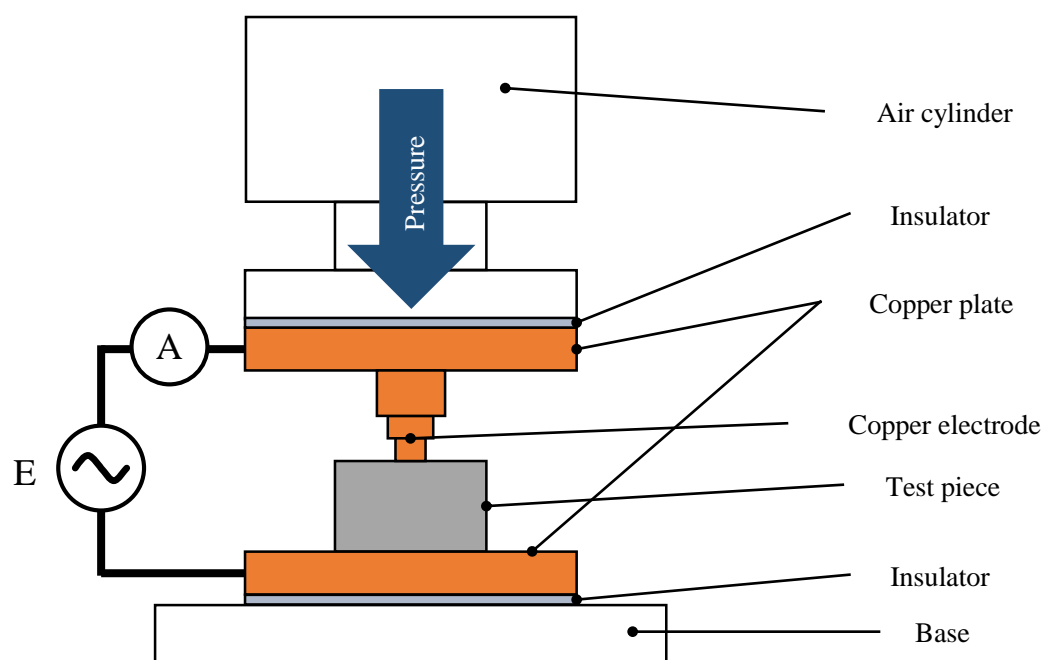


Fig. 2.3 Illustration of setup of local hardening using resistance heating

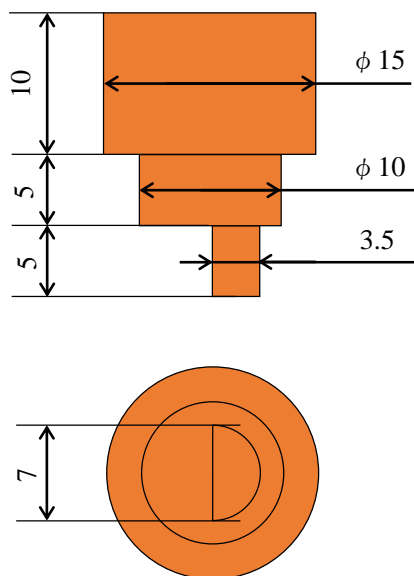


Fig. 2.4 Shape and size of electrode

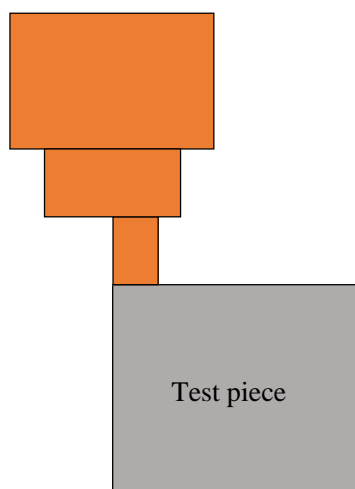


Fig. 2.5 Illustration of setting of electrode and edge of test piece

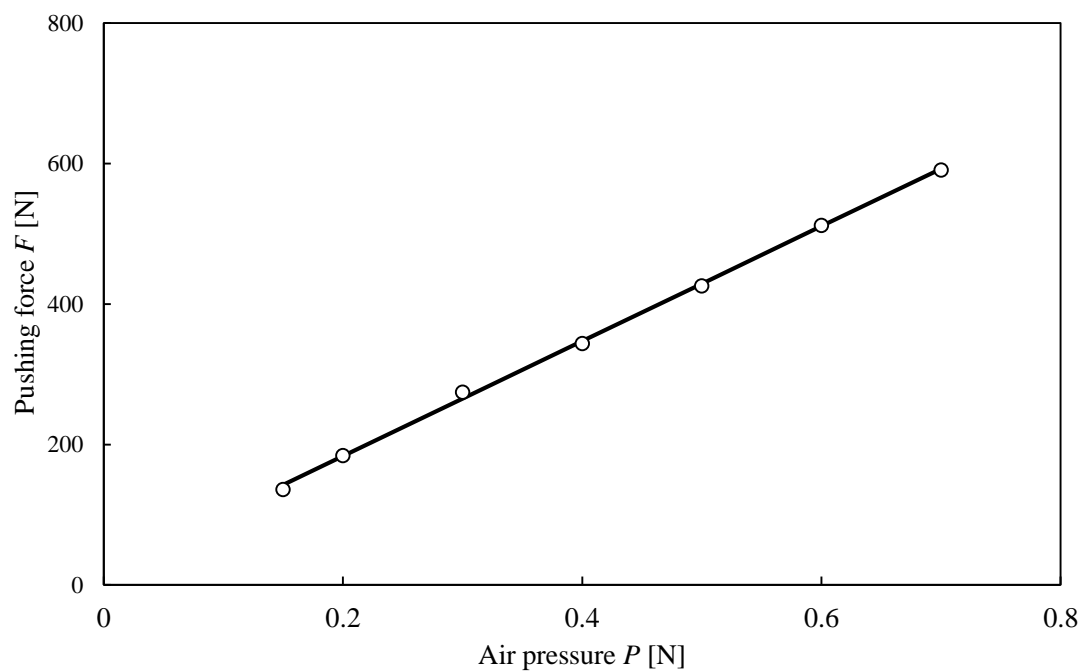


Fig. 2.6 Relationship between pressure and pushing force

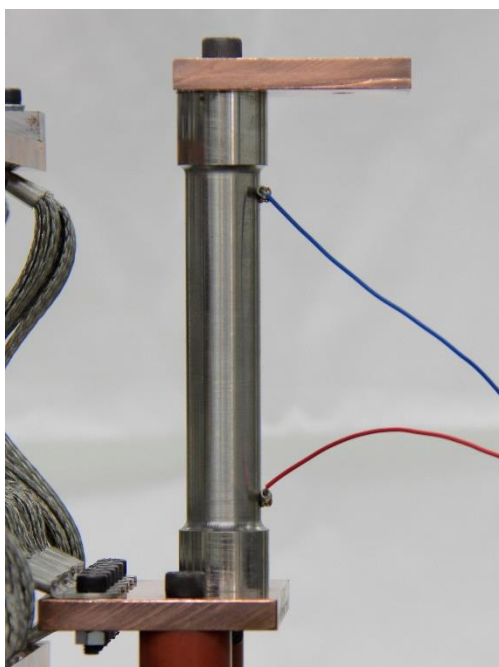


Fig. 2.7 Standard resistance for measuring current

2.3 焼入れ状態の評価

図 2.8 に、本実験で通電加熱処理を施した試験片の電極接触部表面とその側面の一例を示す。試験片表面には電極先端形状の痕跡が見られる。また、試験片の電極接触部の周囲や電極接触部直下には大気酸化による変色が見られる。

通電加熱による焼入れ状態の評価のために、通電加熱冷却後に処理面にビッカース硬さ試験を行った。硬さ試験は、試験片表面を#2000のエメリー紙で軽く研磨した後、試験条件を試験荷重 1kgf, 加圧時間 10s として測定した。測定位置は図 2.9 に示すように試験片表面のエッジから 0.2mm 離れた位置で、加熱中心を基準にエッジに沿って 0.5mm 間隔で測定し、硬さ分布を得た。今回の実験では HV₁600 を焼入れの基準とし、それを越えたものを焼きが入ったものとした。さらに電極径の 50%以上の距離で焼きが入った場合に均一な焼入れが得られたものとみなした。

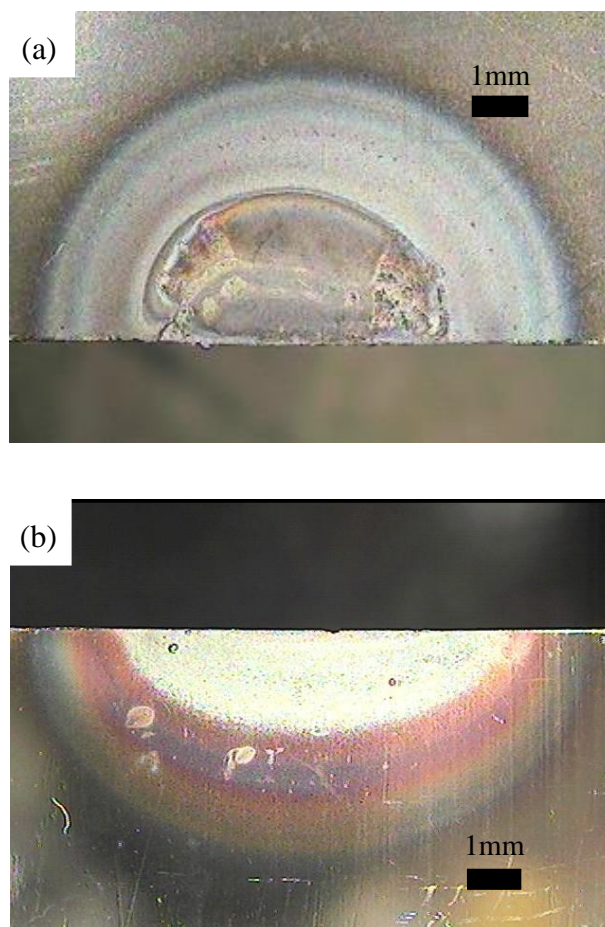


Fig. 2.8 Example of (a) treated surface and (b) side surface

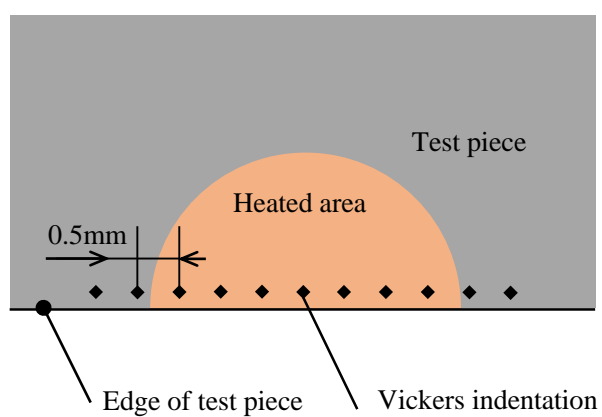


Fig. 2.9 Measurement positions of Vickers hardness

第3章 実験結果及び考察

3.1 通電条件と焼入れ状態の関係

まず、電極先端径が7mmの場合について、通電条件の変化による焼入れ状態の変化を調査し、本手法のエッジ焼入れへの適応の可能性を検討する。通電条件として電極接触圧力 p_c を9.5MPa, 18.0MPa, 26.5MPaの3条件設定し、それぞれで通電電圧 E を変化させて実験を行った。通電電圧の変化量は $p_c=9.5\text{MPa}$, 18.0MPaでは0.25Vごと、 $p_c=26.5\text{MPa}$ の条件は以後の実験においても用いるので、より細かく0.2Vごととした。通電時間 t は、以前の平面焼入れの結果を元に1.0sで固定した。

3.1.1 通電電圧の影響

図3.1に、電極接触圧力 $p_c=26.5\text{MPa}$ で、通電電圧 E を変化させた場合の試験片エッジの硬さ分布を示す。図中には代表例として E を0.4Vごとに变化した3条件を示した。なお図中の破線は電極接触面の端部である。図3.2にそのときの試験片表面を示す。通電電圧の弱い $E=5.4\text{V}$ (公称電流密度 143A/mm^2) では僅かに硬さが増加していることがわかるが、焼入れ基準に達していないので、硬化は認められないものと見なした。それより電圧を大きくした $E=5.8\text{V}$ (同 156A/mm^2) では電極接触部の外端で、焼入れ基準を超える硬化が発生していることが認められた。しかし、電極接触部中央では十分な硬さが得られなかった。最後に $E=6.2\text{V}$ (同 176A/mm^2) では電極接触部中央を含めて均一な硬化領域が得られた。さらに、通電電圧を増加させることでより大きい硬さが得られると考えられるが、 $E=6.4\text{V}$ (同 189A/mm^2) での処理は入熱過多により電極先端が損耗し、試験片表面に溶着した。このように、電極または試験片に大きく損傷を与える条件での処理は、実用的な熱処理法とは言い難い。よって、 $E=6.4\text{V}$ の結果は硬化領域が得られるか否かに関わらず不適当な処理条件とした。この結果から通電電圧の増加によって、電極接触面における発熱量が増加し、焼入れ硬化が得られるものと考えられる。

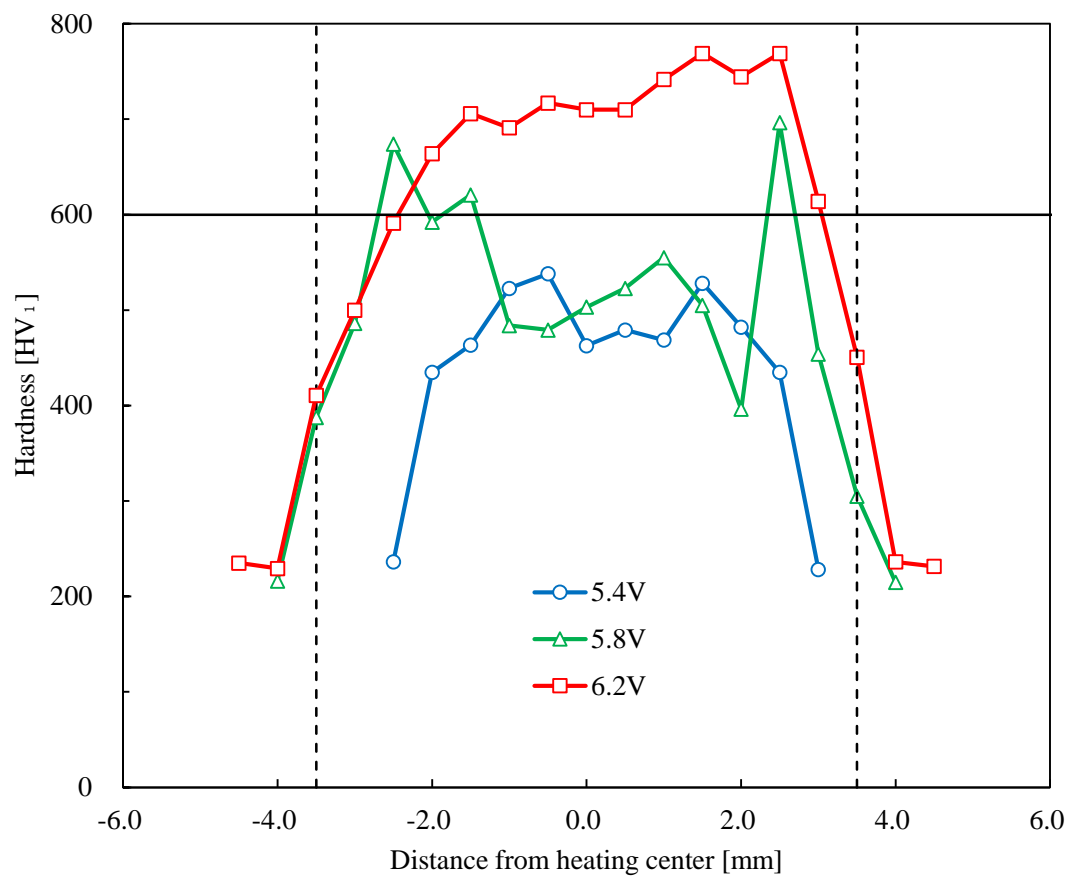


Fig. 3.1 Variation of hardness distribution with electrifying voltage

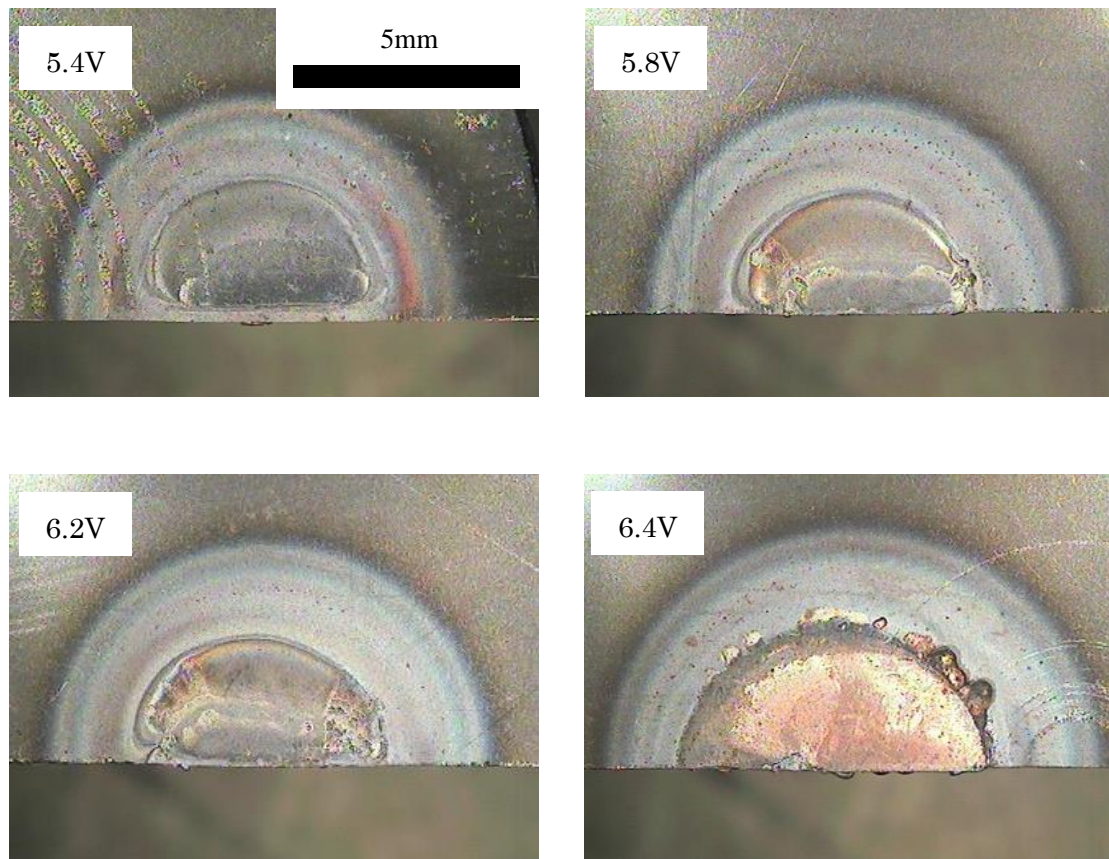


Fig. 3.2 Changes in treated surface with electrifying voltage

3.1.2 電極接触圧力の影響

図 3.3 に、通電電圧 $E=5.75\text{V}$ で、電極接触圧力 p_c を変化させた場合の試験片エッジの硬さ分布を示す。また、図 3.4 にそのときの処理表面の写真を示す。電極接触圧力が大きい $p_c=26.5\text{MPa}$ では硬化は認められたが、均一な硬化領域を得ることはできなかった。接触圧力を減少させ、 $p_c=18.0\text{MPa}$ としたとき均一な硬化状態が得られた。さらに $p_c=9.5\text{MPa}$ に減少させたところ、電極表面に損耗が生じたため不適當な焼入れ状態となった。

この結果から、電極接触圧力が減少することにより電極接触面における発熱量が増加し、焼入れ硬化が得られるものと考えられる。電極先端は試験片表面に対して完全に接するのではなく、一部のみが接触する状態となっている。この実質の接触面積を真実接触面積 A_R と言う。真実接触面積が小さくなるほど接触抵抗が大きくなり、発熱量も増加する。つまり、電極接触圧力の増減は発熱量の減増の一要素であるといえる。

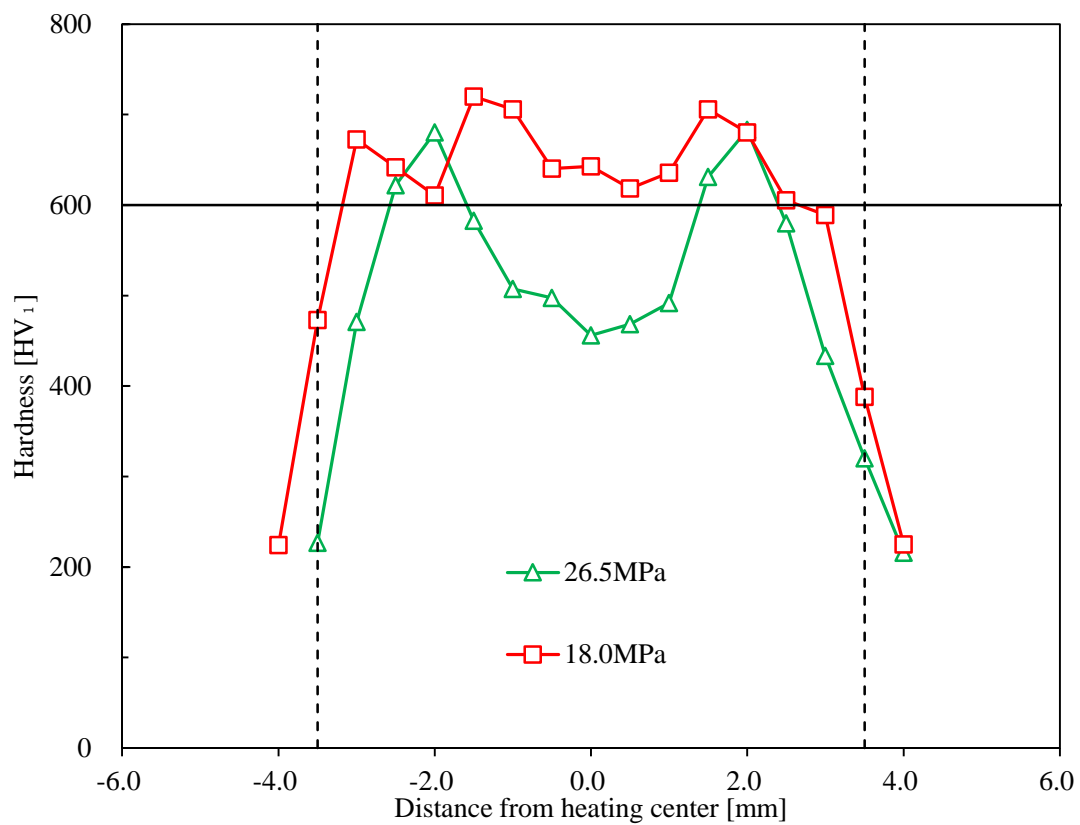


Fig. 3.3 Variation of hardness distribution with contact pressure

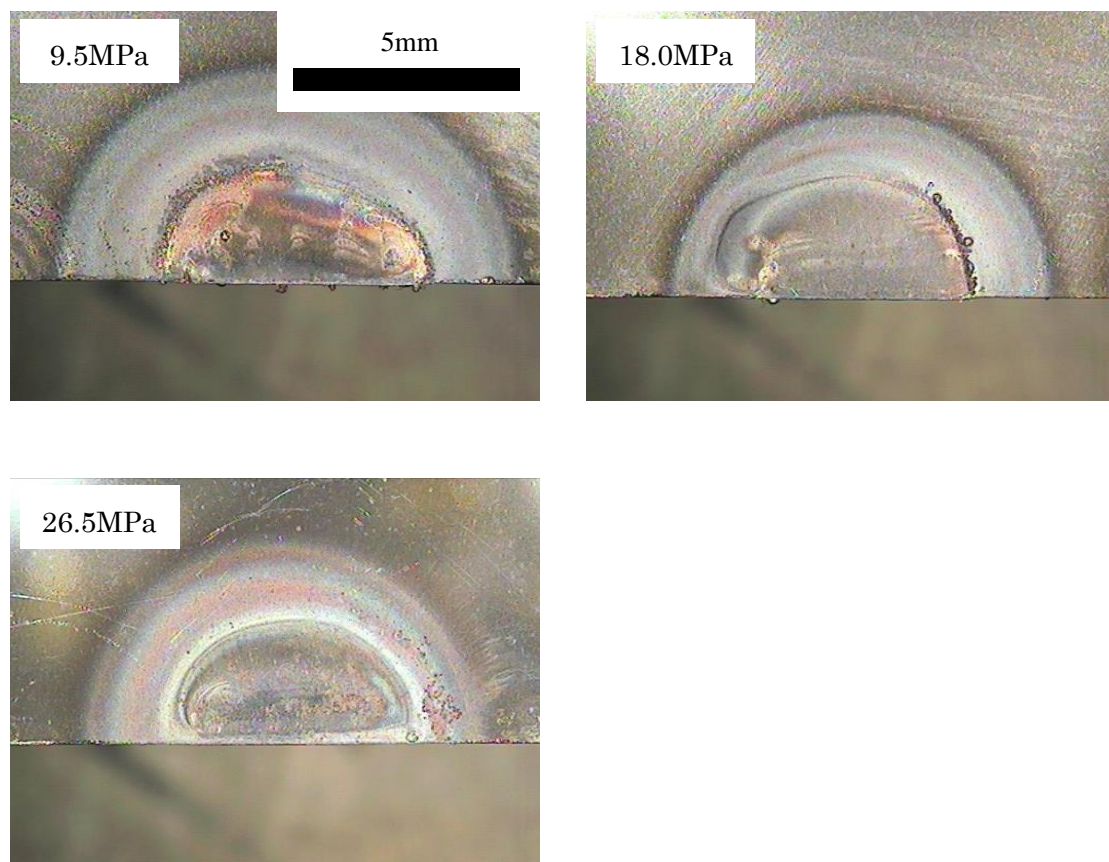


Fig. 3.4 Changes in treated surface with contact pressure

3.1.3 通電条件と焼入れ状態への影響

図 3.5 に、通電加熱による SKD11 のエッジ焼入れの通電条件と焼入れ状態の関係を示す。それぞれ横軸は通電電圧 E ，縦軸は電極接触圧力 p_c である。図中の○印は均一な硬化領域が得られた条件である。また、×印は焼入れ硬化が得られなかった条件、△印は電極接触面外端のみが硬化した条件、*印は電極または試験片に溶融・損耗が起こった不適当な条件である。

この結果から、均一な硬化領域が得られる通電条件は、*印の条件より低電圧または高加圧力の、比較的狭い範囲に存在することがわかる。また、×印の条件と○印の条件の間には△印の条件が存在することがわかる。図 3.6 に電極接触圧力 $p_c=2.65\text{MPa}$ のとき通電電圧を変化させた際の、試験片表面の電極接触部中央のエッジから 0.2mm 離れた位置から、エッジから離れる方向に測定した硬さ分布を示す。硬化は電極接触部外端から発達し、均一な硬化領域が得られる。この発達の様子は同一条件の図 3.1 のそれとよく似ている。つまり、本実験では入熱量の増加に伴い、半円形の電極外端から硬化が始まり、半円形状の均一な硬化領域が得られるものと考えられる。この硬化領域の発達の傾向は、これまでの平面に対して先端形状が円形の電極を用いて熱処理をした際のそれと似ている^{1),2)}。今回のエッジ焼入れ実験では平面焼入れに用いた電極の先端部を軸方向に半割にした形状を有している。従って、側面からの放熱を無視すれば、両者の電気や熱の流れは軸対称になると言える。そのために、似通った傾向を持つ硬さ分布が得られたものと考えられる。

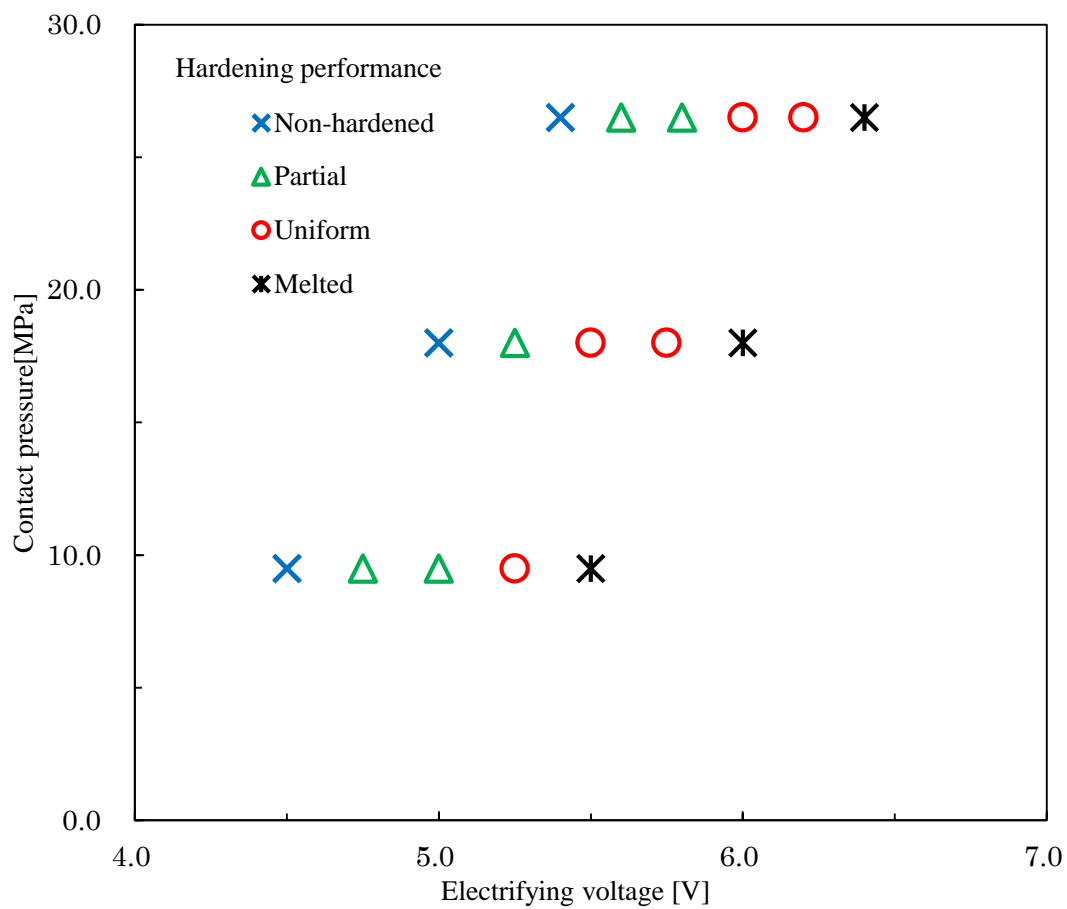


Fig. 3.5 Relationship between electrifying condition and hardening performance

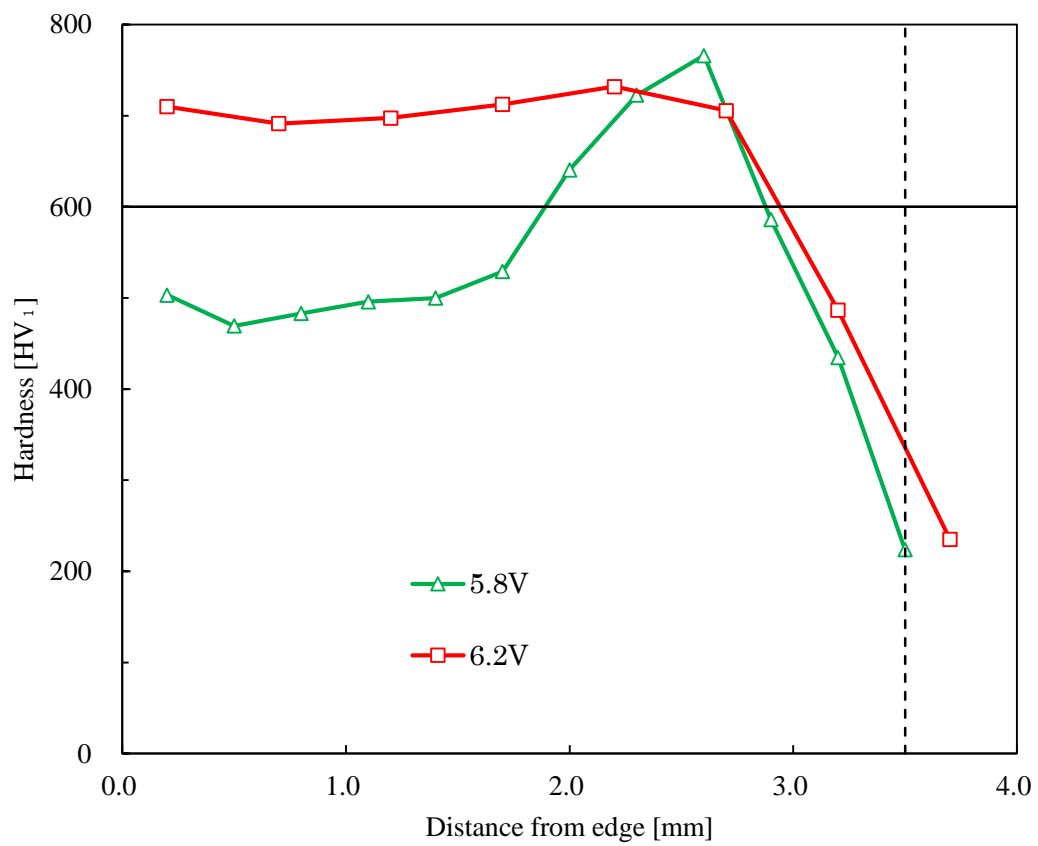


Fig. 3.6 Hardness distribution from edge on surface in contact with electrode

3.2 電極径と焼入れ状態の関係

前節は、先端が直径 7mm の半円形状の電極で得られた実験結果である。本節では、先端径をそれぞれ 3.5mm, 5mm, 10mm に変化し、電極接触面積の変化による影響を調査した。実験条件として電極接触圧力 $p_c=26.5\text{MPa}$ 、通電時間 $t=1.0\text{s}$ を固定し、通電電圧をそれぞれ 0.25V ごとに变化させた。

3.2.1 実験結果

図 3.7～3.9 に、電極先端径をそれぞれ 3.5mm, 5mm, 10mm に変化し、実験した結果を示す。全ての電極径で通電電圧を適切に設定することで均一な硬化領域が得られた。硬化領域の発達傾向は、通電電圧の増加と共に半円環状に成長した後に、均一な硬化領域が得られる。これは前節の先端径 7mm でのそれと同様である。また、電極径 3.5mm では他とは違い、通電電圧 0.25V ごとの変化では半円環状の硬化領域を得られる条件がなかった。それと同時に $E=3.0\text{V}$ の処理では電極と試験片を著しく損傷した。そのため、微小面積に本熱処理法を用いる場合には、適切な通電条件は狭い範囲となり、より細かな条件設定が必要となる。

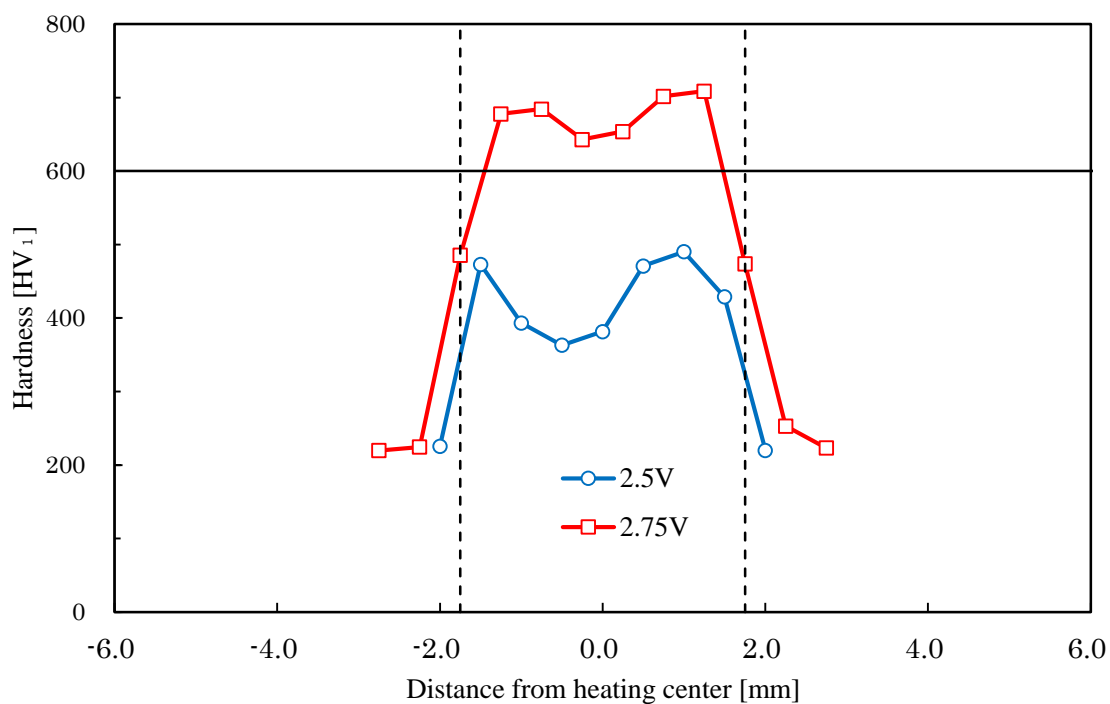


Fig. 3.7 Variation of hardness distribution with electrifying voltage for 3.5mm of electrode diameter

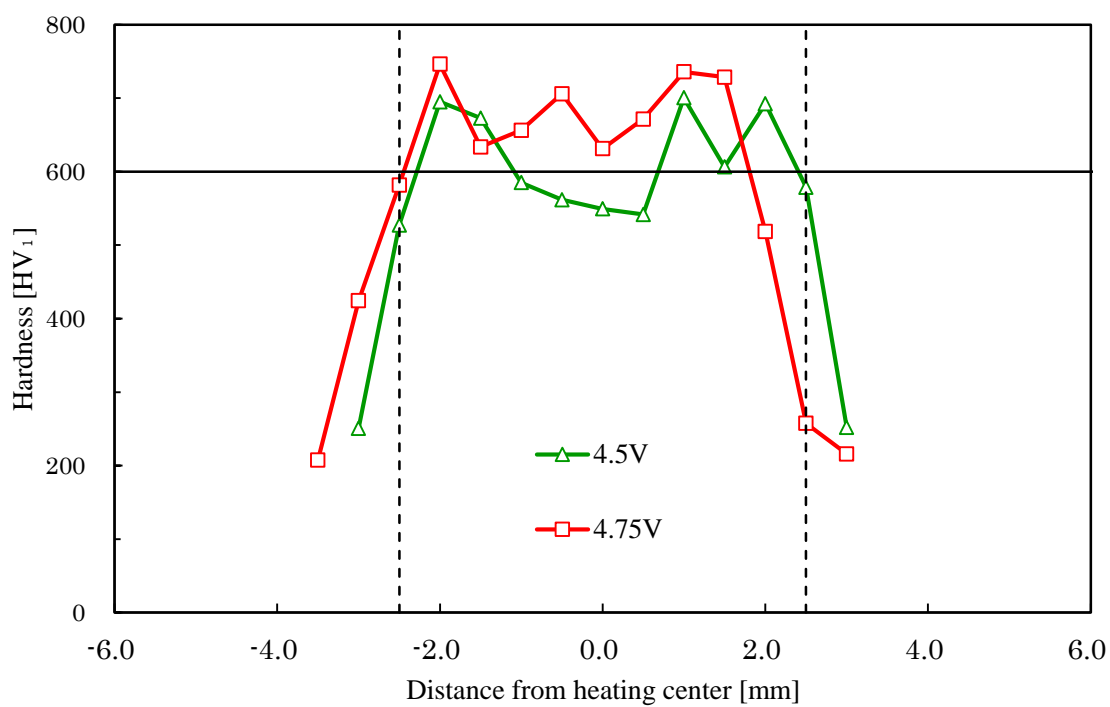


Fig. 3.8 Variation of hardness distribution with electrifying voltage for 5mm of electrode diameter

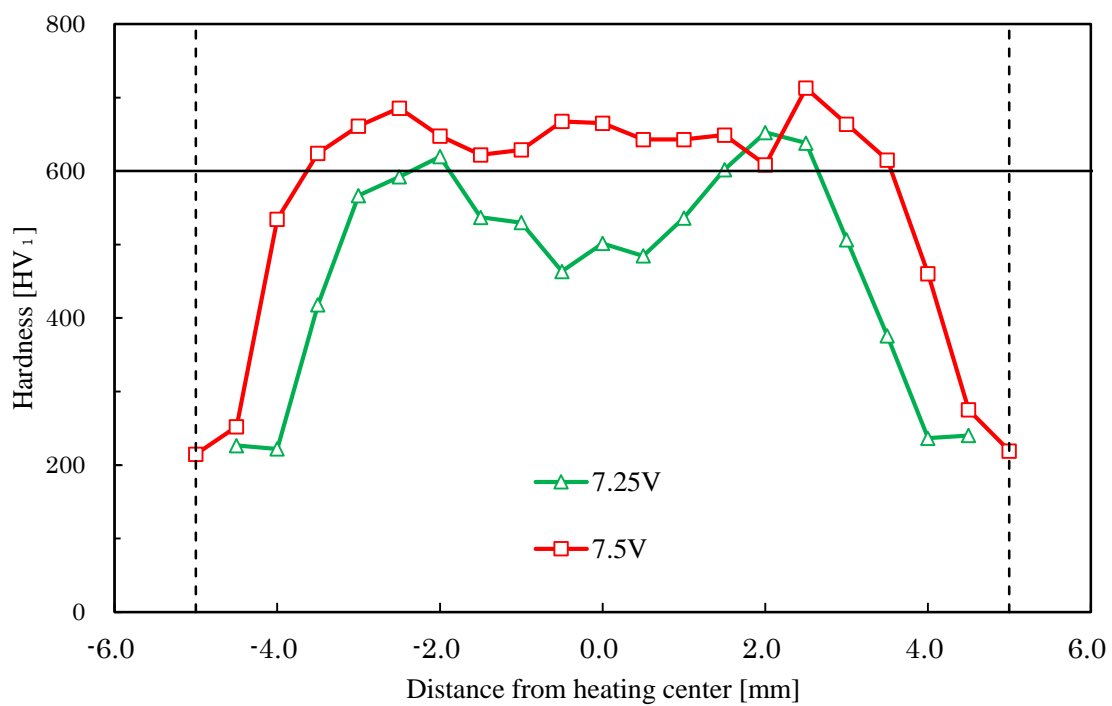


Fig. 3.9 Variation of hardness distribution with electrifying voltage for 10mm of electrode diameter

3.2.3 電極径による比較

表 3.1 にそれぞれの電極径において均一な焼入れ状態が得られた条件での、公称電流密度と硬化割合として HV_i600 以上が得られた範囲の電極径に対する割合を示す。電極径が大きいほど焼入れに必要となる公称面流密度が小さくなった。これは、電極径が大きいほどに放熱の影響が小さくなり、より少ない入熱量でオーステナイト化温度に達するためだと考えられる。また、硬化割合についても電極径が大きいほどに小さくなった。

Table 3.1 Variation of appropriate electrifying condition and resultant state of hardening with electrode diameter

	3.5mm	5mm	7mm	10mm
Nominal current density [A/mm ²]	265	227	176	131
Dimensional ratio of hardened range (%)	84	85	78	72

第4章 温度分布と硬化の関係

4.1 サーモグラフィによる温度分布の測定

鋼の焼入れにおいて、得られる硬さは加熱時の温度と密接な関係がある。そこでエッジ焼入れ時の加熱温度を測定し、硬化領域との関係を調査した。

4.1.1 測定方法

通電加熱実験時の試験片の加熱状態を調査するため、図 4.1 に示すように試験片エッジ部側面を赤外線サーモグラフィ・InfReC Thermo GEAR G120EX を用いて温度を測定した。本装置は 0.1s ごとの熱画像が撮影でき、それによって温度分布とその変化を測定できる。測定レンジは 0~1500°Cである。なお、温度測定面は#2000 のエメリー紙で研磨した後、実験直前にバフ仕上げを施した。通電条件は電極接触圧力 $p_c=26.5\text{MPa}$ 、通電時間 $t=1.0\text{s}$ に固定し、通電電圧 E を変化させ実験を行った。

また、通電加熱中の試験片の放射率を決定するために同一条件で K 型熱電対を用いて、鋼材の電極接触面中央から深さ 0.5, 1.0mm に溶接し、測定された温度を元に補正した。

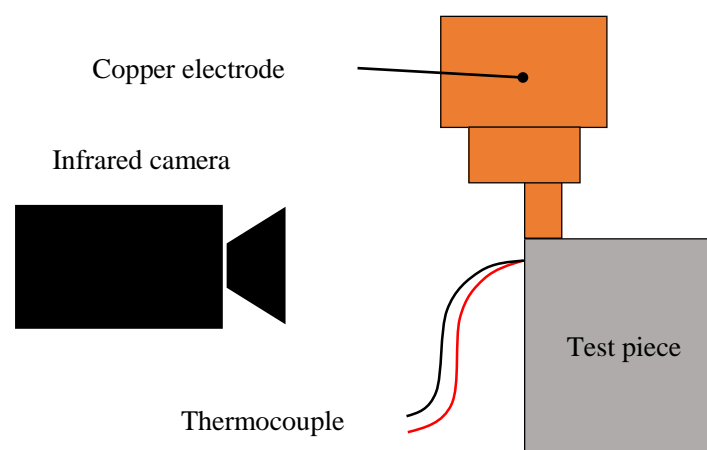


Fig. 4.1 Measurement of test piece temperature with infrared camera and thermocouple

4.1.2 放射率の補正

図 4.2 に通電加熱による試験片の温度変化を、電極接触面中央から深さ 0.5mm, 1.0mm で熱電対により測定した結果を示す。電極接触部直下は通電処理開始直後に急激に加熱される。しかし、温度の増加量は徐々に小さくなり、通電加熱終了直前には僅かな温度上昇に留まった。また、二つの熱電対の温度を比較すると、通電開始直後は電極接触面により近い深さ 0.5mm での温度のほうが急速に増加する。しかし、徐々に深さ 1.0mm の温度が深さ 0.5mm のそれに追従し、加熱終了時点では深さ 1.0mm での温度が 10°C 高くなった。

放射率の校正のため、サーモグラフィの連続熱画像の温度を同一条件での熱電対のそれに合わせた際の放射率を求めた。その結果を図 4.3 に示す。1070°C 付近で放射率が急激の増加することがわかる。これはバフ仕上げ面であった観察面が温度の上昇によって酸化したためと考えられる。以後、放射率は高温域に合わせて、0.60 として実験を行った。

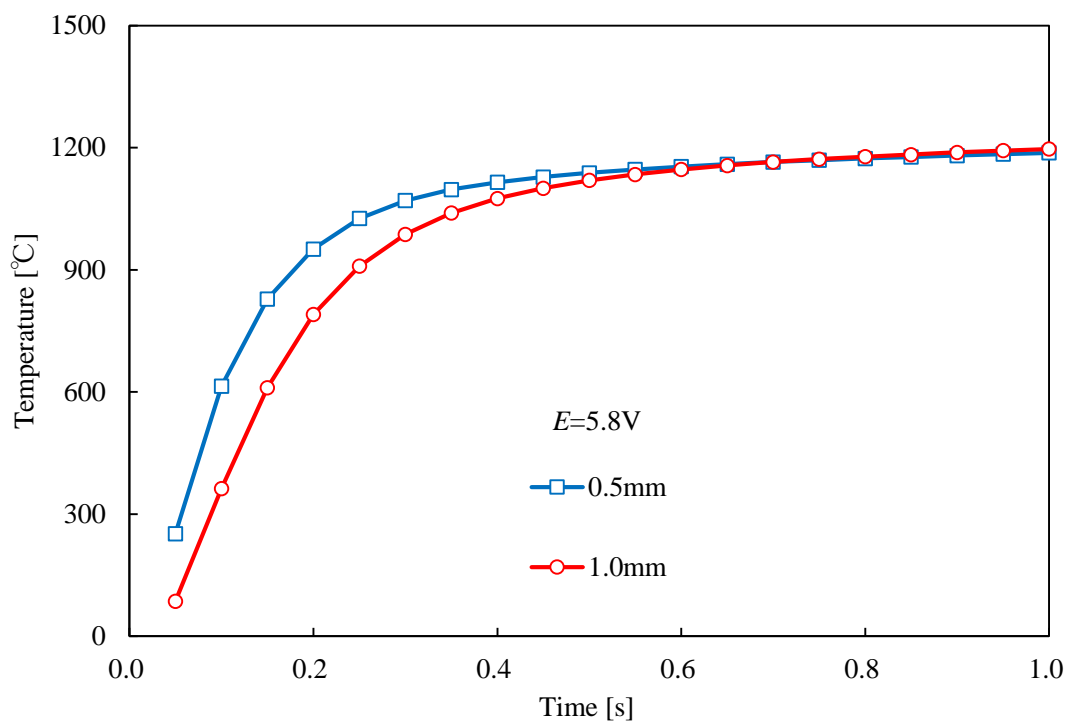


Fig. 4.2 Temperature variations with time measured by thermocouple

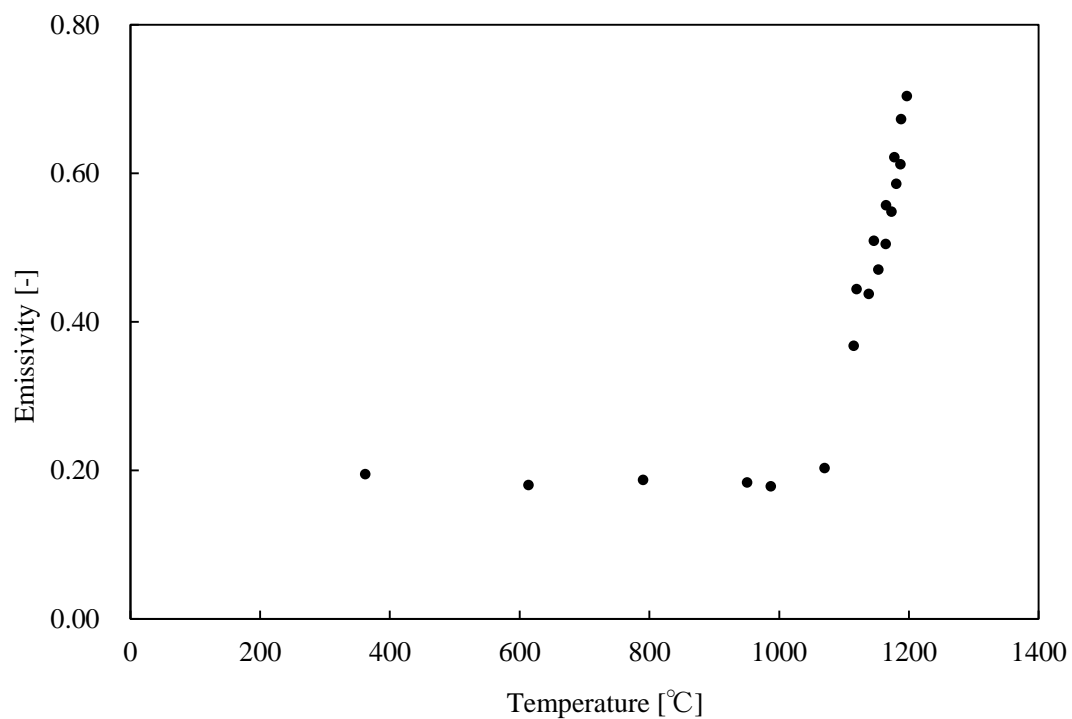


Fig. 4.3 Variation of emissivity with temperature

4.1.3 測定結果

図 4.4 に、通電加熱中に試験片側面を撮影した熱画像の連続写真を示す。試験片は通電加熱開始直後に電極接触部外端から加熱され、通電終了時には接触面外端と接触面中央より深さ 1~2mm の地点を結んだ半楕円形状の加熱領域が発達していることがわかる。このとき電極接触面中央はその加熱領域に取り囲まれているものの、周囲より温度が低いことが見て取れる。

図 4.5 に、撮影された熱画像の中で最も高温となったものから得られた鋼材表面部の温度分布と、実験後に測定した硬さの分布を示す。(a)は均一な硬化領域が得られなかった条件である。SKD11 の焼きなまし温度は 830~880℃なので、電極接触部全体がオーステナイト化温度に達したものと考えられる。しかし、接触部中央の温度は外端のそれより低く十分な硬さが得ることができなかつたと考えられる。(b)は均一な硬化領域が得られた条件である。やはり、接触部中央の温度が幾らか低いが、(a)の条件と比べ電極接触部全体が十分に加熱されたため、均一な硬化領域を得られた。また、両条件共に到達温度に追従した硬さ分布が得られたことがわかる。

図 4.6 に、試験片側面の到達温度の分布と対応する硬さ分布を示す。測定位置は試験片側面の電極接触面中央で、電極接触面から 0.2mm 離れた位置から 0.3mm 間隔で測定した。到達温度は処理表面より深さ 1~2mm において最も高くなっており、硬化領域もやはりそれに追従する分布を示している。

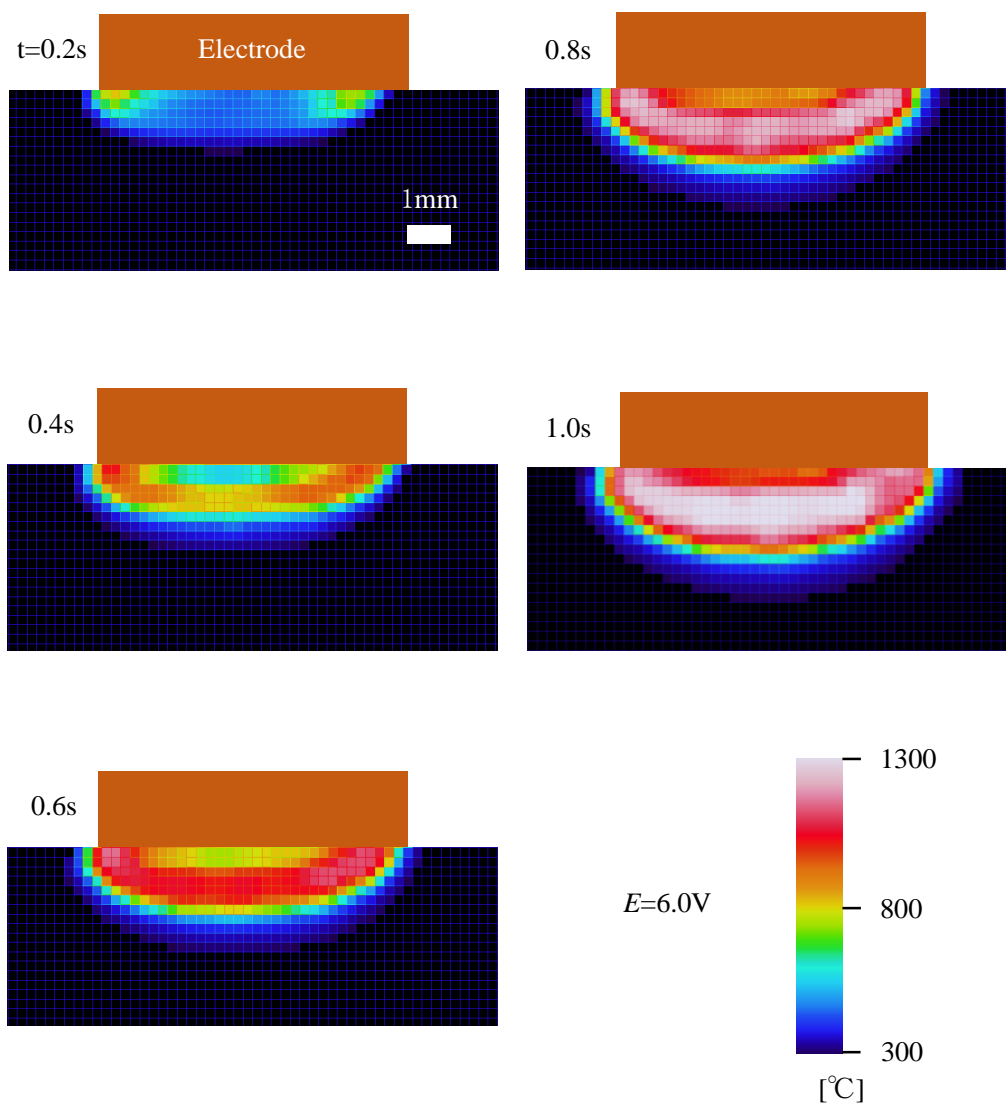


Fig. 4.4 Variation of temperature distribution with time in resistance heating for local hardening of edge part

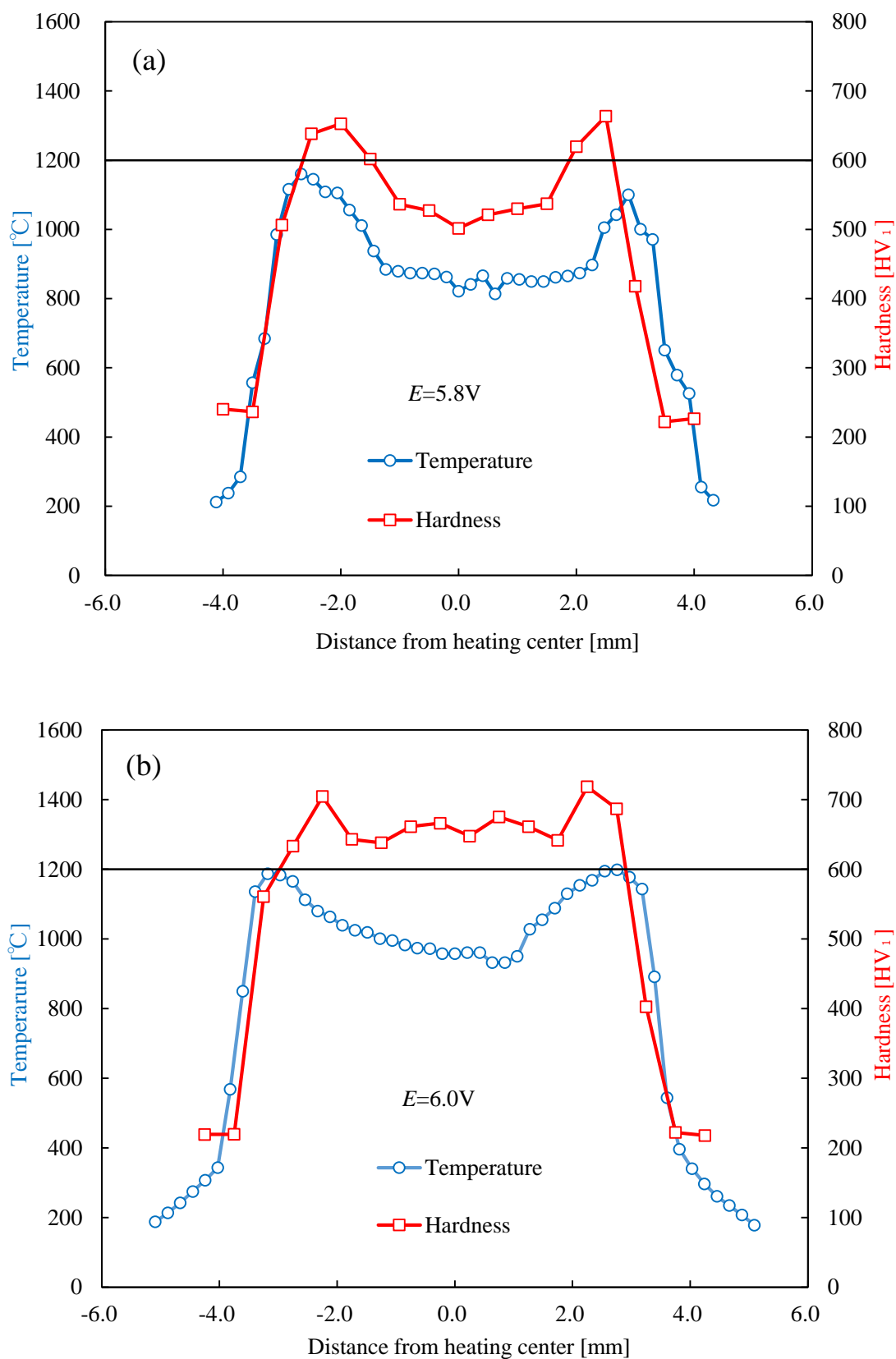


Fig. 4.5 Relationship between attained temperature and hardness

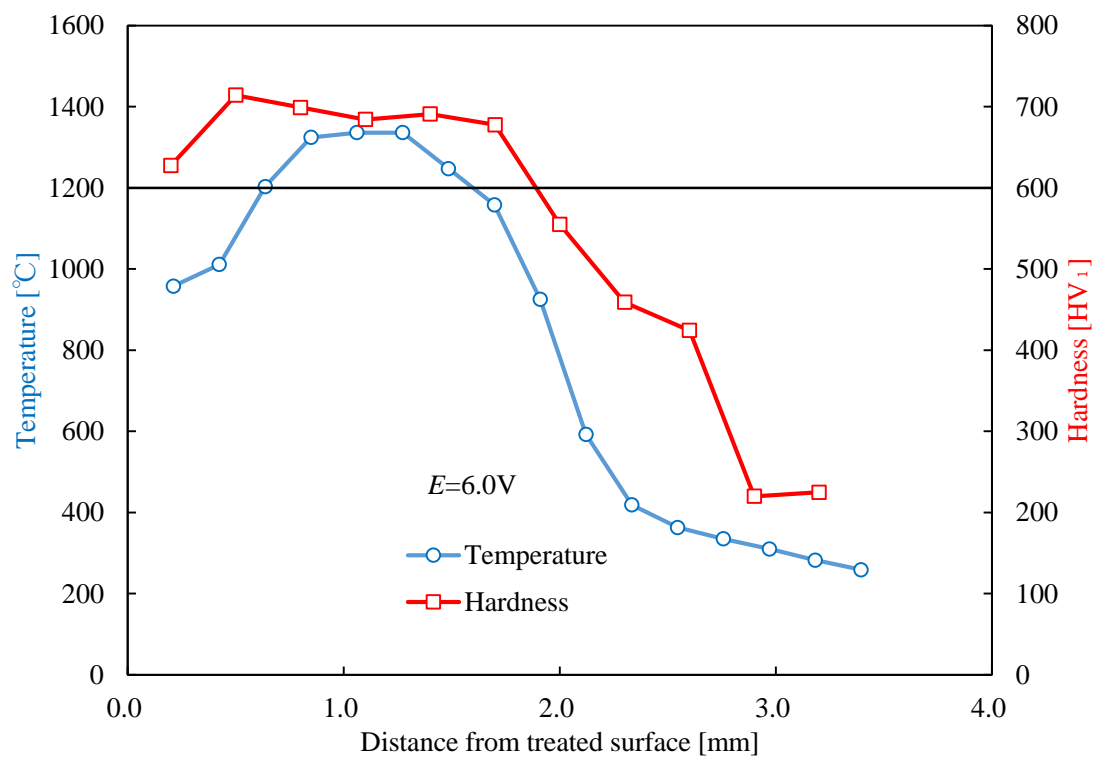


Fig. 4.6 Relationship between attained temperature and depth of hardening

4.2 温度分布のシミュレーション

前節より，通電加熱を利用した局所焼入れにおいて，処理により硬化領域が得られるか否かは，被処理面の到達温度によっておおよそ決定されることがわかる．従って，被処理面の加熱温度をあらかじめ推定することができれば，処理の成否や得られる硬さを予測できる．そこで，試験片の加熱状態の把握を試みるために軸対称モデルの数値シミュレーションを行った．

また，半円形電極を用いたエッジ焼入れは前章で述べたように，軸対称モデルを軸方向に半割にしたものと近い結果となると考えられる．そこで実験で測定された温度との比較を行い，シミュレーションの妥当性を検討した．

4.2.1 計算理論・計算モデル

図 4.7 に，本シミュレーションに用いた局所通電焼入れの計算モデル及びその寸法を示す．被処理材である試験片を電極と銅板で挟み，その上下に一定の電流を印加するモデルを考える．試験片，電極，銅板の各モデルは合計 1350 個の小さな要素に分割しており，各要素の中心に抵抗体を配置し，2次元・軸対称の抵抗回路網を構成している．要素の分割は電極と試験片の接触部及びその近傍では一辺 0.25mm の正方形要素として，接触部から離れた位置では段々にサイズを大きくした．また，計算モデルは今回実際に用いた試験片と先端径 7mm の電極の寸法を反映させた．

上下銅板のそれぞれ上端，下端の要素で，ある電流の流入及び流出が短時間にあった場合を考える．そのとき，それ以外の要素ではキルヒホッフの法則より，電流の流出入の総和は 0 となる．この関係を連立方程式のより計算することで，要素間の電位を算出することができる．そして，要素間の電圧及び電気抵抗から，この時間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，これと同時に要素間では熱伝導による熱移動が発生している．それは，各要素の温度とその間の熱伝導率から移動する熱量を算出することで求められる．

以上の計算により単位時間当たりの各要素の温度変化を，設定した時間まで繰り返し行うことで通電加熱による温度変化を算出した．

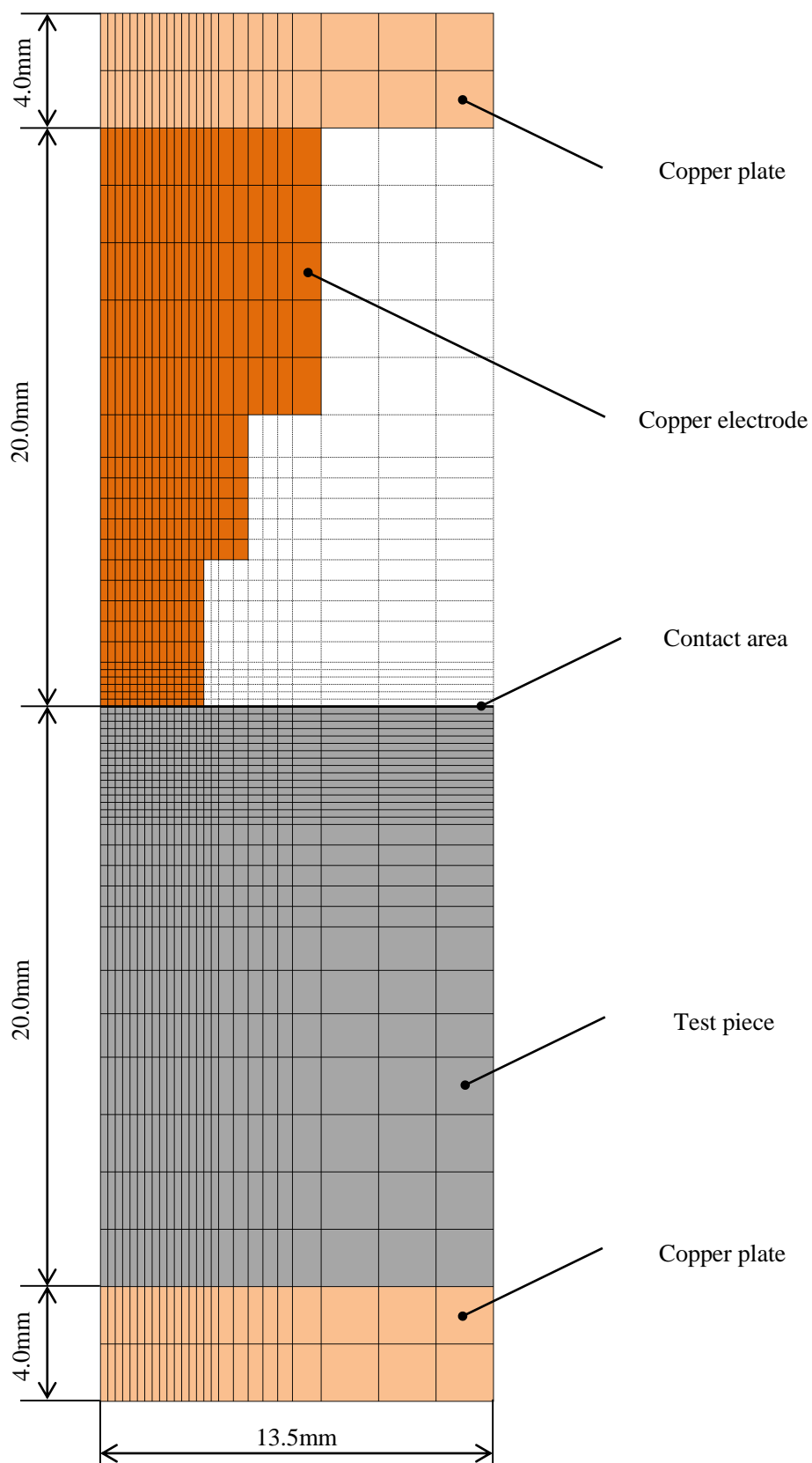


Fig. 4.7 Shape and size of axisymmetric simulation model

4.2.2 計算条件

各要素の物性値は実際の実験と同じく、試験片に SKD11、電極に C30A2 の値をそれぞれ適応した。図 4.8 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での実測値から、近似もしくは内挿補間により算出した。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³⁾であるが、一次式として近似して用いた。また、C30A2 及び銅の物性値^{3),4)}については室温のそれを用い、温度変化を無視した。なお、上下銅板は上下端からの入出力電流を均一に分布させることを目的として、実際よりも電気抵抗率を小さい値とした。表 4.1 に、室温 25°C における SKD11、C30A2、銅の各種熱物性値と密度を示す。なお、図 4.7 中の白色の要素は電気抵抗率を極端に高い値、熱伝導率を極端に 0 に近い値とし、試験片と電極からは絶縁・断熱状態となるように仮定している。

実験において、電極接触圧力が焼入れ状態に大きな影響を与えていた。これは前章でも述べたように、電極接触圧力 p_c の増減による真実接触面積 A_R の変化が原因と考えられる。そこで、シミュレーションにおいても公称接触面積 A に対する真実接触面積 A_R の割合、接触率 ε を仮定して計算に反映した。実験で使用した試験片の電極接触面はラップ研磨の後、バフ仕上げを施した。これは目視においては滑面であるが、実際には微細な凹凸が存在する。エメリー紙で研磨された電極先端も同様であるが、今回は試験片についてのみに注目する。この試験片の凹凸は電極接触圧力 p_c の増加によって、塑性変形することで電極先端との接触率が増加する。この凹凸が極端な鋭角形状でなければ、ビッカース硬さ試験のように平面に圧子を押し込み、押しのけるようなモデルが考えられる。ビッカース硬さ試験の圧子を金属に押し込む時に、必要な荷重は降伏応力 σ_Y の約 3 倍である。よって電極を試験片に押し付けた際に、公称接触面積 A_R を得るために必要な押し付け力 F は次の式から求められる。

$$F = 3\sigma_Y \cdot A_R$$

$$F = HV \cdot \varepsilon A$$

このとき、

$$p_c = \frac{F}{A}$$

従って、接触率は電極接触圧力と材料の硬さによって決定される。

$$\varepsilon = \frac{p_c}{3\sigma_Y}$$

本実験で使用した試験片 SKD11 の母材のビッカース硬さは HV₅₀230 であった

$$3\sigma_Y = 230 \text{ [kgf/mm}^2\text{]} \cong 2300 \text{ [MPa]}$$

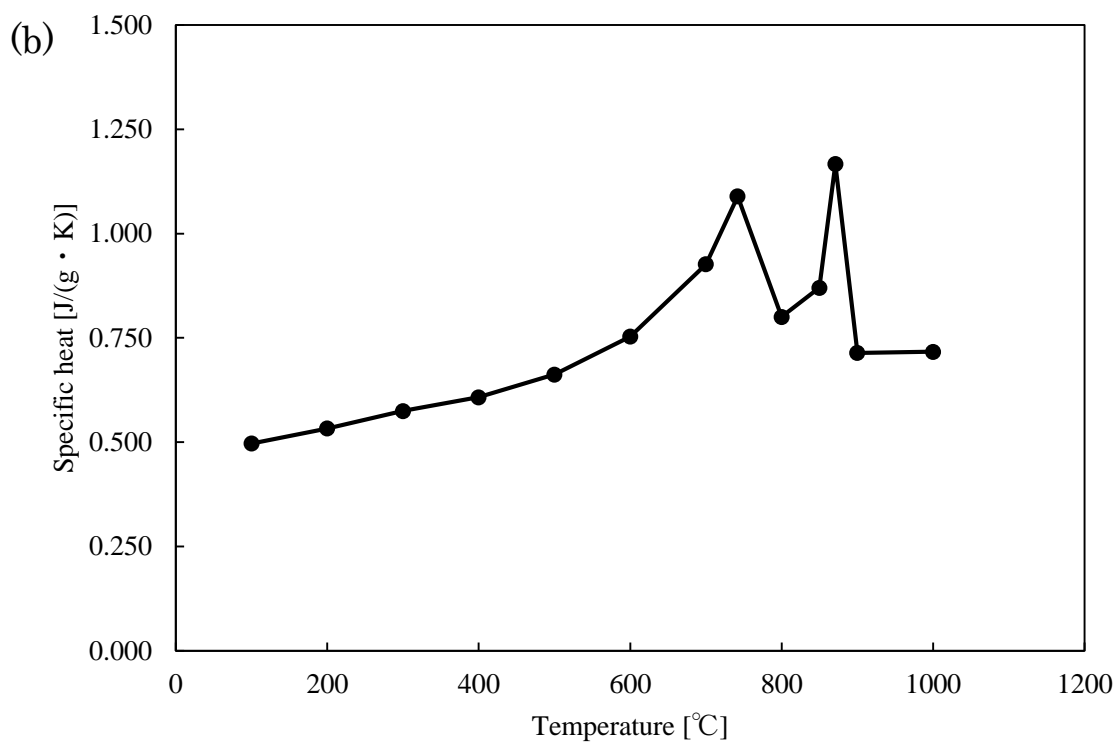
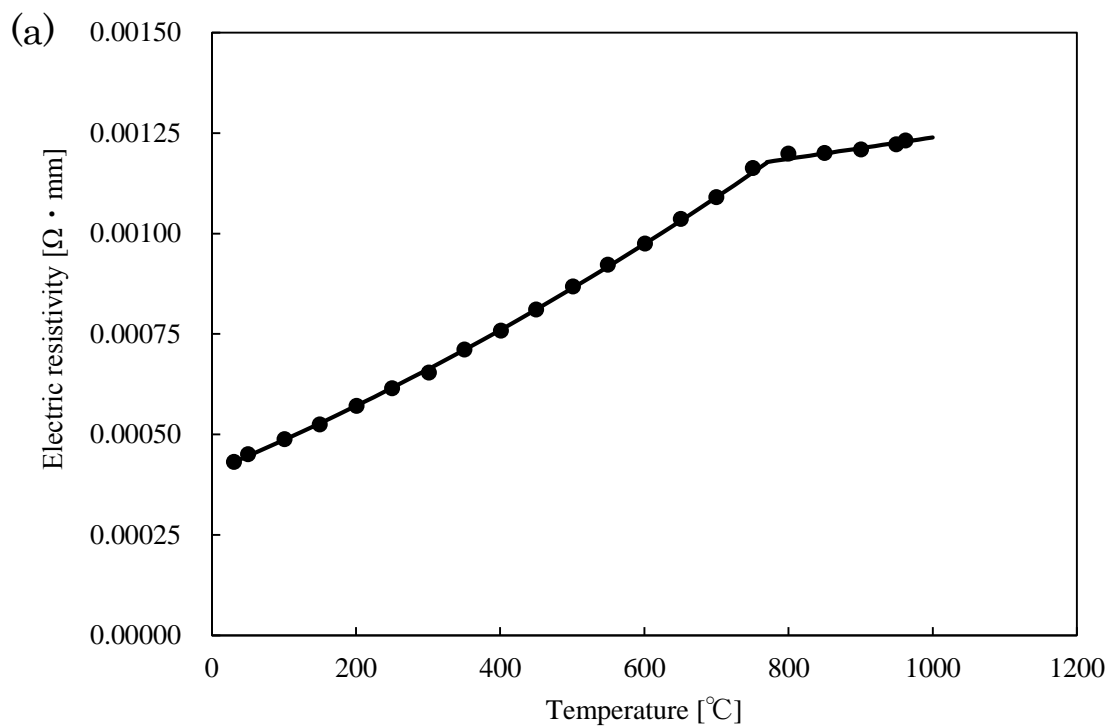
従って、室温における SKD11 の電極との接触率 ε_0 は次のように表される。

$$\varepsilon_0 = \frac{p_c}{2300} \quad (1)$$

ところで、鋼材の降伏応力は温度によって変化する。前節からわかるとおり、鋼材の電極接触面はオーステナイト化温度以上に加熱されるため、通電加熱中に接触率が変化するものと考えられる。そこで、温度による降伏応力の変化を測定することで接触率の変化を推定し、シミュレーション上に反映した。図 4.9 に測定方法を示す。直径 10mm、高さ 30mm の SKD11 丸棒を油圧プレスにより加圧する。試験片に一定の荷重が加わった状態で上下の銅板を通じて通電加熱を行う。試験片と銅板との接触が良好ならば、試験片はジュール発熱により均一に加熱する。ただし、上下面から銅板に熱が移動するため試験片中央が最も高温となる。故に、変位計により降伏が観測された時点での試験片中央の温度がわかれば、温度による降伏応力の変化を測定することができる。

図 4.10(a)にこの実験の結果の一例を示す。試験片中央の温度は通電開始と同時に直線的に増加する。変位は通電中いったん増加するが、途中から減少に転じる。この変位の経過には熱膨張・ヤング率・降伏の、3つの要素が関係していると考えられる。まず熱膨張は温度の変化に対し正の変位を生じる。一方で温度に対するヤング率の変化は、負の変位を生じる。最後に降伏は負の変位を生じるが、前者二つと違い降伏点に達する温度までは影響が表れない。通電開始直後から変位に影響を与える熱膨張は温度変化に対してほとんど一次比例する³⁾。それに対し、ヤング率の影響は比較的小さい。通電加熱による温度上昇はほとんど一定なので、図 4.10(b)に示すように変位の増加過程の中間部分を最小二乗法で近似した直線を熱膨張とヤング率の影響であると考えた。その直線から一定量(公称ひずみ $\varepsilon_n=0.0015$)離れたときに降伏したものと判断し、そのときの温度を降伏温度とした。図 4.11 に実験結果を示す。619°Cから 795°Cの間で大きく降伏応力が変化することがわかる。

この結果を元として、今回シミュレーションに用いた接触率を仮定する。電極接触圧力 26.5MPa のときの接触率の温度変化を、表 4.12 に示す値の内挿値とする。このとき室温 25°C での 1.15%は式 (1) から求めた ε_0 である。この ε_0 を元としての温度による接触率の変化を仮定した。また、795°C以上の降伏点については適切に測定できなかったため、1500°Cで完全接触 $\varepsilon=1$ となるとみなし、その間を直線変化とした。



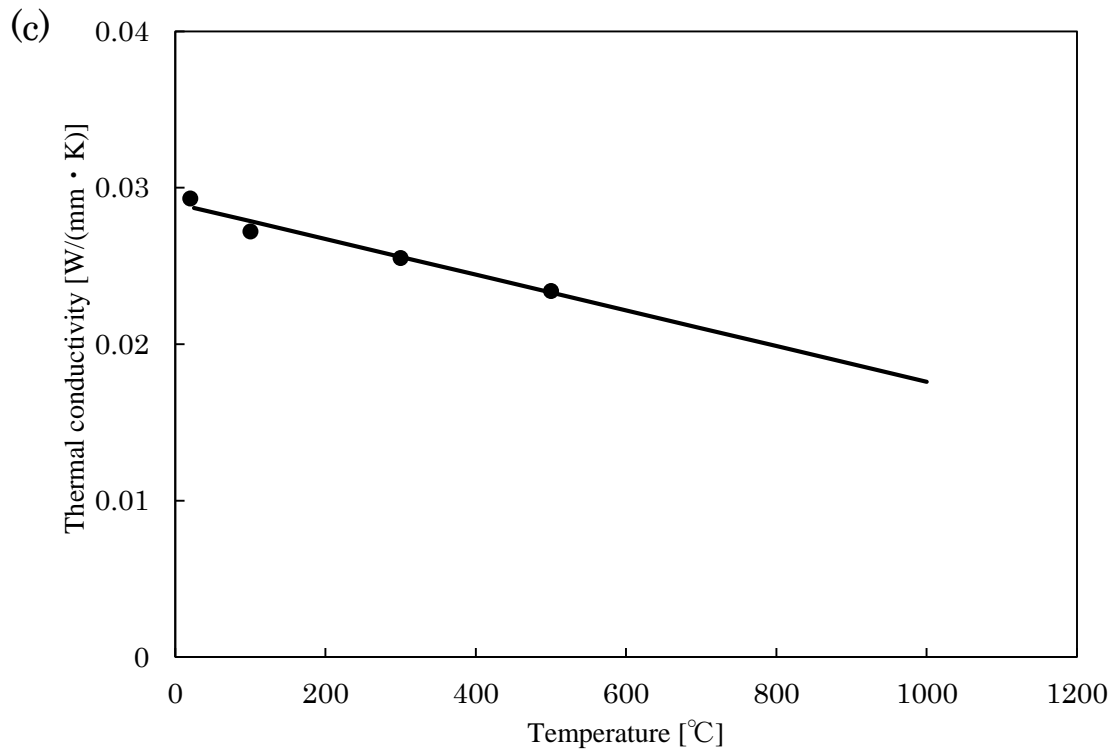


Fig. 4.8 Variation of (a) electric resistivity, (b) specific heat and (c) thermal conductivity of SKD11 with temperature

Table 4.1 Physical properties of SKD11 , C30A2 and copper 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}
Copper	(1.1×10^{-6})	0.386	0.398	8.88×10^{-3}

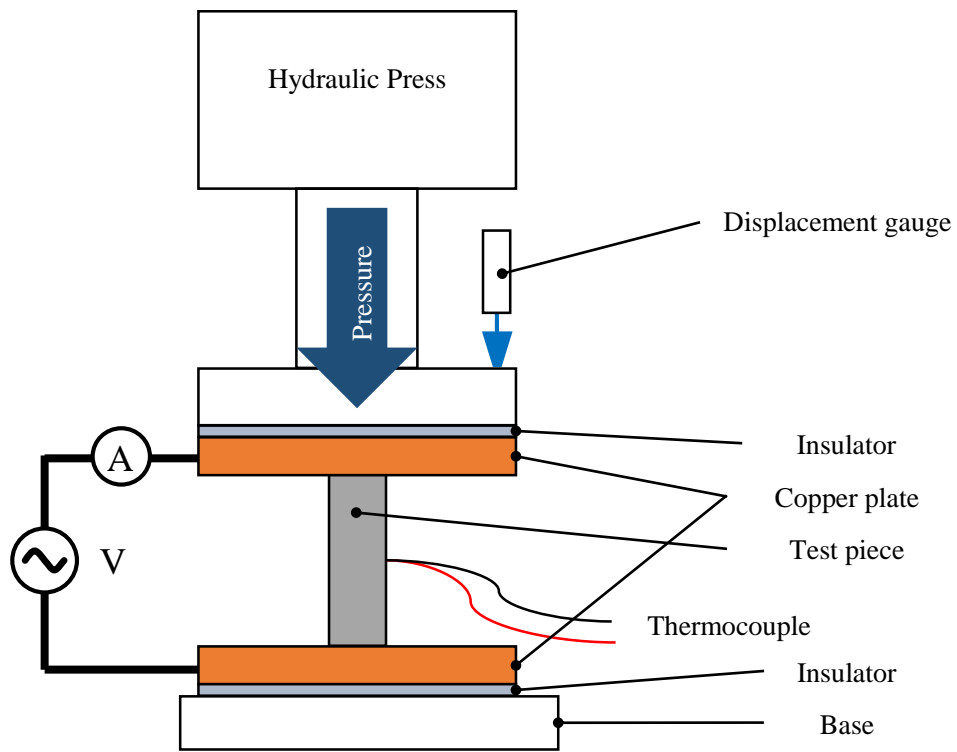


Fig. 4.9 Illustration of setup of measurement of temperatures on different yield strength

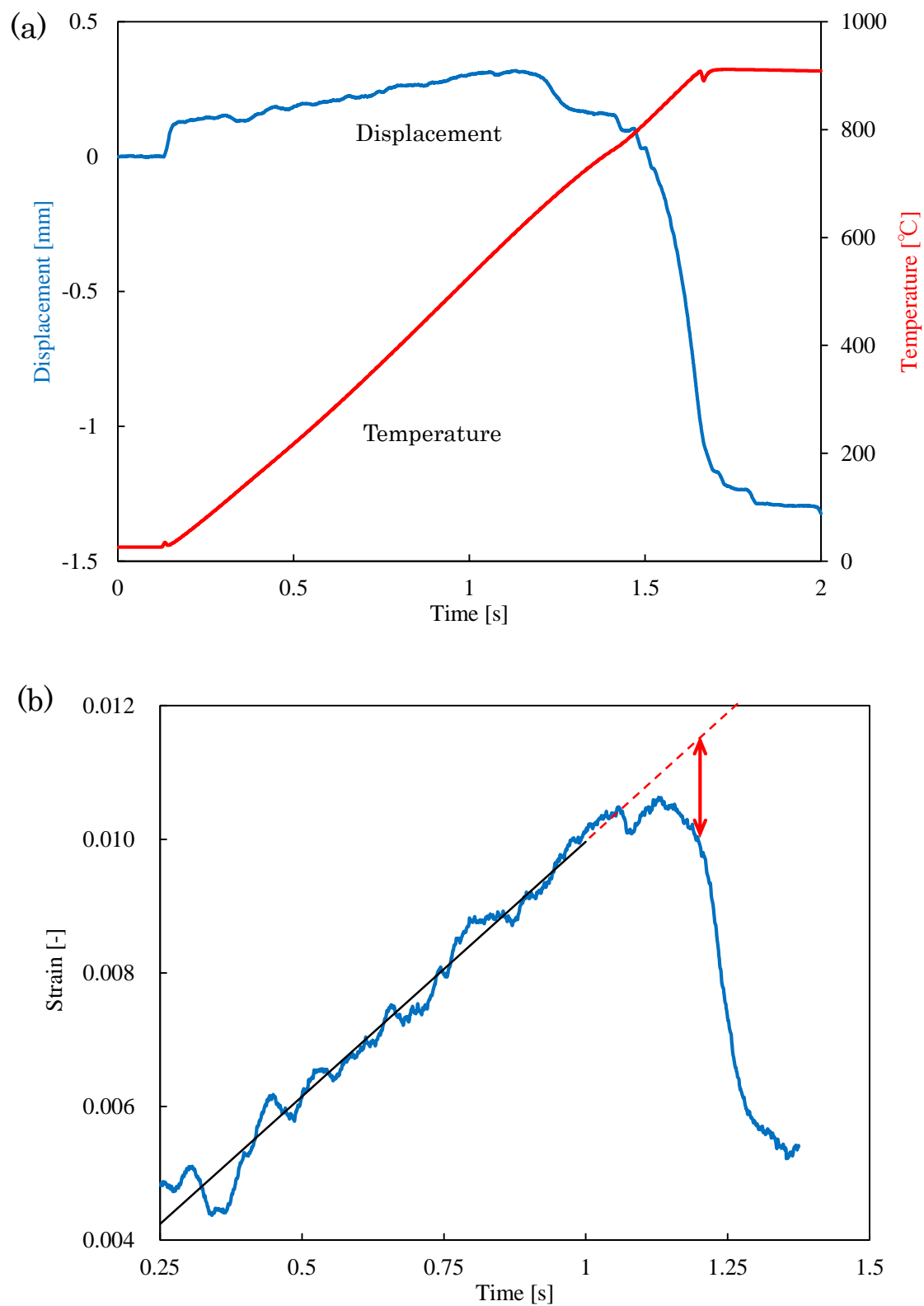


Fig. 4.10 (a) Strain variation with temperature and (b) method of measurement of yield point

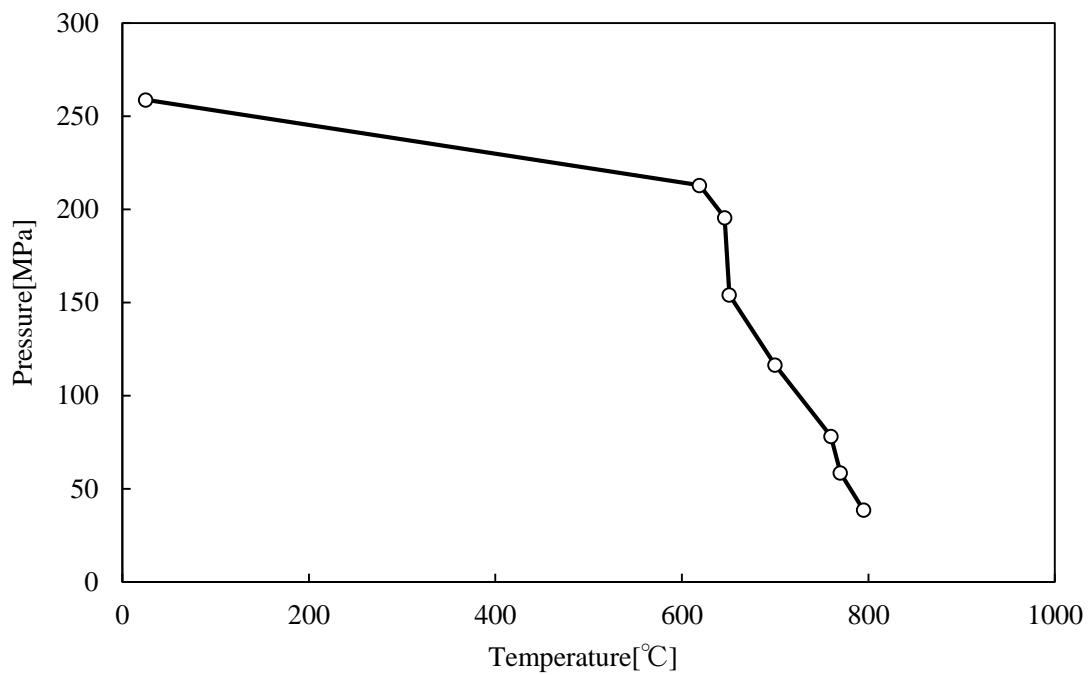


Fig. 4.11 Variation of yield strength with temperature

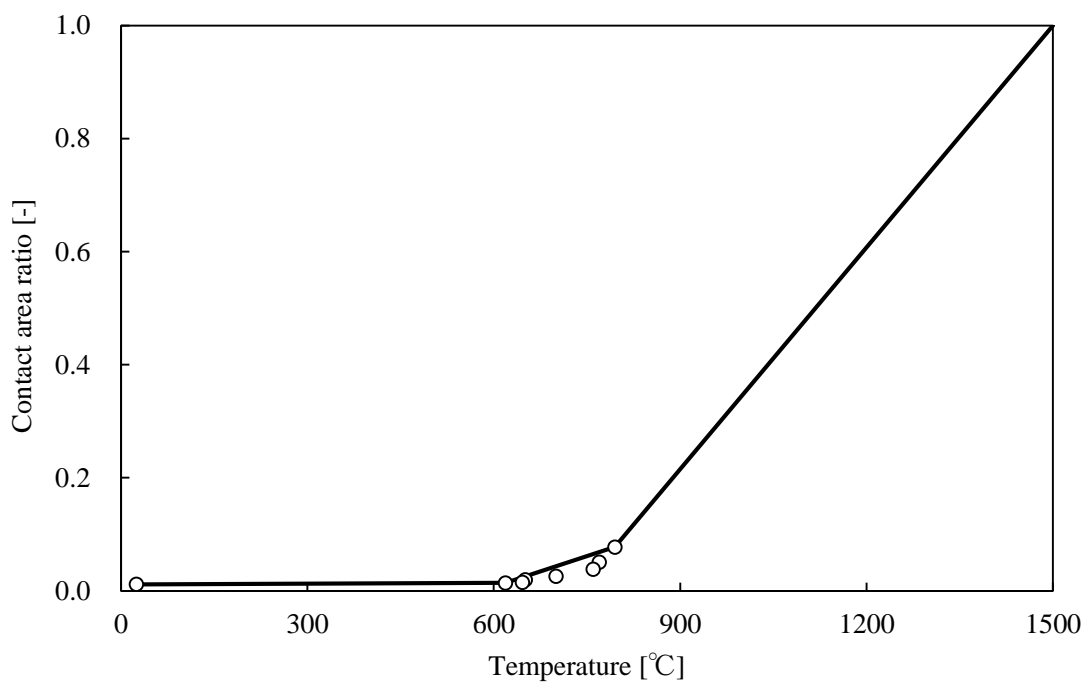


Fig. 4.12 Assumed variation of contact area ratio with temperature

4.2.3 計算結果及び考察

図 4.13 に、電極接触圧力 $p_c=26.5\text{MPa}$ 、通電時間 $t=1.0\text{s}$ 、平均電流密度 $I=166\text{A/mm}^2$ でシミュレーションを行った際の、通電終了時の電極接触部近傍の温度分布を示す。このとき、設定した各種条件は図 4.4 と図 4.5(b) に示した実験のときのそれと同一である。試験片の加熱領域は図 4.4 の結果同様に、電極接触部直下に半楕円形状に発達したことがわかる。図 4.14 に試験片表面要素の温度と実験で得られた結果を比較する。共に電極接触面外端での温度が中央のそれより高い値を示している。ただし、シミュレーションにおいて試験片表面で最も加熱される要素は電極接触部外端の要素である。つまり、シミュレーション上では均一な硬化領域が得られる条件では電極接触面積と同じか、それ以上の面積が得られるはずである。しかし、実測値からわかるように、実際に得られる硬化領域は電極接触面積よりも小さい。従って、接触率 ε 以外にも、接触状態として仮定すべき点があると考えられる。

図 4.15 に、電極接触面中央から深さ方向に 0.5mm 、 1.0mm 離れた位置での温度変化をしめす。共に、通電開始直後に温度が急激に増加し、 1200°C 付近で停滞する。また、温度上昇速度が遅い深さ 1.0mm の温度が最終的に、深さ 0.5mm のそれを追い越す。これらの傾向は図 4.2 に示した熱電対によって測定した温度変化のそれと似ている。しかし、シミュレーションにおいては、通電開始から $0.3\sim 0.4\text{s}$ で温度上昇率が增加する実験結果と異なる傾向が見られた。原因として、実験では定電圧を印加するのに対し、シミュレーションにおいては定電流を印加したことが挙げられる。試験片の抵抗は温度上昇に伴って増加する。実験では抵抗の増加に伴い、電流量が減少することで発熱量が減少する。一方で、本シミュレーションでは電流は一定であり、抵抗が増加することで発熱量が増加するためこのような相違が発生したと考えられる。

図 4.16 に計算終了時の電極接触部近傍の電流密度の分布図を示す。電流は電極上部からほとんど均一に流入するが試験片接触面付近から外縁部に集中する。電極から試験片に流入するとき、電極最外端要素の電流密度は電極中央の要素のそれより約 2 倍となる。試験片に流入した電流は試験片表層に沿って拡散する。この結果から電極接触面中央より外端部のほうが大きい発熱量を得ると考えられ、それは実験において電極接触面外端がより高温となる結果と矛盾しない。

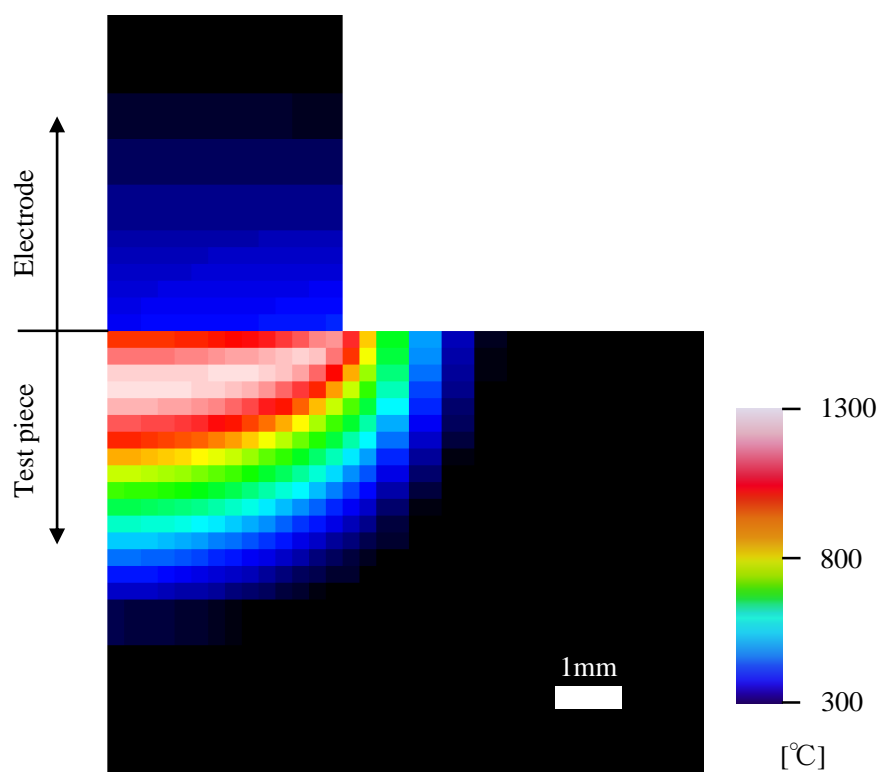


Fig. 4.13 Temperature distribution calculated

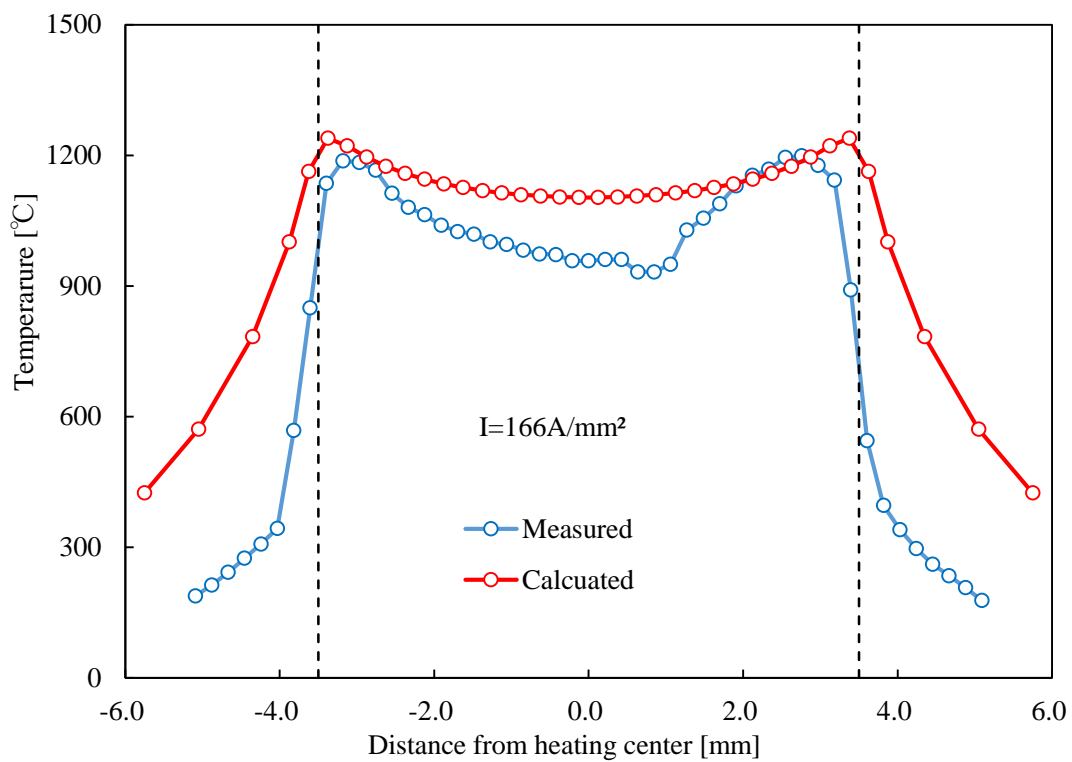


Fig. 4.14 Comparison of temperature of treated surface

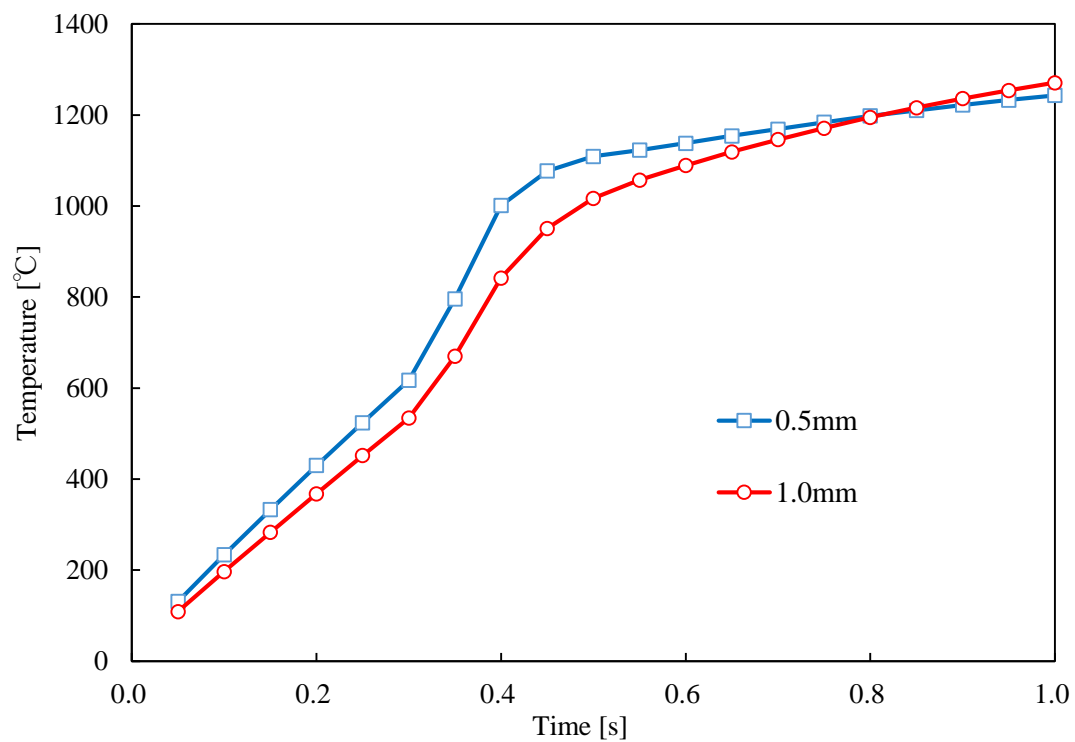


Fig. 4.15 Temperature variations with time in calculated

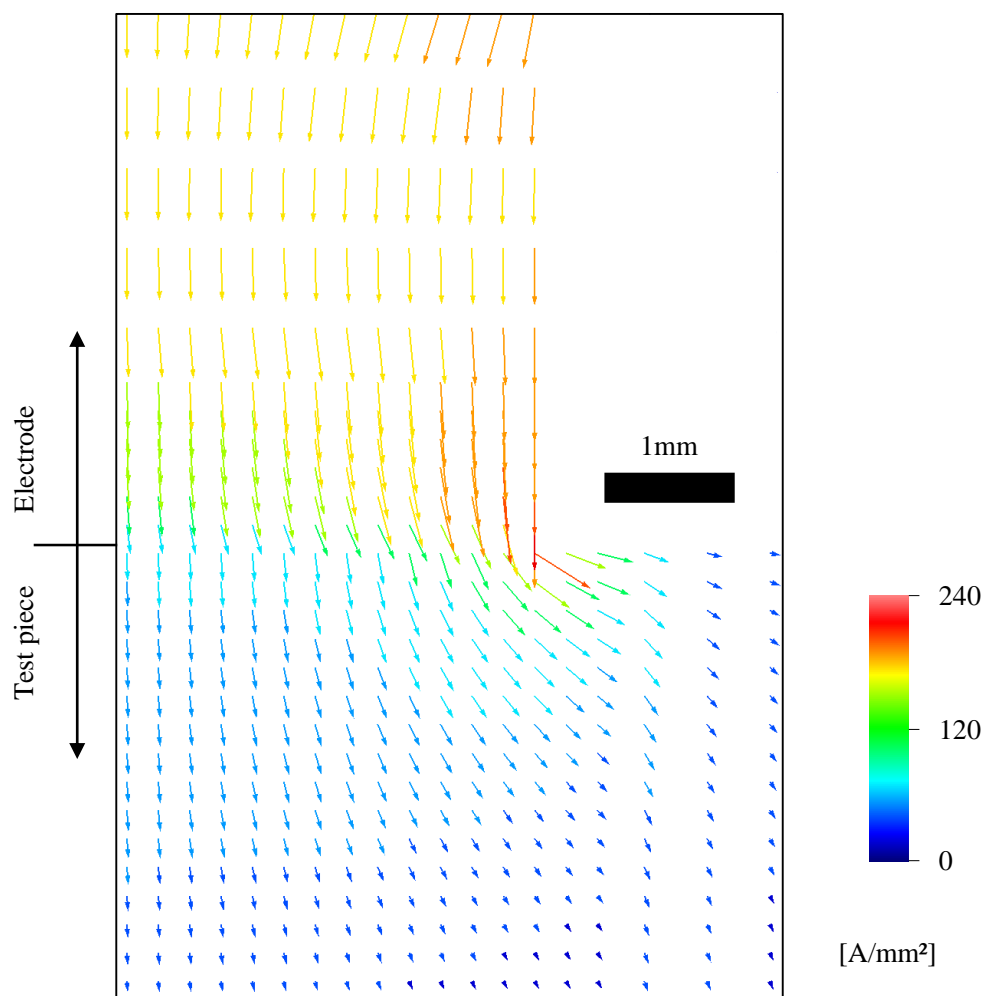


Fig. 4.16 Current density distribution calculated

第5章 結言

通電加熱を利用した局所焼入れ法において、冷間ダイス鋼 SKD11 を被処理材として、エッジへの適応を試みた。さらに、加熱処理中の鋼材の温度分布を測定し、到達温度と得られる硬さとの関係を調査した。最後に電極と試験片の間の接触を仮定した数値シミュレーションを行い、実験結果と比較として妥当性を検討した。

- (1) 先端面が半円形状の電極を使用した場合、通電条件を適切に設定することでエッジに均一な硬化領域を得ることができた。また、その硬化領域の発達は、通電電圧の増加及び電極接触圧力の減少により、電極接触面で半円環状の硬化領域が発達する。
- (2) 電極接触圧力と通電時間が一定であれば、電極径が大きくなるにつれて最適な熱処理条件となる電流密度が小さくなった。また、電極径に対する相対的な焼入れ範囲も小さくなった。
- (3) 通電加熱時の到達温度と得られる硬さには密接な関係がある。電極接触面中央は周囲より到達温度が低く、半円環状の硬化領域の発達をよく説明した。
- (4) 数値シミュレーションにおいて鋼材の降伏応力の温度変化と電極接触圧力から、電極と鋼材の接触率を仮定することで実験結果をよく説明した。

参考文献

- 1) 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) CD-ROM 論文集, (2012), 822.
- 2) 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) CD-ROM 論文集, (2013), 819.
- 3) F-SKD11 テクニカルデータ, http://www.futaba.co.jp/img/uploads/files/precision/plate/ppl/product_plate/fskd11/tech_deta_F-SKD11.pdf (2015.2 現在)
- 4) 主要材種物性表, http://www.nittan.co.jp/member/admin/document_upload/bussei.pdf (2015.2 現在)
- 5) 日本機械学会編, 伝熱工学資料, 改訂第 5 版 (2009), pp. 281, 日本機械学会.
- 6) In-Rak Choi, Kyung-Soo Chung, Do-Hwan Kim “Thermal and mechanical properties of high-strength structural steel HSA800 at elevated temperatures” *Material and Design* 63 (2014) 544-551

謝辞

本研究を遂行するにあたり、終始懇切丁寧な御指導を賜りました牧 清二郎教授に深く感謝いたします。また、研究遂行にあたり多くの御助言、御協力をいただいた中西 栄徳助教、ならびに論文作成にあたり御査読いただきました鈴木 実平教授に深く感謝いたします。

さらに、実験を遂行するにあたり多くの御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いたします。

最後に、幾多の御協力をいただきながら、ここに御氏名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 一 数値シミュレーションに用いた FORTRAN77 プログラム

DIMENSION A(1350, 1350), B(1350) ! ガウスの消去法のための行列

DIMENSION D1(25), D2(54), CS(25) ! 各要素の横幅, 縦幅, 断面係数

DIMENSION R(1350), SK(1350), C(1350), RO(1350) ! 各要素の抵抗, 熱伝導, 比熱, 比重

DIMENSION T(1350), TD(1350) ! 各要素の温度, 変化量

DIMENSION RR(1350, 4), CK(1350, 4) ! 要素間の電気抵抗率, 熱伝導率

DIMENSION SJ(1350, 4), Q(1350, 4) ! 抵抗発熱量, 要素間の熱流量

DIMENSION SC(14), ST(14) ! 比熱の内装データ

DIMENSION TDM(25), CR(25) ! 発熱層の到達温度, 接触率

C 自身と隣要素間の抵抗の平均値

FNRR1(N, I, J) = (R(N)*D2(J) + R(N-X)*D2(J-1)) / (2*CS(I)*D1(I))

FNRR2(N, I, J) = (R(N)*D1(I)/CS(I) + R(N-1)*D1(I-1)/CS(I-1)) / (2*D2(J))

FNRR3(N, I, J) = (R(N)*D1(I)/CS(I) + R(N+1)*D1(I+1)/CS(I+1)) / (2*D2(J))

FNRR4(N, I, J) = (R(N)*D2(J) + R(N+X)*D2(J+1)) / (2*CS(I)*D1(I))

C 自身と隣要素間のジュール発熱

FNJJ1(N, I, J) = DT*(R(N)*D2(J) / (2*CS(I)*D1(I)))

A*((B(N-X) - B(N)) / RR(N, 1)) **2

FNJJ2(N, I, J) = DT*(R(N)*D1(I) / (2*CS(I)*D2(J)))

A*((B(N-1) - B(N)) / RR(N, 2)) **2

FNJJ3(N, I, J) = DT*(R(N)*D1(I) / (2*CS(I)*D2(J)))

A*((B(N+1) - B(N)) / RR(N, 3)) **2

FNJJ4(N, I, J) = DT*(R(N)*D2(J) / (2*CS(I)*D1(I)))

A*((B(N+X) - B(N)) / RR(N, 4)) **2

C 自身と隣接要素間の平均熱伝導率

FNCK1(N, J) = (D2(J) + D2(J-1)) / (D2(J)/SK(N) + D2(J-1)/SK(N-X))

FNCK2(N, I) = (D1(I)*CS(I) + D1(I-1)*CS(I-1))

A / (D1(I)*CS(I)/SK(N) + D1(I-1)*CS(I-1)/SK(N-1))

FNCK3(N, I) = (D1(I)*CS(I) + D1(I+1)*CS(I+1))

A / (D1(I)*CS(I)/SK(N) + D1(I+1)*CS(I+1)/SK(N+1))

FNCK4(N, J) = (D2(J) + D2(J+1)) / (D2(J)/SK(N) + D2(J+1)/SK(N+X))

C 自身と隣要素間の熱流量

FNQD1(N, I, J) = DT*(D1(I)*CS(I)) * (T(N-X) - T(N)) * 2 / (D2(J-1) + D2(J))

FNQD2(N, I, J) = DT*(D2(J) * (CS(I) + CS(I-1))) * (T(N-1) - T(N))

A / (D1(I) + D1(I-1))

FNQD3(N, I, J) = DT*(D2(J) * (CS(I) + CS(I+1))) * (T(N+1) - T(N))

A / (D1(I) + D1(I+1))

FNQD4(N, I, J) = DT*(D1(I)*CS(I)) * (T(N+X) - T(N)) * 2 / (D2(J+1) + D2(J))

FQTT(N, I, J) = 1 / (D1(I)*D2(J)*CS(I)*C(N)*RO(N)) ! 各要素の熱容量

FNRB1(T) = (86.656*(619-T) + 71.279*(T-25)) / (619-25) ! 発熱層の接触率(逆数)の定義

FNRB2(T) = (71.279*(795-T) + 12.916*(T-619)) / (795-619)

FNRB3(T) = (12.916*(1500-T) + 1*(T-795)) / (1500-795)

FNRL(T) = (40.8 + 0.0753*T + 0.0000317*T*T) * 1.E-5 ! 低温域のSKD11の電気抵抗(Ω・mm)

FNRH(T) = (97.3 + 0.0266*T) * 1.E-5 ! 高温域

FNK(T) = 0.029 - 0.0000114*T ! 熱伝導率(J/(g*K))

SC(1) = 0.49675 ; ST(1) = 0 ! SKD11の比熱の内挿値(W/(mm*K)), 対応する温度

SC(2)=0.49675 ; ST(2)=100
SC(3)=0.53284 ; ST(3)=200
SC(4)=0.574761; ST(4)=300
SC(5)=0.607811; ST(5)=400
SC(6)=0.66216 ; ST(6)=500
SC(7)=0.753208; ST(7)=600
SC(8)=0.926816; ST(8)=700
SC(9)=1.08948 ; ST(9)=742
SC(10)=0.800264;ST(10)=800
SC(11)=0.870254;ST(11)=850
SC(12)=1.166743;ST(12)=871
SC(13)=0.713922;ST(13)=900
SC(14)=0.716889;ST(14)=1000

FNR2=3.6*1.E-5;FNK2=0.260;FNC2=0.221 ! C30A2の電気抵抗,熱伝導率,比熱
FNR3=1.11E-6;FNK3=0.398;FNC3=0.386 ! 銅板の電気抵抗率(超伝導仮定),熱伝導率,比熱
FNR4=1.11E5;FNK4=1.11E-4;FNC4=1.11 ! 仮想物体の電気抵抗率,熱伝導率,比熱
R01=7.70*1.E-3;R02=14.2*1.E-3;R03=8.88*1.E-3;R04=1.11 ! 比重(SKD11,C30A2,銅,仮想)

DT=0.0001 ! 繰り返し単位時間
X=25 ! 要素の横数
YD=30;YD2=24;Y=YD+YD2 ! 試験片・電極の縦数・合計
DD1=0.25;DD2=0.25 ! 発熱箇所の要素の横幅・縦幅
DE1=0.50;DF1=1.00;DG1=2.00 ! 発熱箇所から離れた要素の横幅
DE2=0.70;DF2=1.50;DG2=2.00 ! 縦幅

MEMO=10;MEMO2=250;MEMO3=100 ! 出力の割合最高温度・温度分布・空冷過程時

DO 100 I=1,X*Y ! 初期化
T(I)=25.0
DO 110 J=1,4
RR(I,J)=0.0;Q(I,J)=0.0;SJ(I,J)=0.0;CK(I,J)=0.0

110 CONTINUE
100 CONTINUE

AXA=0
DO 120 I=1,16
D1(I)=DD1 ! 横幅の定義
CS(I)=3.141592654*(2*AXA+D1(I))/2 ! 断面係数の定義
AXA=AXA+D1(I)

120 CONTINUE

DO 130 I=17,21
D1(I)=DE1;CS(I)=3.141592654*(2*AXA+DE1)/2
AXA=AXA+D1(I)

130 CONTINUE

D1(22)=DF1;CS(22)=3.141592654*(2*AXA+DF1)/2
AXA=AXA+D1(22)
DO 140 I=23,25
D1(I)=DG1;CS(I)=3.141592654*(2*AXA+DG1)/2
AXA=AXA+D1(I)

140 CONTINUE

DO 150 J=1,Y ! 縦幅の定義
D2(J)=DG2

150 CONTINUE


```

DO 160 J=8, 48
D2(J)=DF2
160 CONTINUE
DO 170 J=9, 45
D2(J)=DE2
170 CONTINUE
DO 180 J=19, 40
D2(J)=DD2
180 CONTINUE

DO 190 I=1, (2*X) ! 銅板要素の物性値
R(I)=FNR3;R( (Y-2)*X+I )=FNR3
C(I)=FNC3;C( (Y-2)*X+I )=FNC3
RO(I)=RO3;RO( (Y-2)*X+I )=RO3
SK(I)=FNK3;SK( (Y-2)*X+I )=FNK3
190 CONTINUE

AXB=0 ! 試験片要素の横幅
DO 210 I=1, X
AXB=AXB+D1(I)
210 CONTINUE
AXC=0 ! 電極片要素の縦幅
DO 220 J=3, YD2
AXC=AXC+D2(J)
220 CONTINUE
AXD=0 ! 試験片要素の縦幅
DO 230 J=(YD2+1), (Y-2)
AXD=AXD+D2(J)
230 CONTINUE
AXE=0 ! 上端の電流入力面積
DO 240 I=1, 22
AXE=AXE+D1(I)*CS(I)
240 CONTINUE
AXF=0 ! 下端の電流入力面積
DO 250 I=1, X
AXF=AXF+D1(I)*CS(I)
250 CONTINUE

WRITE(6, '(A,$)') "AVERAGE CURRENT = "
READ(5,*) CURR
WRITE(6,*) "START"

OPEN(23, FILE='U21BIS-2_result.txt', STATUS='REPLACE')
WRITE(23,*) "AXISYMMETRIC MODEL"
WRITE(23, '(A,$)') "X="
WRITE(23, 5003) X
WRITE(23, '(A,$)') "Y="
WRITE(23, 5003) Y
WRITE(23, '(A,$)') "TEST PIECE RADIUS : "
WRITE(23, 5003) AXB
WRITE(23, '(A,$)') "TEST PIECE HEIGHT : "
WRITE(23, 5003) AXD
WRITE(23, '(A,$)') "ELECTRODE HEIGHT : "
WRITE(23, 5003) AXC
WRITE(23, '(A,$)') "AVERAGE CURRENT="

```

```

WRITE (23, 5002) CURR
WRITE (23, ' (A, $) ' ) "DELTA TIME="
WRITE (23, 5002) DT

DO 1000 III=1, 10000 ! 単位時間当たりの計算開始

DO 300 J=1+2, YD2
DO 310 I=1, X
N=(J-1)*X+I
R(N)=FNR2; C(N)=FNC2; RO(N)=R02 ! 電極要素の電気抵抗率・比熱の定義
310 CONTINUE
300 CONTINUE

DO 320 J=(YD2+1), Y-2 ! 鉄要素
DO 330 I=1, X
N=(J-1)*X+I

IF ( T(N) .LE. 770.0 ) THEN ! 抵抗
R(N)=FNRL( T(N) )
ELSE
R(N)=FNRH( T(N) )
END IF

IF (T(N) .LE. 1000) THEN ! 比熱
DO 325 M=2, 14
IF ( ( T(N) .GT. ST(M-1)) .AND. ( T(N) .LE. ST(M) ) ) THEN
C(N)=(SC(M-1)*(ST(M)-T(N))+SC(M)*(T(N)-ST(M-1)))/(ST(M)-ST(M-1))
END IF
325 CONTINUE
ELSE
C(N)=SC(14)
END IF

RO(N)=R01
330 CONTINUE
320 CONTINUE

DO 340 I=1, X
N=X*YD2+I
IF ( TDM(I) .LE. T(N) ) TDM(I)=T(N) ! 発熱層の最高到達温度保持

IF (TDM(I) .LE. 619) CR(I)=FNRB1( TDM(I) ) ! 接触率(逆数)の決定
IF (TDM(I) .GT. 619 .AND. TDM(I) .LE. 795) CR(I)=FNRB2( TDM(I) )
IF (TDM(I) .GT. 795) CR(I)=FNRB3( TDM(I) )
340 CONTINUE

DO 350 J=14, 24 ! 仮想物体
DO 355 I=15, X
N=(J-1)*X+I
R(N)=FNR4; C(N)=FNC4; RO(N)=R04
355 CONTINUE
350 CONTINUE

DO 360 J=8, 13
DO 365 I=19, X
N=(J-1)*X+I

```

```

R(N)=FNR4;C(N)=FNC4;RO(N)=RO4
365 CONTINUE
360 CONTINUE
DO 370 J=3, 7
DO 375 I=23, X
N=(J-1)*X+I
R(N)=FNR4;C(N)=FNC4;RO(N)=RO4
375 CONTINUE
370 CONTINUE

```

```

DO 380 I=1, X*Y ! 行列の初期化
DO 390 J=1, X*Y
A(I, J)=0
390 CONTINUE
B(I)=0
380 CONTINUE

```

! 電流伝達の関係式を行列へ代入

```

DO 400 J=1, Y
DO 410 I=1, X
N=(J-1)*X+I

```

C 左上端の要素

```

IF (I.EQ.1 .AND. J.EQ.1) THEN
RR(N,3)=FNRR3(N,I,J);RR(N,4)=FNRR4(N,I,J)
A(N,N)=-1/RR(N,3)-1/RR(N,4)
A(N,N+1)=1/RR(N,3);A(N,N+X)=1/RR(N,4)
END IF

```

C 右上端の要素

```

IF (I.EQ.X .AND. J.EQ.1) THEN
RR(N,2)=FNRR2(N,I,J);RR(N,4)=FNRR4(N,I,J)
A(N,N)=-1/RR(N,2)-1/RR(N,4)
A(N,N-1)=1/RR(N,2);A(N,N+X)=1/RR(N,4)
END IF

```

C 左下端の要素

```

IF (I.EQ.1 .AND. J.EQ.Y) THEN
RR(N,1)=FNRR1(N,I,J);RR(N,3)=FNRR3(N,I,J)
A(N,N)=-1/RR(N,1)-1/RR(N,3)
A(N,N-X)=1/RR(N,1);A(N,N+1)=1/RR(N,3)
END IF

```

C 右下端の要素

```

IF (I.EQ.X .AND. J.EQ.Y) THEN
RR(N,1)=FNRR1(N,I,J);RR(N,2)=FNRR2(N,I,J)
A(N,N)=-1/RR(N,1)-1/RR(N,2)
A(N,N-X)=1/RR(N,1);A(N,N-1)=1/RR(N,2)
END IF

```

C 天面列の要素

```

IF ((.NOT. I.EQ.1) .AND. (.NOT. I.EQ.X) .AND. J.EQ.1) THEN
RR(N,2)=FNRR2(N,I,J);RR(N,3)=FNRR3(N,I,J);RR(N,4)=FNRR4(N,I,J)
A(N,N)=-1/RR(N,2)-1/RR(N,3)-1/RR(N,4)
A(N,N-1)=1/RR(N,2);A(N,N+1)=1/RR(N,3);A(N,N+X)=1/RR(N,4)
END IF

```

C 左面列の要素

```

IF (I.EQ.1 .AND. (.NOT. J.EQ.1) .AND. (.NOT. J.EQ.Y)) THEN
RR(N,1)=FNRR1(N,I,J);RR(N,3)=FNRR3(N,I,J);RR(N,4)=FNRR4(N,I,J)
A(N,N)=-1/RR(N,1)-1/RR(N,3)-1/RR(N,4)

```

```
A(N, N-X)=1/RR(N, 1) ; A(N, N+1)=1/RR(N, 3) ; A(N, N+X)=1/RR(N, 4)
END IF
```

C 右面列の要素

```
IF (I. EQ. X . AND. (. NOT. J. EQ. 1) . AND. (. NOT. J. EQ. Y)) THEN
RR(N, 1)=FNRR1(N, I, J) ; RR(N, 2)=FNRR2(N, I, J) ; RR(N, 4)=FNRR4(N, I, J)
A(N, N)=-1/RR(N, 1)-1/RR(N, 2)-1/RR(N, 4)
A(N, N-X)=1/RR(N, 1) ; A(N, N-1)=1/RR(N, 2) ; A(N, N+X)=1/RR(N, 4)
END IF
```

C 地面列の要素

```
IF ((. NOT. I. EQ. 1) . AND. (. NOT. I. EQ. X) . AND. J. EQ. Y) THEN
RR(N, 1)=FNRR1(N, I, J) ; RR(N, 2)=FNRR2(N, I, J) ; RR(N, 3)=FNRR3(N, I, J)
A(N, N)=-1/RR(N, 1)-1/RR(N, 2)-1/RR(N, 3)
A(N, N-X)=1/RR(N, 1) ; A(N, N-1)=1/RR(N, 2) ; A(N, N+1)=1/RR(N, 3)
END IF
```

C 内部の要素

```
IF ((. NOT. I. EQ. 1) . AND. (. NOT. I. EQ. X) . AND.
A(. NOT. J. EQ. 1) . AND. (. NOT. J. EQ. Y)) THEN
RR(N, 1)=FNRR1(N, I, J) ; RR(N, 2)=FNRR2(N, I, J)
RR(N, 3)=FNRR3(N, I, J) ; RR(N, 4)=FNRR4(N, I, J)
A(N, N)=-1/RR(N, 1)-1/RR(N, 2)-1/RR(N, 3)-1/RR(N, 4) !自身
A(N, N-X)=1/RR(N, 1) ; A(N, N-1)=1/RR(N, 2) ! 上・右
A(N, N+1)=1/RR(N, 3) ; A(N, N+X)=1/RR(N, 4) ! 左・下
END IF
```

410 CONTINUE

400 CONTINUE ! 代入終わり

DO 430 I=2, X-1 ! 発熱層部の再定義

```
N=(YD2-1)*X+I
RR(N, 4)=CR(I)*RR(N, 4)
A(N, N)=-1/RR(N, 1)-1/RR(N, 2)-1/RR(N, 3)-1/RR(N, 4) ; A(N, N+X)=1/RR(N, 4)
```

```
N=YD2*X+I
RR(N, 1)=CR(I)*RR(N, 1)
A(N, N)=-1/RR(N, 1)-1/RR(N, 2)-1/RR(N, 3)-1/RR(N, 4) ; A(N, N-X)=1/RR(N, 1)
```

430 CONTINUE

```
N=(YD2-1)*X+1
RR(N, 4)=CR(1)*RR(N, 4)
A(N, N)=-1/RR(N, 1)-1/RR(N, 3)-1/RR(N, 4) ; A(N, N+X)=1/RR(N, 4)
N=YD2*X
RR(N, 4)=CR(X)*RR(N, 4)
A(N, N)=-1/RR(N, 1)-1/RR(N, 2)-1/RR(N, 4) ; A(N, N+X)=1/RR(N, 4)
N=YD2*X+1
RR(N, 1)=CR(1)*RR(N, 1)
A(N, N)=-1/RR(N, 1)-1/RR(N, 3)-1/RR(N, 4) ; A(N, N-X)=1/RR(N, 1)
N=(YD2+1)*X
RR(N, 1)=CR(X)*RR(N, 1)
A(N, N)=-1/RR(N, 1)-1/RR(N, 2)-1/RR(N, 4) ; A(N, N-X)=1/RR(N, 1)
```

CURD=SQRT(2.0)*CURR*SIN(2*3.141592654*60*DT*I) ! 交流波に変換

DO 450 I=1, 22

B(I)=-CURD*D1(I)*CS(I)/AXE ! 上端の電流入力

450 CONTINUE

DO 460 I=1, X

```

B( (Y-1)*X+I )=CURD*D1(I)*CS(I)/AXF ! 下端の電流入力
460 CONTINUE

DO 500 KK=1, X*Y-1 ! ガウスの消去法/前進消去
ALFA=A(KK, KK)
DO 510 J=1, X*Y !K列目のK項目の係数が1となるようする
A(KK, J)=A(KK, J)/( ALFA )
510 CONTINUE
B(KK)=B(KK)/( ALFA )

DO 520 I=KK+1, X*Y
BETA=A(I, KK)

DO 530 J=KK, X*Y
A(I, J)=A(I, J)-BETA*A(KK, J)
530 CONTINUE
B(I)=B(I)-BETA*B(KK)
520 CONTINUE
500 CONTINUE

B(X*Y)=B(X*Y)/A(X*Y, X*Y) ! 最終列の計算
A(X*Y, X*Y)=1

DO 560 KK=X*Y, 1+1, -1 ! 後退代入
DO 570 I=KK-1, 1, -1
BETA=A(I, KK)

DO 580 J=1, KK
A(I, J)=A(I, J)-BETA*A(KK, J)
580 CONTINUE
B(I)=B(I)-BETA*B(KK)
570 CONTINUE
560 CONTINUE ! ガウスの消去法終わり

DO 600 J=1, Y ! 通電発熱による温度上昇の計算
DO 610 I=1, X
N=(J-1)*X+I
TD(N)=0.0

IF (I.EQ.1 .AND. J.EQ.1) THEN
SJ(N, 3)=FNJJ3(N, I, J); SJ(N, 4)=FNJJ4(N, I, J)
TD(N)=( SJ(N, 3)+SJ(N, 4) )*FQTT(N, I, J)
END IF

IF (I.EQ.X .AND. J.EQ.1) THEN
SJ(N, 2)=FNJJ2(N, I, J); SJ(N, 4)=FNJJ4(N, I, J)
TD(N)=( SJ(N, 2)+SJ(N, 4) )*FQTT(N, I, J)
END IF

IF (I.EQ.1 .AND. J.EQ.Y) THEN
SJ(N, 1)=FNJJ1(N, I, J); SJ(N, 3)=FNJJ3(N, I, J)
TD(N)=( SJ(N, 1)+SJ(N, 3) )*FQTT(N, I, J)
END IF

IF (I.EQ.X .AND. J.EQ.Y) THEN

```

```
SJ(N, 1)=FNJJ1(N, I, J) ; SJ(N, 2)=FNJJ2(N, I, J)
TD(N)=( SJ(N, 1)+SJ(N, 2) ) *FQTT(N, I, J)
END IF
```

```
IF ((.NOT. I. EQ. 1) .AND. (.NOT. I. EQ. X) .AND. J. EQ. 1) THEN
SJ(N, 2)=FNJJ2(N, I, J) ; SJ(N, 3)=FNJJ3(N, I, J)
SJ(N, 4)=FNJJ4(N, I, J)
TD(N)=( SJ(N, 2)+SJ(N, 3)+SJ(N, 4) ) *FQTT(N, I, J)
END IF
```

```
IF (I. EQ. 1 .AND. (.NOT. J. EQ. 1) .AND. (.NOT. J. EQ. Y)) THEN
SJ(N, 1)=FNJJ1(N, I, J) ; SJ(N, 3)=FNJJ3(N, I, J) ; SJ(N, 4)=FNJJ4(N, I, J)
TD(N)=( SJ(N, 1)+SJ(N, 3)+SJ(N, 4) ) *FQTT(N, I, J)
END IF
```

```
IF (I. EQ. X .AND. (.NOT. J. EQ. 1) .AND. (.NOT. J. EQ. Y)) THEN
SJ(N, 1)=FNJJ1(N, I, J) ; SJ(N, 2)=FNJJ2(N, I, J) ; SJ(N, 4)=FNJJ4(N, I, J)
TD(N)=( SJ(N, 1)+SJ(N, 2)+SJ(N, 4) ) *FQTT(N, I, J)
END IF
```

```
IF ((.NOT. I. EQ. 1) .AND. (.NOT. I. EQ. X) .AND. J. EQ. Y) THEN
SJ(N, 1)=FNJJ1(N, I, J) ; SJ(N, 2)=FNJJ2(N, I, J) ; SJ(N, 3)=FNJJ3(N, I, J)
TD(N)=( SJ(N, 1)+SJ(N, 2)+SJ(N, 3) ) *FQTT(N, I, J)
END IF
```

```
IF ((.NOT. I. EQ. 1) .AND. (.NOT. I. EQ. X) .AND.
A(.NOT. J. EQ. 1) .AND. (.NOT. J. EQ. Y)) THEN
SJ(N, 1)=FNJJ1(N, I, J) ; SJ(N, 2)=FNJJ2(N, I, J)
SJ(N, 3)=FNJJ3(N, I, J) ; SJ(N, 4)=FNJJ4(N, I, J)
TD(N)=( SJ(N, 1)+SJ(N, 2)+SJ(N, 3)+SJ(N, 4) ) *FQTT(N, I, J)
END IF
```

T(N)=T(N)+TD(N) ! ジュール発熱による温度変化

610 CONTINUE

600 CONTINUE

DO 700 J=1+2, YD2 ! 銅要素の熱伝導率

DO 710 I=1, X

N=(J-1)*X+I

SK(N)=FNK2

710 CONTINUE

700 CONTINUE

DO 720 J=YD2+1, Y-2 ! 鉄要素

DO 730 I=1, X

N=(J-1)*X+I

SK(N)=FNK(T(N))

730 CONTINUE

720 CONTINUE

DO 740 J=14, YD2 ! 仮要素

DO 745 I=15, X

N=(J-1)*X+I

SK(N)=FNK4

745 CONTINUE

740 CONTINUE

DO 750 J=8, 13

DO 755 I=19, X

N=(J-1)*X+I

SK(N)=FNK4

755 CONTINUE

750 CONTINUE

DO 760 J=3, 7

DO 765 I=23, X

N=(J-1)*X+I

SK(N)=FNK4

765 CONTINUE

760 CONTINUE

DO 800 J=1, Y ! 各要素の伝熱の計算

DO 810 I=1, X

N=(J-1)*X+I

TD(N)=0

IF (I. EQ. 1 . AND. J. EQ. 1) THEN

Q(N, 3)=FNCK3(N, I)*FNQD3(N, I, J); Q(N, 4)=FNCK4(N, J)*FNQD4(N, I, J)

TD(N)=(Q(N, 3)+Q(N, 4)) *FQTT(N, I, J)

END IF

IF (I. EQ. X . AND. J. EQ. 1) THEN

Q(N, 2)=FNCK2(N, I)*FNQD2(N, I, J); Q(N, 4)=FNCK4(N, J)*FNQD4(N, I, J)

TD(N)=(Q(N, 2)+Q(N, 4)) *FQTT(N, I, J)

END IF

IF (I. EQ. 1 . AND. J. EQ. Y) THEN

Q(N, 1)=FNCK1(N, J)*FNQD1(N, I, J); Q(N, 3)=FNCK3(N, I)*FNQD3(N, I, J)

TD(N)=(Q(N, 1)+Q(N, 3)) *FQTT(N, I, J)

END IF

IF (I. EQ. X . AND. J. EQ. Y) THEN

Q(N, 1)=FNCK1(N, J)*FNQD1(N, I, J); Q(N, 2)=FNCK2(N, I)*FNQD2(N, I, J)

TD(N)=(Q(N, 1)+Q(N, 2)) *FQTT(N, I, J)

END IF

IF ((. NOT. I. EQ. 1) . AND. (. NOT. I. EQ. X) . AND. J. EQ. 1) THEN

Q(N, 2)=FNCK2(N, I)*FNQD2(N, I, J); Q(N, 3)=FNCK3(N, I)*FNQD3(N, I, J)

Q(N, 4)=FNCK4(N, J)*FNQD4(N, I, J)

TD(N)=(Q(N, 2)+Q(N, 3)+Q(N, 4)) *FQTT(N, I, J)

END IF

IF (I. EQ. 1 . AND. (. NOT. J. EQ. 1) . AND. (. NOT. J. EQ. Y)) THEN

Q(N, 1)=FNCK1(N, J)*FNQD1(N, I, J); Q(N, 3)=FNCK3(N, I)*FNQD3(N, I, J)

Q(N, 4)=FNCK4(N, J)*FNQD4(N, I, J)

TD(N)=(Q(N, 1)+Q(N, 3)+Q(N, 4)) *FQTT(N, I, J)

END IF

IF (I. EQ. X . AND. (. NOT. J. EQ. 1) . AND. (. NOT. J. EQ. Y)) THEN

Q(N, 1)=FNCK1(N, J)*FNQD1(N, I, J); Q(N, 2)=FNCK2(N, I)*FNQD2(N, I, J)

Q(N, 4)=FNCK4(N, J)*FNQD4(N, I, J)

TD(N)=(Q(N, 1)+Q(N, 2)+Q(N, 4)) *FQTT(N, I, J)

END IF

```
IF ((.NOT. I.EQ.1).AND.(.NOT. I.EQ.X).AND. J.EQ.Y) THEN
Q(N,1)=FNCK1(N,J)*FNQD1(N,I,J);Q(N,2)=FNCK2(N,I)*FNQD2(N,I,J)
Q(N,3)=FNCK3(N,I)*FNQD3(N,I,J)
TD(N)=(Q(N,1)+Q(N,2)+Q(N,3))*FQTT(N,I,J)
END IF
```

```
IF ((.NOT. I.EQ.1).AND.(.NOT. I.EQ.X).AND.
A(.NOT. J.EQ.1).AND.(.NOT. J.EQ.Y)) THEN
Q(N,1)=FNCK1(N,J)*FNQD1(N,I,J);Q(N,2)=FNCK2(N,I)*FNQD2(N,I,J)
Q(N,3)=FNCK3(N,I)*FNQD3(N,I,J);Q(N,4)=FNCK4(N,J)*FNQD4(N,I,J)
TD(N)=(Q(N,1)+Q(N,2)+Q(N,3)+Q(N,4))*FQTT(N,I,J)
END IF
```

810 CONTINUE

800 CONTINUE

```
DO 820 I=2, X-1 ! 発熱層部の再定義
J=YD2
N=(YD2-1)*X+I
Q(N,4)=Q(N,4)/CR(I)
TD(N)=(Q(N,1)+Q(N,2)+Q(N,3)+Q(N,4))*FQTT(N,I,J)
```

```
N=YD2*X+I
J=YD2+1
Q(N,1)=Q(N,1)/CR(I)
TD(N)=(Q(N,1)+Q(N,2)+Q(N,3)+Q(N,4))*FQTT(N,I,J)
```

820 CONTINUE

```
N=(YD2-1)*X+1
I=1;J=YD2
Q(N,4)=Q(N,4)/CR(I)
TD(N)=(Q(N,1)+Q(N,3)+Q(N,4))*FQTT(N,I,J)
N=YD2*X;I=X
Q(N,4)=Q(N,4)/CR(I)
TD(N)=(Q(N,1)+Q(N,2)+Q(N,4))*FQTT(N,I,J)
N=YD2*X+1;J=YD2+1;I=1
Q(N,1)=Q(N,1)/CR(I)
TD(N)=(Q(N,1)+Q(N,3)+Q(N,4))*FQTT(N,I,J)
N=(YD2+1)*X;I=X
Q(N,1)=Q(N,1)/CR(I)
TD(N)=(Q(N,1)+Q(N,2)+Q(N,4))*FQTT(N,I,J)
```

```
DO 840 N=1, X*Y
T(N)=T(N)+TD(N) ! 熱伝導による温度変化
```

840 CONTINUE

```
CII=III
IF ((CII/MEMO).EQ.(III/MEMO)) THEN
WRITE(23,5004) III
IF ((CII/MEMO2).EQ.(III/MEMO2)) THEN
```

```
DO 900 J=1, Y ! 温度の出力
```

```
DO 910 I=1, X-1
```



```

N=(J-1)*X+I
WRITE (23, 5001) T (N)
910 CONTINUE
N=J*X
WRITE (23, 5002) T (N)
900 CONTINUE
WRITE (23, *) ""

AXG=B (1)
DO 930 I=2, X*Y
IF ( B (I) .LT. AXG ) AXG=B (I)
930 CONTINUE

DO 940 I=1, X*Y
B (I)=B (I)-AXG
940 CONTINUE
DO 950 J=1, Y ! 電位の出力
DO 960 I=1, X-1
N=(J-1)*X+I
WRITE (23, 5001) B (N)
960 CONTINUE
WRITE (23, 5002) B (J*X)
950 CONTINUE
WRITE (23, *) ""

ELSE
AXH=T (1)
DO 980 N=2, X*Y
IF ( T (N) .GT. AXH) AXH=T (N)
980 CONTINUE
WRITE (23, 5003) AXH
END IF
END IF

WRITE (6, 5004) III

1000 CONTINUE ! 単位時間繰り返しの終了

WRITE (23, *) "AIR COOLING PROCESS" ! 空冷過程
DO 1900 IIII=1, 10000

DO 1500 J=1+2, YD2 !銅要素の熱伝導率
DO 1510 I=1, X
N=(J-1)*X+I
SK (N)=FNK2
1510 CONTINUE
1500 CONTINUE

DO 1520 J=YD2+1, Y-2 ! 鉄要素
DO 1530 I=1, X
N=(J-1)*X+I
SK (N)=FNK ( T (N) )
1530 CONTINUE
1520 CONTINUE

```

```

DO 1540 J=14, YD2 ! 仮想要素
DO 1545 I=15, X
N=(J-1)*X+I
SK(N)=FNK3
1545 CONTINUE
1540 CONTINUE
DO 1550 J=8, 13
DO 1555 I=19, X
N=(J-1)*X+I
SK(N)=FNK3
1555 CONTINUE
1550 CONTINUE
DO 1560 J=3, 7
DO 1565 I=23, X
N=(J-1)*X+I
SK(N)=FNK3
1565 CONTINUE
1560 CONTINUE

DO 1600 J=1, Y ! 熱伝導の計算
DO 1610 I=1, X
N=(J-1)*X+I

IF (I. EQ. 1 .AND. J. EQ. 1) THEN
Q(N, 3)=FNCK3(N, I)*FNQD3(N, I, J); Q(N, 4)=FNCK4(N, J)*FNQD4(N, I, J)
TD(N)=( Q(N, 3)+Q(N, 4) ) *FQTT(N, I, J)
END IF

IF (I. EQ. X .AND. J. EQ. 1) THEN
Q(N, 2)=FNCK2(N, I)*FNQD2(N, I, J); Q(N, 4)=FNCK4(N, J)*FNQD4(N, I, J)
TD(N)=( Q(N, 2)+Q(N, 4) ) *FQTT(N, I, J)
END IF

IF (I. EQ. 1 .AND. J. EQ. Y) THEN
Q(N, 1)=FNCK1(N, J)*FNQD1(N, I, J); Q(N, 3)=FNCK3(N, I)*FNQD3(N, I, J)
TD(N)=( Q(N, 1)+Q(N, 3) ) *FQTT(N, I, J)
END IF

IF (I. EQ. X .AND. J. EQ. Y) THEN
Q(N, 1)=FNCK1(N, J)*FNQD1(N, I, J); Q(N, 2)=FNCK2(N, I)*FNQD2(N, I, J)
TD(N)=( Q(N, 1)+Q(N, 2) ) *FQTT(N, I, J)
END IF

IF ((.NOT. I. EQ. 1) .AND. (.NOT. I. EQ. X) .AND. J. EQ. 1) THEN
Q(N, 2)=FNCK2(N, I)*FNQD2(N, I, J); Q(N, 3)=FNCK3(N, I)*FNQD3(N, I, J)
Q(N, 4)=FNCK4(N, J)*FNQD4(N, I, J)
TD(N)=( Q(N, 2)+Q(N, 3)+Q(N, 4) ) *FQTT(N, I, J)
END IF

IF (I. EQ. 1 .AND. (.NOT. J. EQ. 1) .AND. (.NOT. J. EQ. Y)) THEN
Q(N, 1)=FNCK1(N, J)*FNQD1(N, I, J); Q(N, 3)=FNCK3(N, I)*FNQD3(N, I, J)
Q(N, 4)=FNCK4(N, J)*FNQD4(N, I, J)
TD(N)=( Q(N, 1)+Q(N, 3)+Q(N, 4) ) *FQTT(N, I, J)
END IF

```

```

IF (I.EQ.X .AND. (.NOT. J.EQ.1) .AND. (.NOT. J.EQ.Y)) THEN
Q(N,1)=FNCK1(N,J)*FNQD1(N,I,J); Q(N,2)=FNCK2(N,I)*FNQD2(N,I,J)
Q(N,4)=FNCK4(N,J)*FNQD4(N,I,J)
TD(N)=( Q(N,1)+Q(N,2)+Q(N,4) ) *FQTT(N,I,J)
END IF

```

```

IF ((.NOT. I.EQ.1) .AND. (.NOT. I.EQ.X) .AND. J.EQ.Y) THEN
Q(N,1)=FNCK1(N,J)*FNQD1(N,I,J); Q(N,2)=FNCK2(N,I)*FNQD2(N,I,J)
Q(N,3)=FNCK3(N,I)*FNQD3(N,I,J)
TD(N)=( Q(N,1)+Q(N,2)+Q(N,3) ) *FQTT(N,I,J)
END IF

```

```

IF ((.NOT. I.EQ.1) .AND. (.NOT. I.EQ.X) .AND.
A(.NOT. J.EQ.1) .AND. (.NOT. J.EQ.Y)) THEN
Q(N,1)=FNCK1(N,J)*FNQD1(N,I,J); Q(N,2)=FNCK2(N,I)*FNQD2(N,I,J)
Q(N,3)=FNCK3(N,I)*FNQD3(N,I,J); Q(N,4)=FNCK4(N,J)*FNQD4(N,I,J)
TD(N)=( Q(N,1)+Q(N,2)+Q(N,3)+Q(N,4) ) *FQTT(N,I,J)
END IF

```

1610 CONTINUE

1600 CONTINUE

```

DO 1620 I=2, X-1 ! 発熱層部の再定義
J=YD2
N=(YD2-1)*X+I
Q(N,4)=Q(N,4)/CR(I)
TD(N)=( Q(N,1)+Q(N,2)+Q(N,3)+Q(N,4) ) *FQTT(N,I,J)

```

```

N=YD2*X+I
J=YD2+1
Q(N,1)=Q(N,1)/CR(I)
TD(N)=( Q(N,1)+Q(N,2)+Q(N,3)+Q(N,4) ) *FQTT(N,I,J)

```

1620 CONTINUE

```

N=(YD2-1)*X+1; I=1; J=YD2
Q(N,4)=Q(N,4)/CR(I)
TD(N)=( Q(N,1)+Q(N,3)+Q(N,4) ) *FQTT(N,I,J)
N=YD2*X; I=X
Q(N,4)=Q(N,4)/CR(I)
TD(N)=( Q(N,1)+Q(N,2)+Q(N,4) ) *FQTT(N,I,J)
N=YD2*X+1; J=YD2+1; I=1
Q(N,1)=Q(N,1)/CR(I)
TD(N)=( Q(N,1)+Q(N,3)+Q(N,4) ) *FQTT(N,I,J)
N=(YD2+1)*X; I=X
Q(N,1)=Q(N,1)/CR(I)
TD(N)=( Q(N,1)+Q(N,2)+Q(N,4) ) *FQTT(N,I,J)

```

```
DO 1630 N=1, X*Y
```

```
T(N)=T(N)+TD(N)
```

1630 CONTINUE

```

CIII=IIII
IF ( (CIII/MEMO3) .EQ. (IIII/MEMO3) ) THEN
WRITE(23,5004) IIII
DO 1700 J=1, Y

```

```
DO 1710 I=1, X-1
N=(J-1)*X+I
WRITE (23, 5001) T(N) ! 温度の出力
1710 CONTINUE
N=(J-1)*X+I
WRITE (23, 5002) T(N)
1700 CONTINUE
WRITE (23, *) ""
END IF

1900 CONTINUE

CLOSE (23)
STOP

5001 FORMAT (1H , 1F10.5, $) ! 電位差・温度
5002 FORMAT (1H , 1F10.5)
5003 FORMAT (1H , 1F7.2)
5004 FORMAT (1H , 1I5) ! 整数型用
END
```