

プラズマ切断時の電極割れに関する力学的検討

大阪府立大学大学院

○松本直博, 柴原正和
正岡孝治

大阪大学

田中 学

中部電力

田中和士

日酸 TANAKA

佐野義美

東邦金属

秋吉直義

Mechanical Study of Cracks in Electrode Under Plasma Arc Cutting

By Masakazu SHIBAHARA, Naohiro MATSUMOTO, Koji MASAOKA, Manabu TANAKA
Kazushi TANAKA, Yoshimi SANO and Naoyoshi AKIYOSHI

1. 緒言

プラズマ切断とは、トーチ内部の電極と切断対象物との間にアーク放電を行い、その熱を利用し、プラズマを発生させ切断する方式であり、橋梁や船舶を建造する際によく用いられる方法である。また、ガス切断に比べ、高速かつ歪の少ない切断が可能であり、約 1mm~30mm の中程度の板厚の鋼板を切断する際に良く用いられる方法である。特に、軟鋼 9mm~25mm の範囲においてはガス切断に比べ約 5 倍、レーザー切断と比べても、約 2.5 倍程度の高速切断が可能であり、ピアシング時間もガス切断やレーザー切断に比べ圧倒的に短く、作業効率のよい切断方法¹⁻³⁾である。

現在、プラズマ切断装置の電極部に用いられる材料として、高融点である通電性セラミックス(EC)電極の開発が試みられているが、電極部に割れが発生する場合があります。そこで、実験的手法により割れの発生原因を特定する方法について検討されているが、使用される電極チップの大きさは数ミリ程度と小さく、なおかつ数千度以上という非常に高温な環境で使用されるため、切断途中における電極内部に発生する応力、ひずみの測定が非常に困難である。そこで本研究では、測定困難な応力分布を推定するために、プラズマジェット一体化モデルを用いた電磁熱流体解析⁴⁾を実施することにより、電極部周辺における熱流束を求めた。さらには、得られた結果を基に、FEM 熱弾塑性解析⁵⁾を実施することにより、応力・ひずみを評価できる一連の解析システムを構築した。本研究では、この解析システムを用いて電極部における電極形状や水冷部形状等が、割れの原因と考えられる過渡応力に及ぼす影響について検討した。

2. プラズマジェット一体化モデルを用いた電磁熱流体解析

Fig.1 に示すように、プラズマ切断装置のトーチ内部は通電性セラミックスを材料とする電極チップ部、銅シース部、銅陽極部および水冷部から構成されるが、切断時に、通電性セラミックス電極チップ部において、Fig.2 に示すような横割れが発生する場合があります。そこで本研究では、プラズマジェ

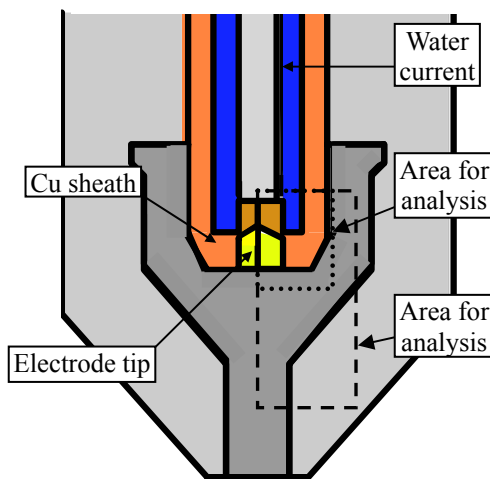


Fig.1 Schematic illustration of torch for plasma cutting.

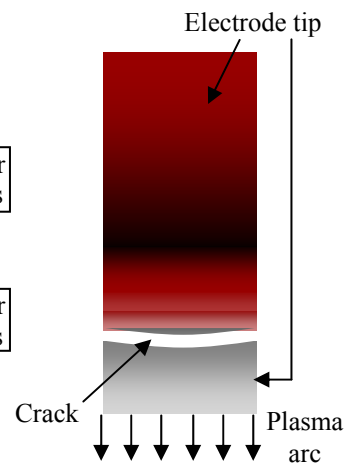


Fig.2 Schematic illustration of Electrode tip crack.

ット一体化モデルを用いた電磁熱流体解析⁴⁾により電極部分の発熱分布を求め、得られた結果を基に FEM 熱弾塑性解析を実施することにより、横割れとの直接的な関係が予想される応力分布について検討を行った。本章では、電磁熱流体解析について述べる。

2. 1 解析モデル

本研究で用いた電磁熱流体解析は、層流および非圧縮性を仮定した電磁流体方程式、および、質量保存則、運動量保存則、エネルギー保存則、電荷保存則、オームの法則を SIMPLEX 法⁶⁾を用いて解くことにより、定常状態におけるアークプラズマ特性を求める手法⁵⁾である。なお、計算方法の詳細は、文献^{7,8)}と同様である。電流値および作動ガスをそれぞれ 400A および 50 l/min とした。境界条件としては、計算領域の周囲および水冷部を 300K とし、電極中央部を対称軸とする軸対称問題として取り扱った。

2. 2 解析結果

解析に用いたトーチ内部の形状および寸法は Fig.3 に示す通りとし、電極チップ半径が 3mm の場合における解析結果を Fig.4 に示す。同図より、電極チップ下方にある陽極の突出部付近において最高温度が 33000K もの高温となり、また、その部分において動作ガスが絞られるため流速が大きくなることが確認できる。なお、電極部表面においては、Fig.5 に示すように、高温プラズマによる伝導加熱と、イオン流束による加熱に対する放射による熱損失と、熱電子放出による熱損失とのエネルギーバランスによる影響により、合計 1225 W の熱が発生していることが確認できる。その最大位置は、EC-Cu 界面部の EC 側であることが分かる。

次に、電極径が 1.0 mm, 1.3 mm および 2.0 mm の三通りの場合における表面発熱の分布および電極内部に発生するジュール発熱の分布を求めた結果を Fig.6 および Fig.7 に示す。なお、初期条件は Fig.5 の場合と同じものを用いた。この結果より、いずれの場合においても、表面発熱の最大位置は $r=1.0\text{ mm}\sim 1.3\text{ mm}$ 付近であり、また、ジュール発熱に関しては、電極中央部および EC-Cu 界面部の表面側で大きな値を示すことが確認できる。

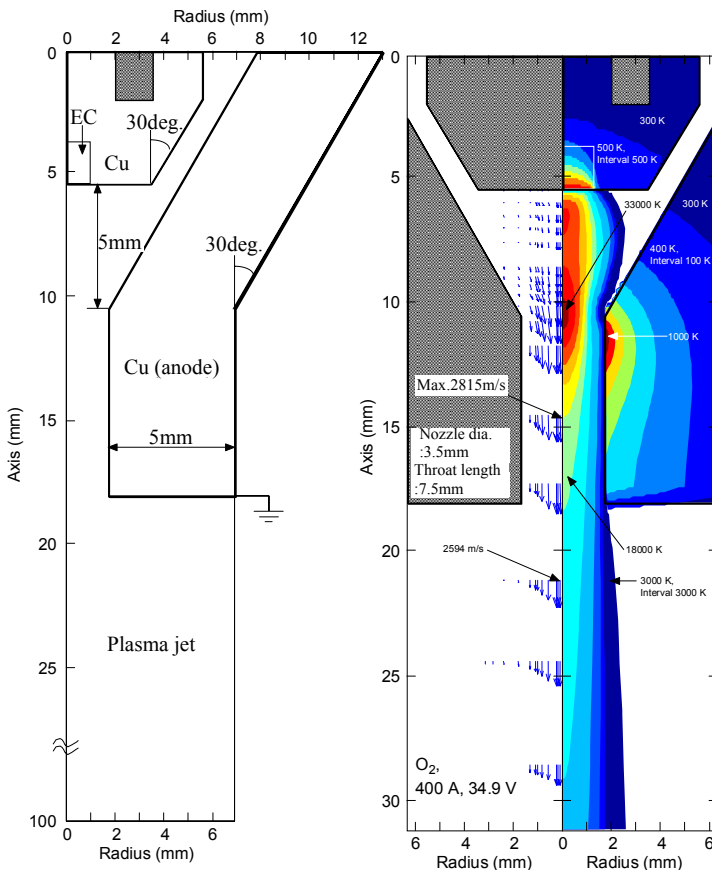


Fig.3 Shape and size of analytical model.

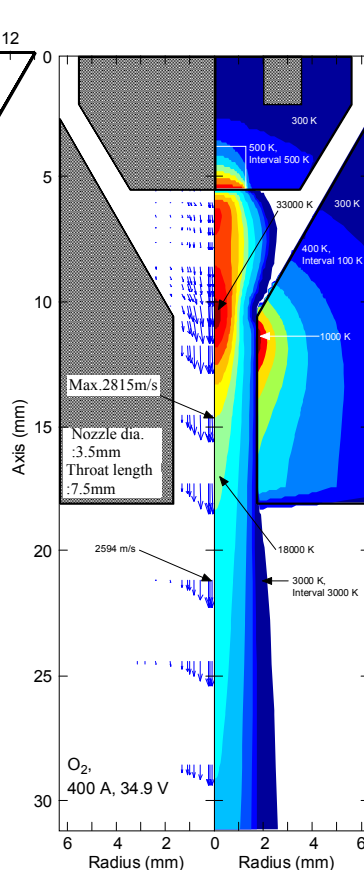


Fig.4 Temperature and plasma current distribution.

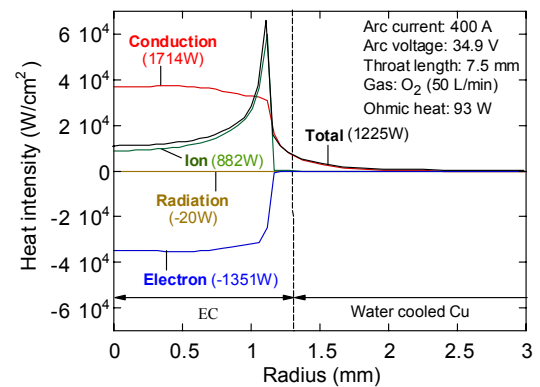


Fig.5 Radial distribution of heat intensity component on electrode surface.

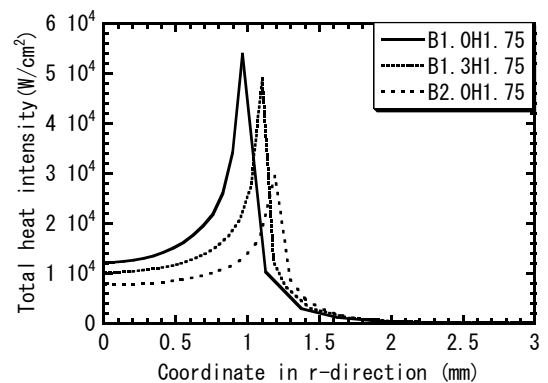


Fig.6 Radial distribution of total heat intensity on electrode surface.

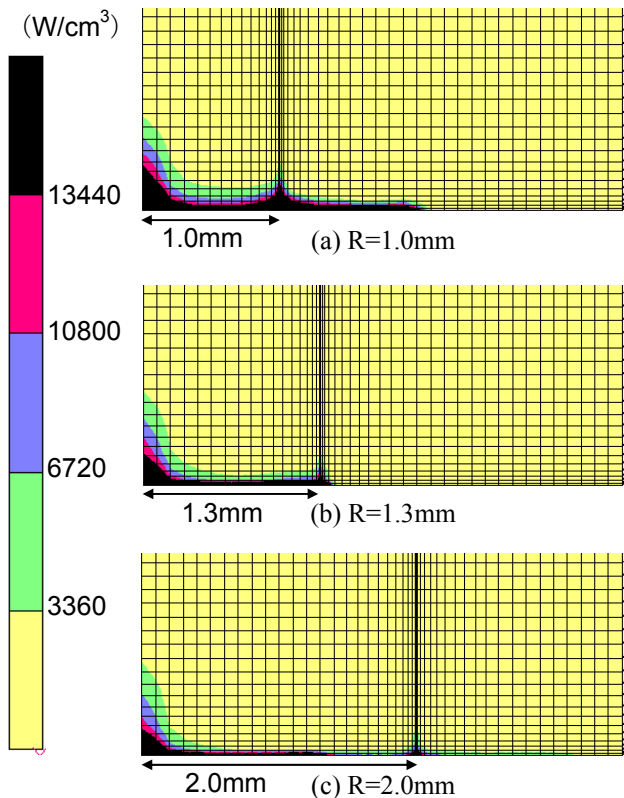


Fig.7 Distribution of joule heating.

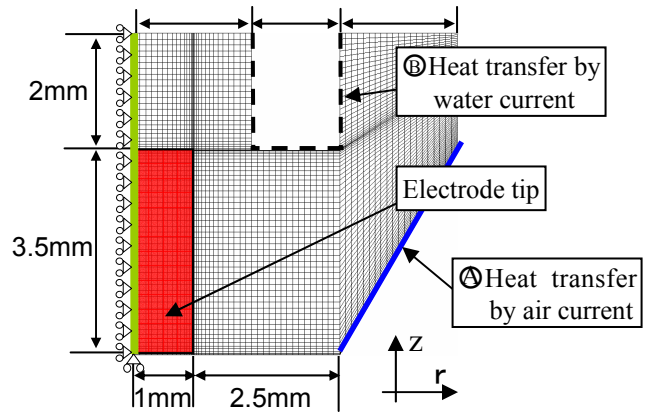


Fig.8 FE Mesh divisions (R1.0H3.50).

3. FEM 熱弾塑性解析法によるプラズマ切断電極の応力解析

本章では、第2章に示した電磁熱流体解析により求められた発熱分布を用いた応力解析法およびその結果について述べる。

FEM 熱弾塑性解析法を用いた応力解析における解析対称は、割れに影響を及ぼす可能性のある電極先端部とした。また、Fig.8 に示す諸寸法を基本条件とし、以後、各節における検討項目以外の条件は、

特に断りのない限りここに示した値を用いることにする。なお、解析対象である電極部は軸対称形状なので、Fig.8 に示す解析モデルの左端を対称軸とする軸対称問題として解析を行った。また、解析で用いた幾何学的境界条件は Fig.8 に示す通り、左端の全ての節点を r 方向に拘束し、電極下部における左端部の節点を z 方向に拘束している。一方、熱的境界条件としては、A 部においてシールドガスとの熱伝達を想定した熱伝達係数を用い、また、B 部においては冷却水との熱伝達により十分高い冷却効果が得られることを考慮し、熱伝達係数を A 部の 10^7 倍とした。電極チップ部、および銅シース部それぞれの材料である、通電性セラミックスおよび銅の材料定数の温度依存性を Fig.9(a)および(b)に示す。図中の各定数は、次の通りである。

σ_y : 降伏応力, E : ヤング率, α : 線膨張係数, ν : ポアソン比, λ : 熱伝導率,

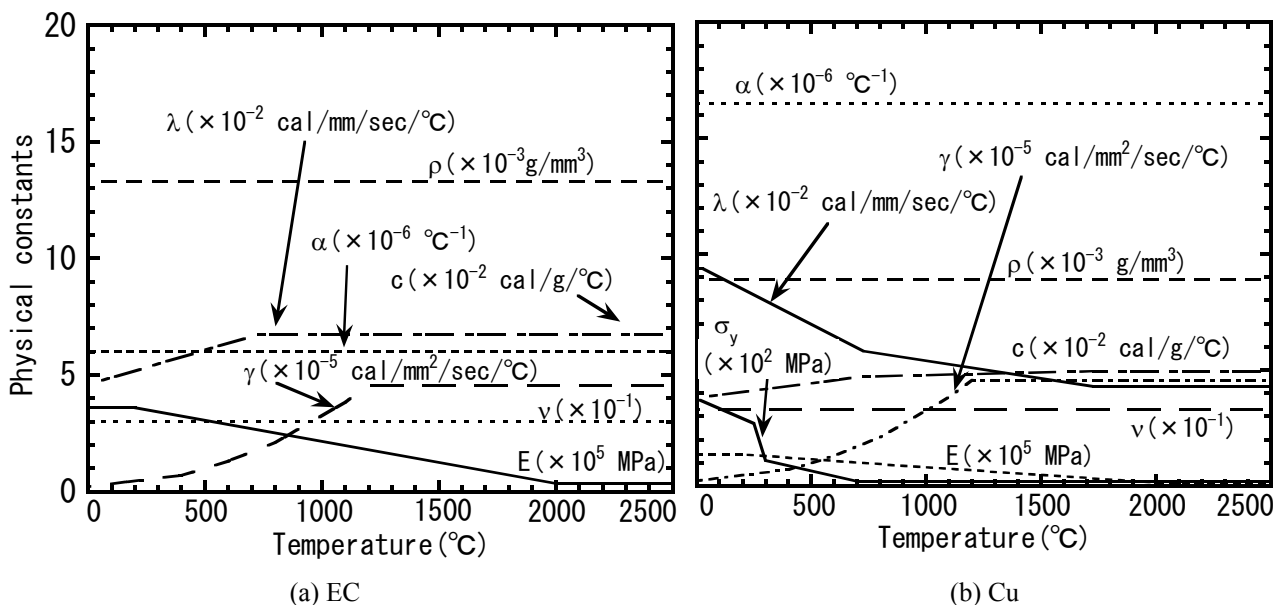


Fig.9 Temperature dependent physical constants.

ρ : 密度, c : 比熱, γ : 熱伝達係数

同図より, 通電性セラミックスは銅に比べてヤング率が高く, 線膨張係数および常温時における熱伝導率が低いことが分かる. ただし, 今回の解析においては, 通電性セラミックスの降伏応力が不明なため, 通電性セラミックス部分は弾性体として取り扱った.

入熱に関しては, 切断時において電極下部がアークから受ける熱の移動を表面発熱として考慮し, また, 通電により電極内部で発生するジュール発熱を要素内部発熱として考慮した.

3. 1 電極チップ径の影響について

3. 1. 1 解析モデル

電極チップ径が割れに及ぼす影響について検討するために, Fig.10 に示す電極チップ径の異なる3つの解析モデルを仮定した. case-1~3 の電極チップ半径は, それぞれ1.0mm, 1.3mm および2.0mm である.

3. 1. 2 解析結果

非定常熱弾塑性解析を実施した結果を Fig.11~13 に示す. Fig.11~13 の(a)は発熱と熱の拡散がつりあう状態, すなわち定常状態における温度分布を示し, (b)および(c)はそれぞれ定常状態における半径方向応力 σ_r と軸方向応力 σ_z の分布を示している. Fig.11(a)の温度分布から, 水冷部及び熱伝導率の高い銅シース部の冷却効果により, 通電性セラミックス電極チップ部に比べて銅部分の温度が低くなっていることが確認できる. また, 電極チップ表面中央部で最も温度が高く, 3856°Cであることを確認した.

次に, 応力分布について考察する. Fig.11(b)から, 電極チップ中央部には, 電極チップ自体の熱膨張に伴う圧縮応力が発生し, また, 電極チップ上端部付近においては電極中央部および下部の熱膨張による引張りの高応力部が存在することが確認できる. その値に関しては, 電極チップ部を弾性体として取り扱ったために大きな値を示している.

次に, Fig.11(c)に, z 方向応力の分布を示す. この結果より, 電極チップの半径方向端部において, Fig.2 に示す横割れと直接的な関係が予想される高応力部の存在が確認できる. この応力は, 電極チップと銅シースの線膨張係数の差に起因して発生すると考えることができ, この応力を低減するためには, 線膨張係数の小さな電極チップを用いるか, または, 界面部における温度上昇を抑えることが有効であると考えられる.

次に, Fig.12 および Fig.13 には, 電極チップ半径 R がそれぞれ 1.3mm および 2.0mm の場合の定常状態における温度分布および応力分布を示す. これらの結果より, 温度分布および応力分布は何れの場合もほぼ同様の形状をしていることが確認できる. ただし, 割れと直接的な関係が予想される軸方向応力 σ_z の最大値に着目すると, R=1.3mm の場合に最も大きくなることが確認できる. この理由としては, R=1.3mm の場合においては Fig.12(a)で表される電極チップ-銅シース界面における温度が高いことが挙げられ, これに伴う熱膨張が原因で高応力になると推察される.

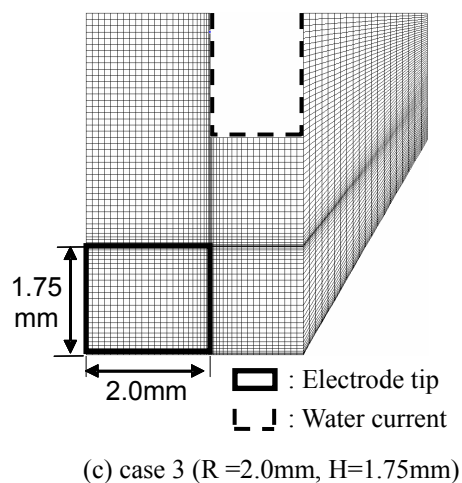
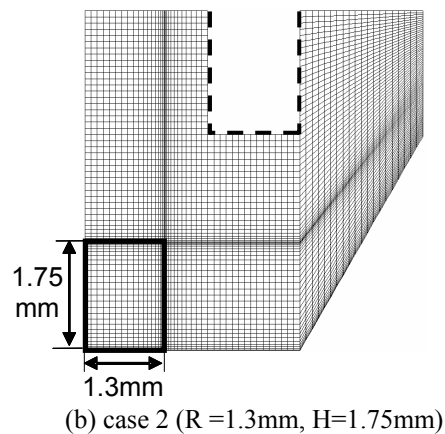
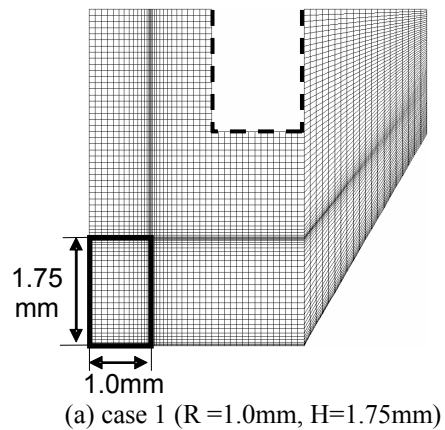


Fig.10 FE mesh divisions.

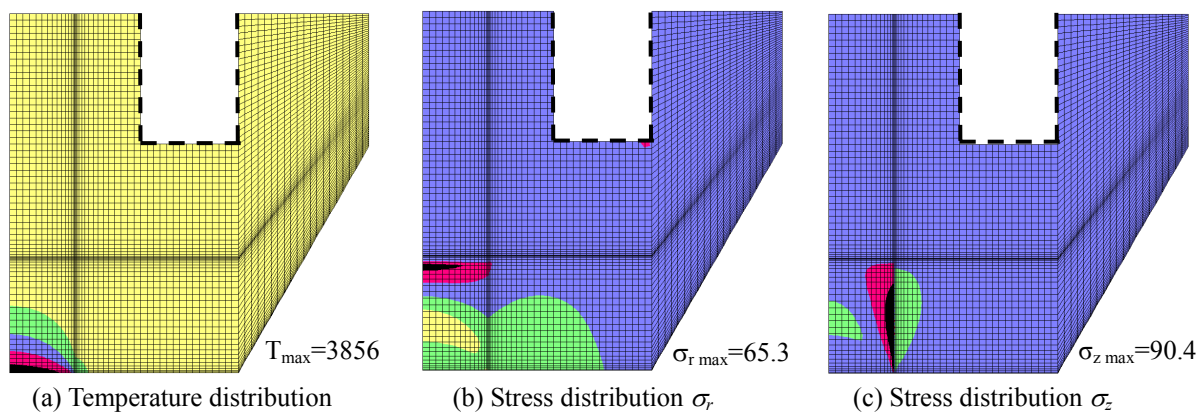


Fig.11 Distribution of temperature & stress in case 1 ($R=1.0\text{mm}$, $H=1.75\text{mm}$).

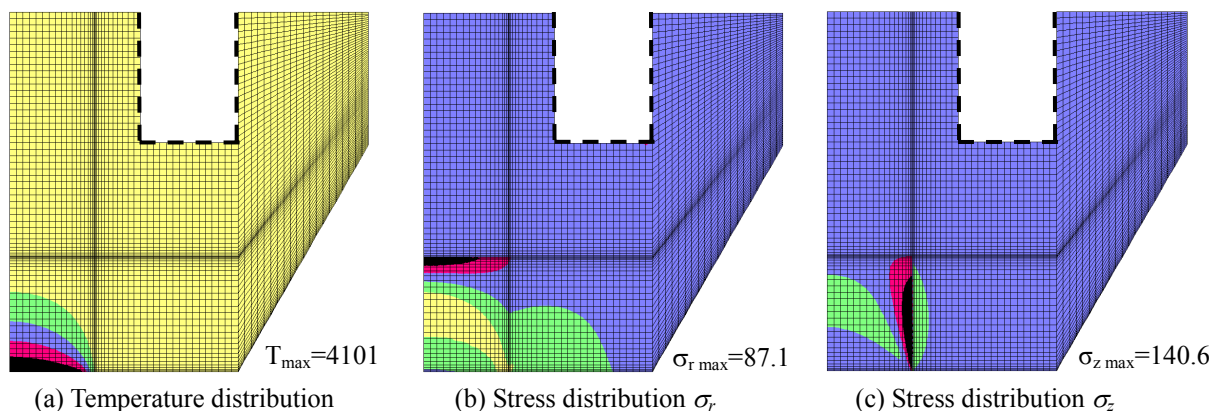


Fig.12 Distribution of temperature & stress in case 2 ($R=1.3\text{mm}$, $H=1.75\text{mm}$).

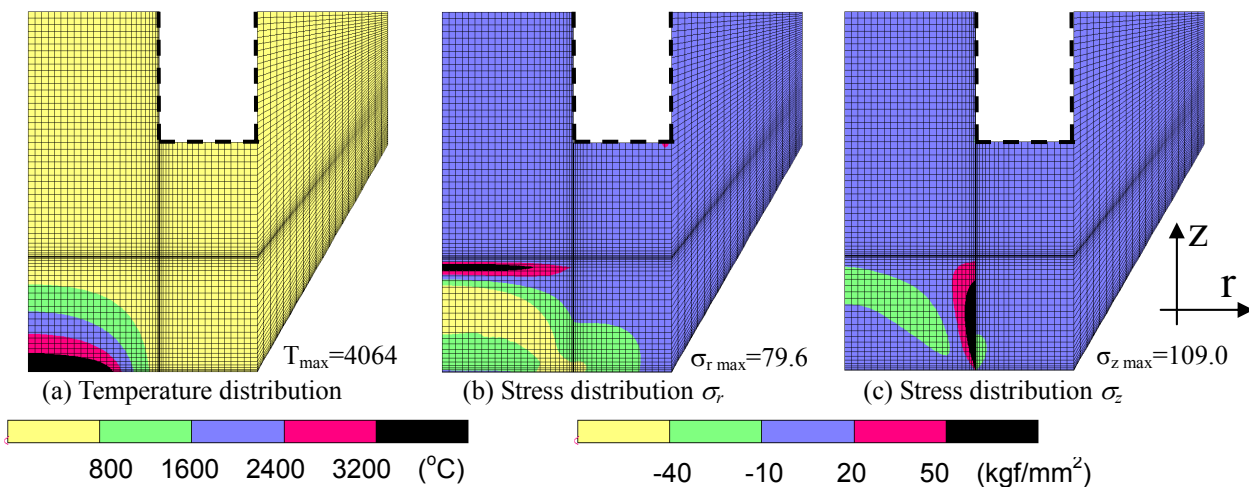


Fig.13 Distribution of temperature & stress in case 3 ($R=2.0\text{mm}$, $H=1.75\text{mm}$).

3. 2 電極チップ高さの影響について

3. 2. 1 解析モデル

Fig.14 には電極チップ高さの異なる2つの解析モデルを示す. Fig.14(a)に示される case-4 は、標準条件 (case-1)に比べて電極チップ高さが2倍の $H=3.50\text{mm}$ であり、(b)に示される case-5 は、電極チップ高さが非常に小さい $H=0.50\text{mm}$ である. また、電極チップ高さも変化しても電極チップ半径 R が変化しなければ、プラズマアークからの熱を直接受ける電極チップ下面部の状態は変化しないので、発熱分布は case-1 の場合とほとんど変わらないと考えることができる. 従って、本節以降における電極チップ径 $R=1.0\text{mm}$ の解析においては、Fig.6 の実線および Fig.7 (a)で示される表面発熱分布および内部発熱分布を用いることにした.

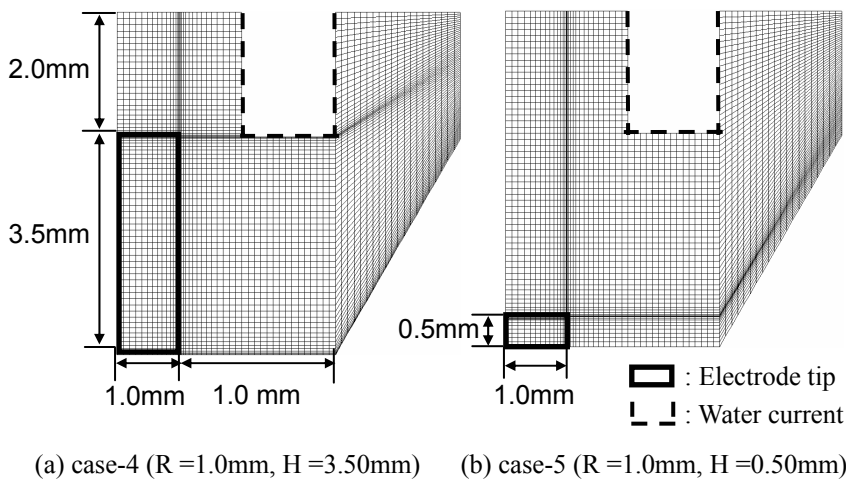


Fig. 14 FE Mesh divisions.

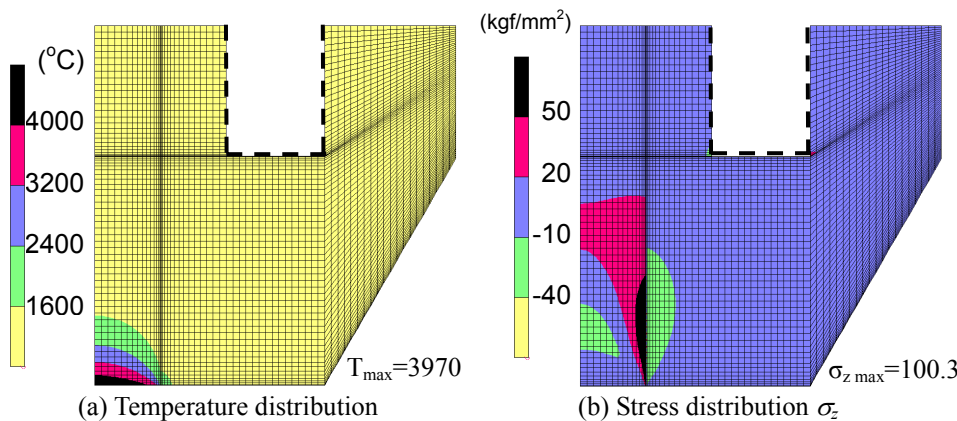


Fig. 15 Distribution of temperature & stress in case-4 (R = 1.0mm, H = 3.50mm).

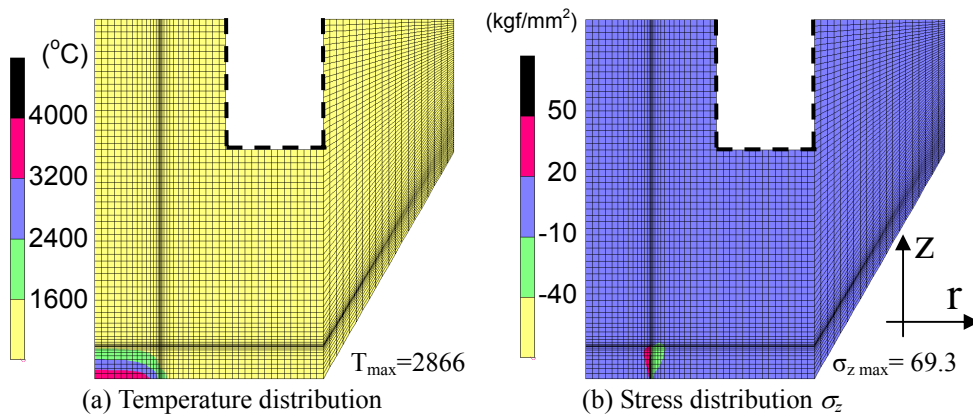


Fig. 16 Distribution of temperature & stress in case-5 (R = 1.0mm, H = 0.50mm).

3. 2. 2 解析結果

Fig.15 (a)および(b)に、それぞれ case-4 (R = 1.0mm, H = 3.50mm) の場合の定常状態における温度分布および軸方向応力 σ_z 分布を示す。また、Fig.16 (a)および(b)に、case-5 (R = 1.0mm, H = 0.50mm) の場合における温度分布および軸方向応力 σ_z の分布を示す。これらの結果より、電極チップ高さが小さいほど、電極チップの最高温度が低くなるのが分かる。この理由としては、電極チップ高さが低いほど、電極チップを取り囲む銅シースによる冷却効果が高くなるためであると考えられる。この最高到達温度の低下に起因して、電極チップ高さが低いほど、(b)に示される軸方向応力 σ_z の最大値が小さくなると理解できる。

上記を確認するために、横軸に電極チップ高さをとり、縦軸に最高到達温度および軸方向応力 σ_z の最大値をとり整理した図が Fig.17 および Fig.18 である。これらの解析結果より、電極チップ高さが高くなるに従い最高到達温度が大きくなり、なおかつ軸方向応力 σ_z の最大値も大きくなるのが確認できる。また、電極チップ高さが 1.5mm 以上になると、最高到達温度、軸方向応力 σ_z の最大値共にほとんど変化しないことが確認できる。

3. 3 水冷部深さの影響について

プラズマ切断においては、電極下部がプラズマアークから熱を受け、その熱を熱伝導性の良い銅シースを介して冷却水により散熱している。従って、冷却水が存在する領域すなわち冷却部の形状および位置は、電極の温度上昇と密接に関係していると予想される。そこで本節では、水冷部深さ H_w が定常時の温度分布および応力分布に及ぼす影響について検討を行った。

3. 3. 1 解析モデルおよび解析結果

Fig.19 には、標準条件に対し、水冷部深さを 5mm に変化させた case-6 の要素分割を示す。また、Fig.20 (a),

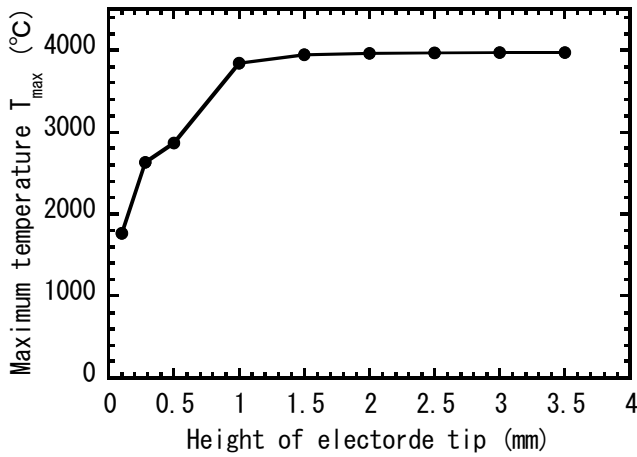


Fig.17 Influence of height of electrode tip on maximum temperature.

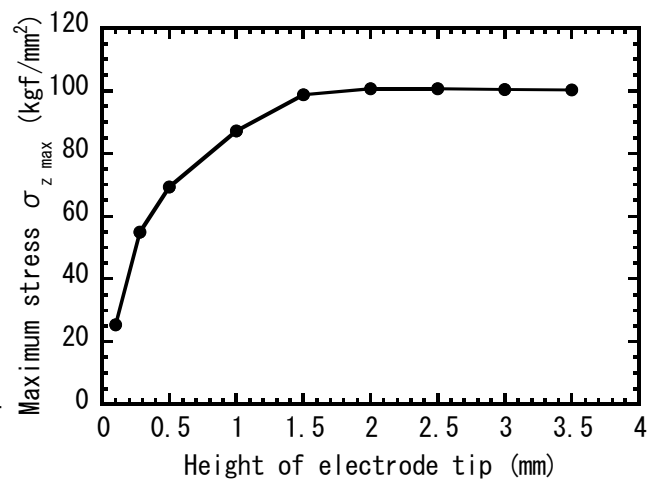


Fig.18 Influence of height of electrode tip on maximum stress. $\sigma_{z\ max}$

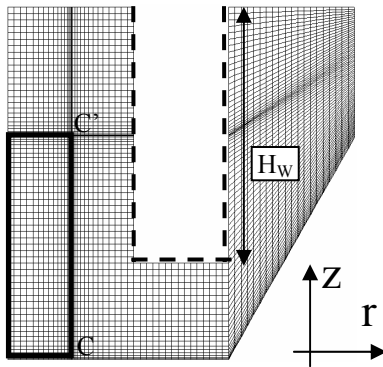


Fig.19 FE mesh divisions (case 6).

(b)には定常時の温度分布および軸方向応力 σ_z 分布を示す. Fig.20 (a)と, Fig.15 (a)の結果を比較すると, case-4 より, 水冷部深さが大きい case-6 の場合の方が, 定常時における最高温度部の温度が低くなっていることが分かる. そこで, 水冷部高さが 2mm, 3mm, 4mm および 5mm の 4 通りにおける水冷部深さと, 電極チップ-銅シース界面上の温度分布の関係を調べた. その結果を Fig.21 に示す. 図中の C および C' は Fig.19 における C-C' に対応している. 同図より, 水冷部深さ H_w が大きいほど界面部における冷却効果が高いことが分かる.

次に, 水冷部深さ H_w と軸方向応力 σ_z の最大値の関係を Fig.22 に示す. この結果と Fig.21 の結果より, 水冷部深さ H_w が大きいほど, 冷却効果が高いにも関わらず, 軸方向応力 σ_z の最大値が大きくなることを確認できる. この理由としては, 水冷部深さ H_w が大きくなることにより, 高応力の主たる原因と考えられる電極

チップ-銅シース界面近傍における熱膨張に対する剛性, すなわち拘束が低くなることが原因として考えられ, これにより, 電極チップ側部の引張りひずみが大きくなったためであると推察される.

以上の一連の解析により, 温度および応力の測定が困難なプラズマ切断時の電極部における温度分布および応力分布を, プラズマアークの発生も含めて詳細に解析できることを確認した. 本研究で構築した解析システムは, 作動ガス流量, 電極材質, 形状・寸法, アーク熱による電極の消耗や割れ, およびそれらを考慮に入れた電極最適設計の際に有効であると考えられる.

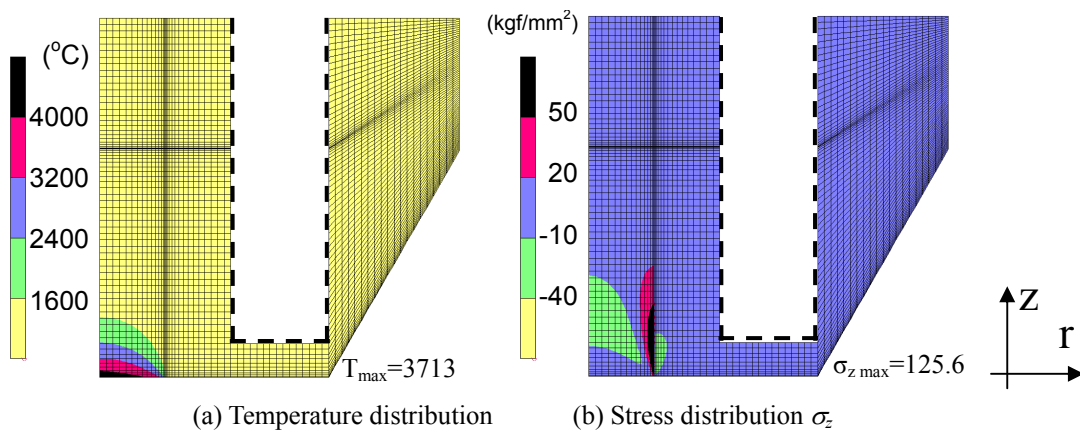


Fig.20 Distribution of temperature & stress in case 6 ($R = 1.0\text{mm}$, $H = 3.50\text{mm}$, $H_w = 5.0\text{mm}$).

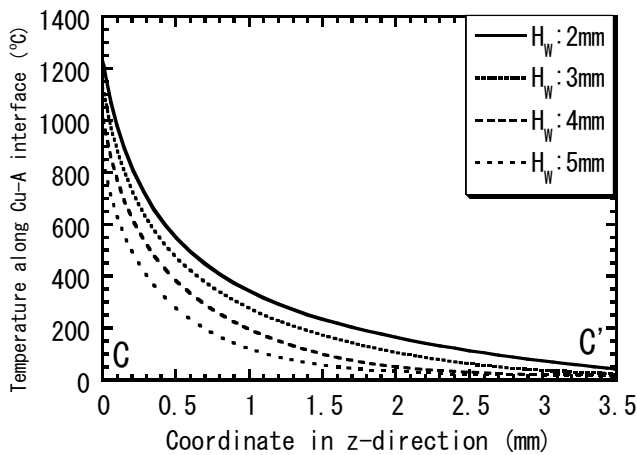


Fig.21 Influence of H_w on temperature along EC-Cu interface.

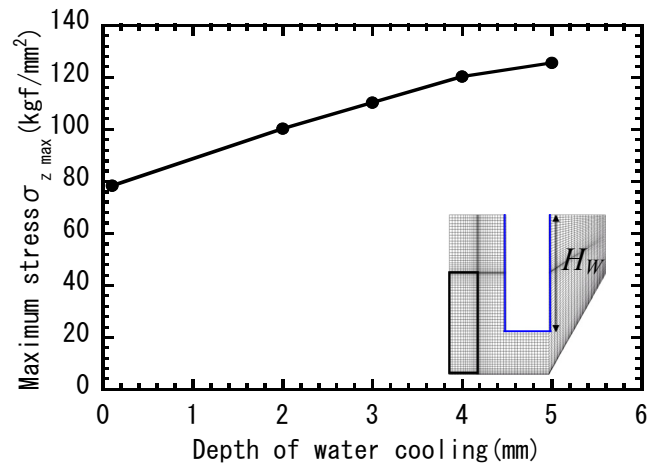


Fig.22 Influence of H_w on Maximum stress $\sigma_{z \max}$.

4. 結言

本研究では、プラズマアークの発生プロセスを考慮した電磁熱流体の解析と FEM 熱弾塑性解析を連成させることで、アークの発生からプラズマ電極への伝熱、電極内部におけるジュール熱の発生、さらには、電極の変形および応力まで解析することができる解析システムを構築した。この手法を用いてプラズマ切断時の電極割れに及ぼす諸因子の影響について検討を行った結果、以下の知見が得られた。

- 1) プラズマアークに関しては、電極チップ下方における陽極の突出部分付近において最高温度となることを確認した。
- 2) 実験における割れ発生位置近傍において、割れと直接的な関係が予想される軸方向応力 σ_z が最大となることを確認した。
- 3) 電極チップ高さが小さいほど、軸方向応力 σ_z の最大値が小さくなる。このことは、割れを回避する上で重要な知見であると考えられる。
- 4) 水冷部深さ H_w が大きいほど電極チップ-銅シース界面の温度は低くなる傾向が認められるが、軸方向応力 σ_z の最大値は大きくなることが分かった。

参考文献

- 1) Y. Sano, D. Ihara: Development of High Speed Plasma cutting machine, Welding Technology 2 Vol.54 (2006), pp100-104
- 2) A.Koshiro: Point of Operating Efficiency Improvement of Heat Cutting, Welding Technology 5 Vol.54 (2006), pp78-83
- 3) Y. Sano: Cutting Process, Welding Technique Trend on International Welding Show 2006, Welding Technology 6 Vol.54 (2006), pp67-70
- 4) S. Tashiro, M.Tanaka, K. Nakata, T. Iwao, F. Koshiishi, K. Suzuki and K. Yamazaki: Plasma Properties of Helium Gas Tungsten Arc with Metal Vapor, Journal of JWS, 24-2 (2006), pp.143-148
- 5) Y. Ueda, K. Nakacho, Y. C. Kim, E. Murakawa: Fundamental of Thermal – Elastic – Plastic – Creep Analysis and Measurement of Welding Residual Stress, Welding Journal 6 Vol.55 (1986), pp.336-348
- 6) S. V. Patanker: Numerical heat transfer and fluid flow, Hemishpere Publishing Corporarion 1980
- 7) M. Tanaka, et. al: A Unified Numerical Modeling of Stationary Tungsten-Inert Gas Welding Process, Metal. Trans. A, 33A (2002), 2043-2052
- 8) M. Tanaka, et. al: Numerical Study of Free-Burning Argon Arc with Anode Melting, Plasma Chem. Plasma Process, 23 (2003), 585-606