

Uniformity Method of Mold Temperature Heated by Direct Resistance Heating

Kazuto TANAKA*, Yoshiki FURUKAWA*, Tsutao KATAYAMA*,
Kimitaka WATANABE*, Masataka KAWAGUCHI* and Hideyuki KUWAHARA**

(Received January 16, 2021)

Although the direct resistance heating method of mold, which is one of the mold heating methods for fiber reinforced plastic, enables high-speed heating due to the skin effect, it has issue that the temperature distribution on the pressed surface is non-uniform. In this study, experimental study and FEM analysis were conducted to clarify the effect of the groove provided in the mold and the thickness of the mold on the temperature distribution. The groove on the power supply side and the control of mold thickness depending on the position of the mold suppress the non-uniformity of temperature distribution on the mold surface.

Key words : direct resistance heating, mold temperature, grooves, thickness, FEM analysis

キーワード : 直接通電抵抗加熱, 金型温度, 溝, 厚さ, 有限要素解析

直接通電抵抗加熱用金型の温度分布均一化手法

田中 和人, 古川 淑希, 片山 傳生, 渡辺 公貴, 川口 正隆, 桑原 秀行

1. 緒 言

近年, 自動車産業においては, 地球温暖化の深刻化に伴う環境負荷の低減のために車体重量の軽量化が求められている^{1,2)}. そこで, 高比強度・高比剛性といった優れた機械的特性を持ち, リサイクル性を有することから, 炭素繊維強化熱可塑性プラスチック (Carbon Fiber Reinforced Thermoplastics: CFRTP) の利用が期待されている³⁾. CFRTP のホットプレス成形では, 金型のヒートアンドクールが課題となり, 高速成形を実現するためには金型の高速加熱方法の開発が重要である.

高周波交流電流を用いることで, 表皮効果⁴⁾により金属の表面のみを集中的に加熱する技術として直接

通電抵抗加熱法と電磁誘導加熱法^{5,6)}がある. 直接通電抵抗加熱法は材料に直接, 高周波交流電流を通電し, ジュール熱で加熱を行う方法であり, 金属材料の圧延接合などに利用されている⁷⁾. 電磁誘導加熱法と比べてコイルなどの設備を必要とせず, また, 電力損失が少ないという利点があり, 金型加熱に直接通電抵抗加熱を用いることで, 低コスト高速加熱を実現することが期待できる.

筆者等はこれまでに, 円柱金型に直接通電抵抗加熱法を適用し, CFRTP 製パイプの成形手法を開発してきた^{8,9)}. また, 上下金型を有するマッチドダイを利用した成形に適用するため, 最も単純な形状として, 一対の金属直方体を金型と見なし, 対面する金型的一方のみに高周波交

*Department of Biomedical Engineering, Doshisha University, Kyoto
Telephone & FAX: +81-774-65-6408, E-mail: ktanaka@mail.doshisha.ac.jp

**Material Processing Technology, MPT

流電流を直接通電することで、その電磁誘導により対面するもう一方の金型と強化繊維である炭素繊維が加熱可能であることを明らかにしてきた¹⁰⁾。ここでは、通電する金型において、矩形断面の導体に通電した際に角部に電流が集中するエッジ効果、および、金型と電力供給用配線間において異方向に流れる電流の磁場が導体の近接面で互いに強め合う近接効果という二つの原因により、プレス面温度分布が不均一になるという点が課題として挙げられる。

この課題に対し、筆者らは金型の温度分布改善手法として、金型の端部に溝を設けることによって、溝の両側において同方向に流れる電流の磁場が互いに打ち消し合い、エッジ効果によって高くなった金型端部の温度を抑制することが可能であることを解析的に明らかにした¹¹⁾。これらを実験的にも確かめるとともに、実使用金型で求められる 10 °C 程度以下のばらつきを実現するためには、さらなる温度分布均一化手法の開発が必要とされている。

一方、電磁誘導加熱法を用いた金型において、金型の厚さを薄くすることで、熱容量が小さくなり、金型の温度が高くなることを報告しており¹⁰⁾、金型の厚さを制御

することでさらなる温度分布の均一化が期待される。

そこで本研究では、直接通電抵抗加熱法を用いた金型の、金型の片側に設けた溝が、金型の温度分布に及ぼす影響を明らかにするために、電源に近い側に溝を設けた場合と電源から遠い側に溝を設けた場合のそれぞれについて、通電実験を行い、有限要素解析を用いて算出した解析結果との比較を行った。また、金型の厚さがその温度分布に及ぼす影響を有限要素解析により明らかにした。

2. 片側に溝を設けた金型の通電実験および解析による温度分布評価

2.1 実験および解析方法

Fig. 1 (a)に示すように、全周に 2 mm の面取りが施された幅 130 mm、長さ 240 mm、板厚 30 mm の直方体を一對の金型の片側として用い、これに対して直接交流電流を供給する。Fig. 1 (b)に実験装置を、Fig. 1 (c)にその概略図を示す。実験装置には電源ユニットを備えた加熱プレス機（第一機電株式会社）を用い、電源ユニットから、銅フィーダ、銅の編み組線、銅製の L 字型電極（幅 130 mm、板厚 8 mm）を介して、SUS430 製の金型を接続した。

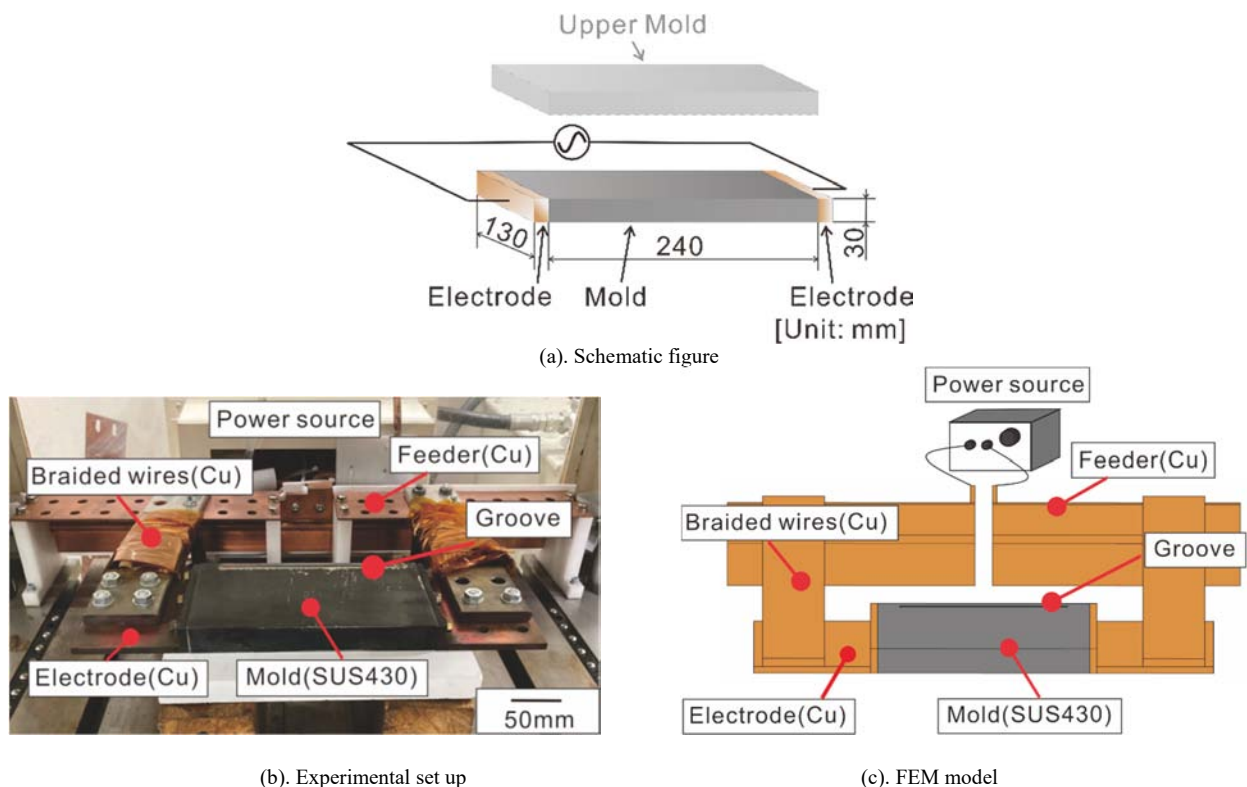


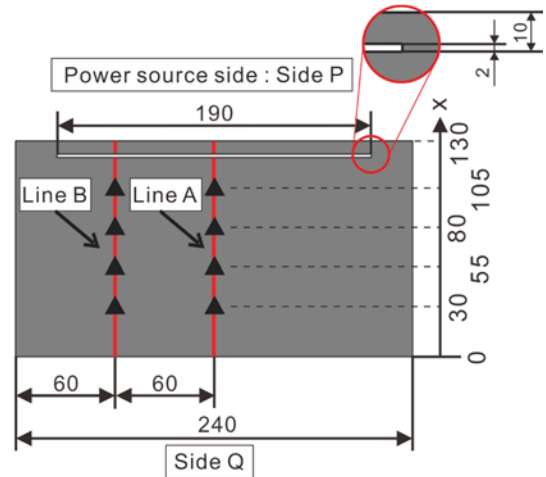
Fig. 1. Circuit condition of the mold with groove heated by direct resistance heating.

SUS430 は電気抵抗率が高く、またステンレスの中でも強磁性体に分類される材料であるため、表皮効果による発熱量が期待できるため選定している¹²⁾。

金型に設けた溝が金型の温度分布に及ぼす影響を明らかにするため、Fig. 2 (a), (b)に示すように、金型長辺から10 mm 内側の位置に、幅2 mm、長さ190 mm の貫通溝を設け、金型の中央(金型短辺から120 mm 離れた線)を Line A、金型の四分の一の位置(60 mm 離れた線)を Line B とした。また金型の長辺において、電源ユニットに近い側を Side P、遠い側を Side Q と称することとし、貫通溝を Side P に設けた場合 (Type 1, Fig 2 (a)) と Side Q に設けた場合 (Type 2, Fig 2 (b)) について、K 型熱電対とデータロガー (ZR-RX40, オムロン) を用いて、Line A、B 上の Side Q から 30 mm、55 mm、80 mm、105 mm の点の温度を測定した。供給する高周波交流電流の周波数は 39 kHz、通電金型への供給電力は 4.9 kW とし、60 s 間通電を行った。

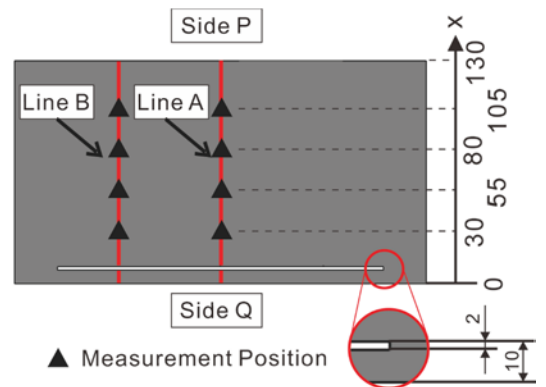
解析には、汎用工学シミュレーションソフトウェア COMSOL Multiphysics[®] を用い、Electric and Induction Current (AC/DC Module) および General Heat Transfer (Heat Transfer Module) を用いた電磁気および伝熱の連成解析を行った。電磁気解析は準定常解析、熱伝導解析は過度解析とすることで、電流を熱源としたジュール熱および伝導する熱量を求め、金型の温度分布を算出した。

解析モデルは Fig. 1 (c)に示したように、実験に用いた通電金型と同一の寸法とし、Type 1 (Fig. 2 (a))、Type 2 (Fig. 2 (b)) の金型モデルに加え、Fig. 2 (c)に示すような、溝を設けていない金型 (Type 0) のモデルを作成した。また、空気への放熱を考慮するために、周囲には半径 500 mm の球状の空気層を設定し、空気層の最外層は、20 °C に固定した。要素には四面体十節点要素を用い、金型表面には境界層メッシュを施した。Table 1 に解析に用いた各材料の比透磁率、電気伝導率、熱伝導率¹²⁾を示す。実験と同様に、高周波交流電流の周波数を 39 kHz、通電金型への供給電力が 4.9 kW となるように銅フィードの先端から 60 s 間電力を供給し、温度分布、電流密度分布、磁束密度分布を算出した。



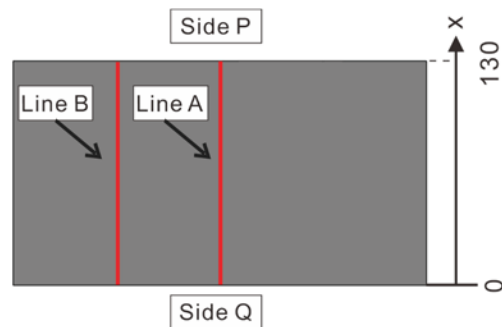
▲ Measurement Position

(a). Mold grooved near the power supply (Type 1)



▲ Measurement Position

(b). Mold grooved far from the power supply (Type 2)



(c). Mold without groove (Type 0)

Fig. 2. Schematic drawing of the mold and temperature measurement position.

Table 1. Material properties for FEM analysis¹²⁾.

	SUS430	Copper	Air
Relative magnetic permeability	122.4	1	1
Electric conductivity [S/m]	1.67×10^6	5.99×10^7	0
Thermal conductivity [W/(m·K)]	25.6	400	0.257

2.2 結果および考察

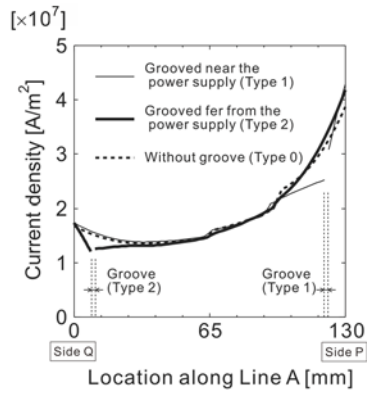
それぞれの金型の Line A における電流密度分布、磁束密度分布を Fig. 3 に示す. Type 1, 2 では、Type 0 と比較し、溝の両側 (Type 1: $x = 120, 122$, Type 2: $x = 8, 10$) で電流密度、磁束密度がともに低くなっていることがわかる. これは、溝を設けたことにより、溝の両側において、流れる電流の磁場が打ち消し合うことで磁束密度が低下し電流が流れにくくなったことが原因である.

Fig. 4 に、Type 1 および Type 2 の金型の通電開始後 60 s 後の Line A, B における、温度測定結果と FEM 解析で求めた温度分布を示す. それぞれの図には、Type 0 における FEM 解析で求めた温度分布も比較として示している. FEM 解析結果が実際の金型温度と一致していることがわかる.

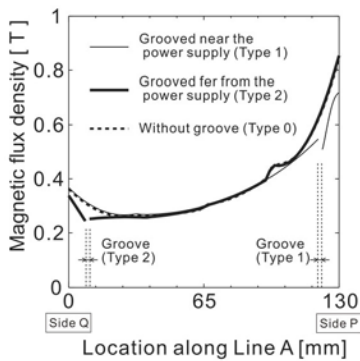
Type 0 において、中央部と比較し、Side P, Q の温度

が高くなった. これは、Fig. 3 (a) に示した電流密度分布からわかるように、導体の角部に局所的に電流が流れるエッジ効果の影響であると考えられる¹³⁾. また Side Q と比較し、Side P の温度が高くなっているのは、金型と銅フィーダおよび銅の編み線を通る電流の磁場が近接面で互いに強め合い、電流が流れやすくなる近接効果の影響であると考えられる¹⁴⁾.

Type 1 では、Type 0 と比較し、Side P において近接効果により上昇した温度が、溝の内側 ($x = 120$) で低くなった. これは、Fig. 3 に示した電流密度分布、磁束密度分布からわかるように、溝を設けたことにより、溝の両側を流れる電流の磁場が打ち消し合い、電流が流れにくくなったことが原因であると考えられる. Type 2 においても Type 1 と同様の理由で Side Q において、溝の内側 ($x = 10$) の温度が低くなっていることがわかる.

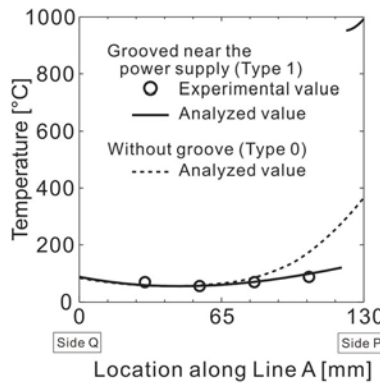


(a). Current density

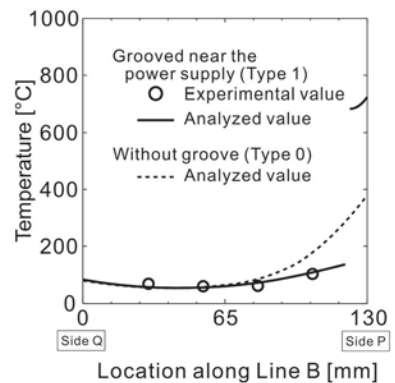


(b). Magnetic flux density

Fig. 3. Current density and magnetic flux density distribution for Type 1, Type 2 and Type 0 on Line A.

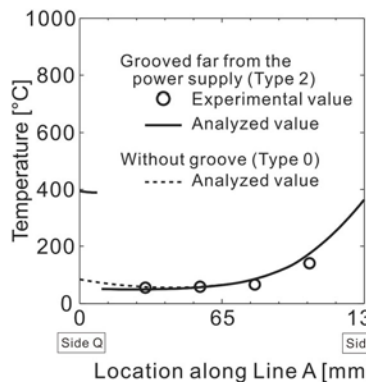


(i). Line A

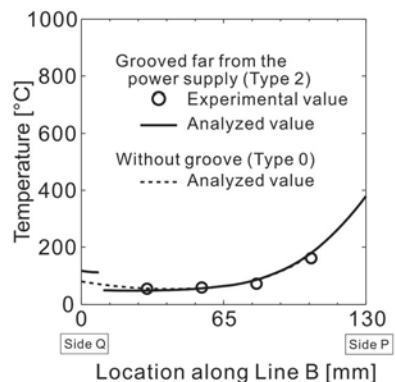


(ii). Line B

(a). Type 1



(i). Line A



(ii). Line B

(b). Type 2

Fig. 4. Temperature distribution of the mold for Type 1 and Type 2 on Lines A and B in experimental and analyzed results.

Fig. 5 に、解析により求めた各モデルの金型プレス面温度分布コンター図を示す。Type 1, 2 を Type 0 と比較すると、前述の通り、溝を設けることで溝の内側で温度が低くなっているものの、溝の外側では Type 0 よりも温度が高くなっていた。また、Type 1 の Side P の溝がない両端において、温度が高い部分が溝の位置よりも内側（図中下方向）に広がっていた。Fig. 3 に示した電流密度分布においては、溝の外側は Type 0 よりも電流密度が低くなっていた。つまり、溝の内側への伝熱経路が溝の周囲のみに限定されたことで、伝熱しにくくなり、Type 0 に比べて温度が高くなったものである。つまり、溝を設けることで、溝よりも内側の金型に電流が流れにくくなる効果だけでなく、溝により伝熱を遮断することも金型温度の平準化に寄与していることがわかる。

以上より、電磁場・伝熱の連成解析による解析値と実験値は良く合致していること、電源ユニットに近い側（Side P）に溝を設けることで、近接効果により上昇した温度を低くすることで、金型の温度を平準化できることがわかる。

3. 温度分布に及ぼす金型の厚さの影響

3.1 解析方法および解析モデル

金型の厚さが温度分布に及ぼす影響を明らかにするため、2.1 で用いた Type 1 の金型モデルの断面形状を、Fig. 6 に示すようなチャンネル形状とした金型モデルを作成した。この金型モデルを基本形状 ($l=30, b=20, w=0$) とし、Fig. 7 に示すように、脚長 ($l=20, 25, 30$)、脚幅 ($b=10, 15, 20$)、窪み ($w=0, 10, 20$) の三つのパラメータに対して三種類の異なる長さを設定したモデルの解析を行った。なお、それぞれのモデルにおいて、他の二つのパラメータについては、基本形状の値 ($l=30, b=20, w=0$) を用いた。また、この三種類のパラメータを組み合わせて用いることによって、Fig. 8 に示すような断面形状の金型モデルを作成した。解析手法は 2.1 と同様とし、高周波交流電流の周波数を 39 kHz、通電金型への供給電力が 4.9 kW となるように銅フィードの先端から 70 s 間電力を供給した際の電流密度分布と温度分布を算出した。

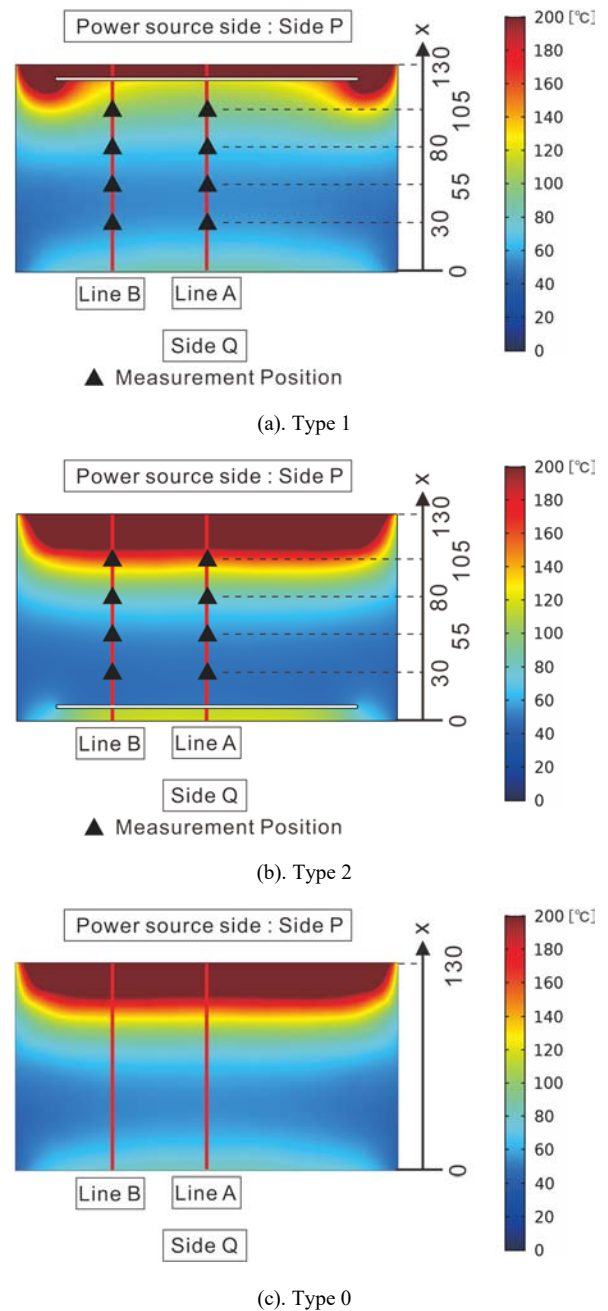


Fig. 5. Contour diagram of temperature distribution for Type 1, Type 2 and Type 0.

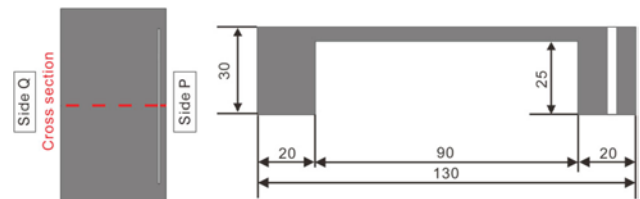


Fig. 6. Schematic diagram of the basic mold of the channel shape.

3.2 解析結果および考察

脚長および脚幅の異なるモデルの金型プレス面の Line A における電流密度分布および温度分布を Figs. 9, 10 に示す. いずれの結果においても, 電流密度の差は小さいのに対して, 脚長, 脚幅が小さいほど Side Q の温度が高くなった. 高周波交流電流において電流が表面電流の e^{-1} 倍となる表皮深さ δ は, 次式で表すことができる¹³⁾.

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi f \mu_0 \mu_r}} \quad (1)$$

ρ は電気抵抗率, f は周波数, μ_0 は真空の透磁率, μ_r は透磁率である. SUS430 の周波数 39 kHz における表皮深さは 0.18 mm であり, 金型の厚さに比べて十分に小さいことがわかる. したがって, 電流密度に及ぼす脚長, 脚幅の影響は大きくないと考えられる. 一方, 脚長, 脚幅が小さいほど, 金型の体積が小さくなり, 熱容量が小さくなるため, 温度が高くなったと考えられる. また, 脚長を小さくした場合 ($l = 20$) と脚幅を小さくした場合 ($b = 10$) の Side Q の温度分布を比較すると, $x = 0$ において, $l = 20$ では 168.4 °C, $b = 10$ では 171.6 °C と近い値をとっている. 一方, $l = 20$ では, $x = 18$ で 145.7 °C と最も低くなり, $b = 10$ では, $x = 27$ で 151.1 °C と最も低くなった. 脚長を小さくした場合と比べ, 脚幅を小さくした場合の方がグラフの傾きが緩やかになっていることがわかる. これは, 脚幅が小さくなったことで, 金型端部から板厚の薄い部分までの距離が近くなり, 熱が伝わりやすくなったことが原因であると考えられる.

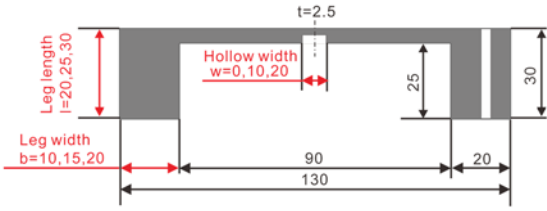


Fig. 7. Schematic drawing of the basic mold of each parameter.

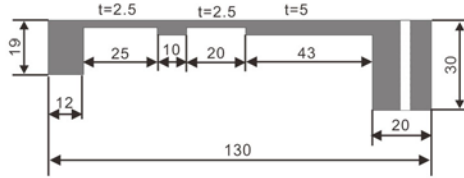


Fig. 8. Schematic drawing of the mold with combined parameters.

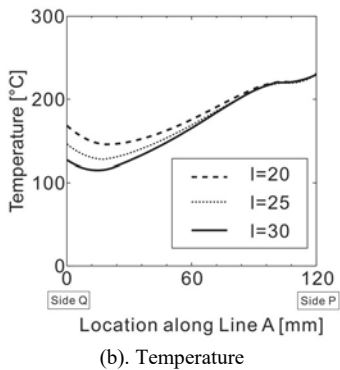
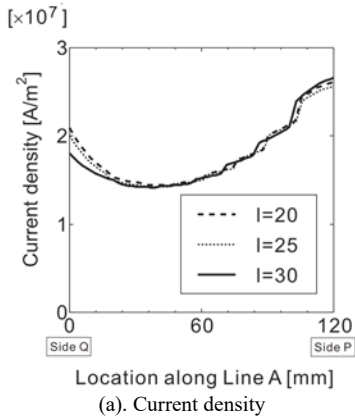


Fig. 9. Temperature and current density distribution of channel shaped mold with different leg length.

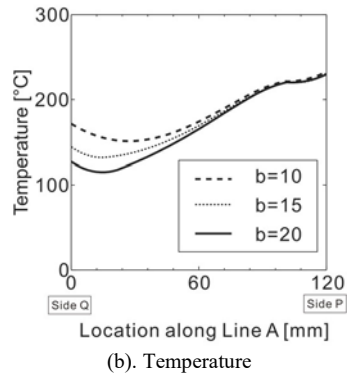
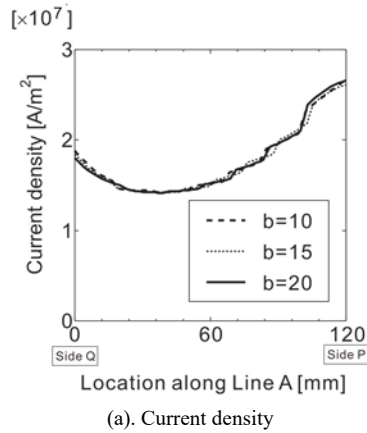


Fig. 10. Temperature and current density distribution of channel shaped mold with different leg width.

中央部に窪みを設けたモデルの金型プレス面の Line A における電流密度分布および温度分布を Fig. 11 に示す。電流密度の差は小さいのに対し、窪みを設けることで中央部の温度が高くなっていた。また、窪みの幅が広いほど温度が高くなっていることがわかる。脚長や脚幅の長さの異なるモデルと同様に、窪みを設けたことで、金型の熱容量が小さくなったことが原因であると考えられる。

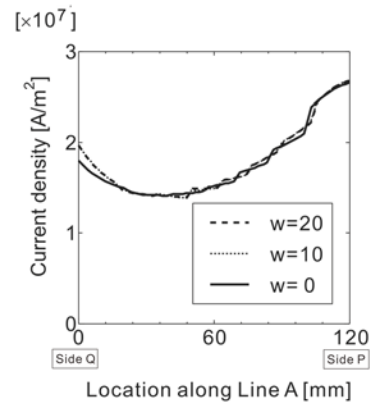
以上より、脚長や脚幅を小さくすることで Side Q の温度を高くすることが可能であり、脚幅を小さくすることで Side Q の温度分布の傾きを緩やかにできることがわかる。また、窪みを設けることで中央部の温度を高くできることがわかる。

Fig. 8 に示した、三種類のパラメータを組み合わせて作成したモデルの金型プレス面の Line A における温度分布を Fig. 12 に示す。Line A 上における最高温度は 237.9 °C、最低温度は 227.5 °C となり、その温度差は 10.4 °C となった。金型断面の厚さによって、金型の熱容量を制御することができ、熱容量を制御することで温度分布の均一化が可能であることがわかる。

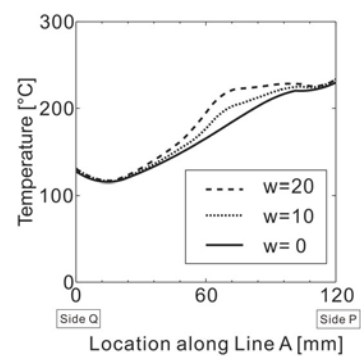
4. 結言

本研究では、直接通電抵抗加熱法を用いた金型の、プレス面温度分布均一化を目的とし、金型の電源に近い側に溝を設けた場合と電源から遠い側に溝を設けた場合のそれぞれについて通電実験を行い、解析結果との比較を行った。また、金型の厚さがその温度分布に及ぼす影響を有限要素解析により明らかにした。以下に得られた知見を示す。

1. 金型の電源に近い側に溝を設けることで、溝の両側を流れる電流の磁場が打ち消し合い、磁束密度が低下して電流が流れにくくなり、近接効果により上昇した電源に近い側の金型温度を下げることで、金型の温度を平準化できる。
2. 金型の位置に応じて異なる厚さにすることによって熱容量を制御することで、温度の不均一を抑制することが可能である。



(a). Current density



(b). Temperature

Fig. 11. Temperature and current density distribution of channel shaped mold with different hollow width.

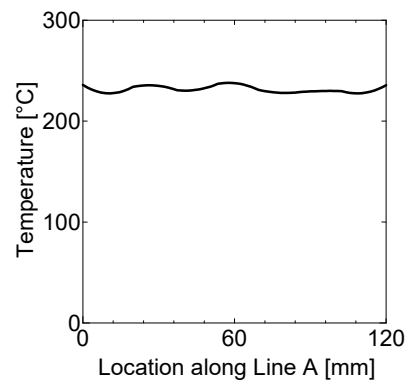


Fig. 12. Temperature distribution of the mold shown in Fig. 8.

参考文献

- 1) T. Ishikawa, “Overview of Carbon Fiber Reinforced Composites Applications to Automotive Structural Parts”, *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, **81** [6], 489-493 (2015).
- 2) S. Baba, “Continuous Fiber Reinforced Thermoplastics CFRTP-GFRTP and Market”, *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, **81** [6], 503-506 (2015).
- 3) A. Galoone, M. Ariante, G. Fusco, F. F. Flores, G. Bizzarro, A. Zinno and A. Prota, “Thermoplastic Composite Structure for Mass Transit Vehicle Design, Computational Engineering and Experimental Validation”, *15th European Conference on Composite Materials*, 24-28 (2012).
- 4) T. Kashiwagi, H. Hasegawa, Y. Kato, Y. Sakamoto and K. Ukita, “Study of Loss by the Proximity Effect of the Conductor in Contactless Power Supply Coils”, *RTRI Report*, **27** [7], (2013).
- 5) C. Y. Wu, X. L. Jin and Y. M. Zhou, “Recent Progress of Induction Heating Technology in Baosteel”, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, **424**, (2018).
- 6) S. C. Chen, H. S. Peng, J. A. Chang and W. R. Jong, “Simulations and Verifications of Induction Heating on a Mold Plate”, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, **31** [7], 971-980 (2004).
- 7) K. Hamada, K. Isaka, D. Doi, Y. Yonemitsu and S. Iwasaki, “Application of the Direct Resistance Heating for Stainless Steel/Aluminum Clad Manufacturing Process”, *Tetsu-to-Hagane*, **88** [2], 16-22 (2002).
- 8) K. Tanaka, Y. Matsuura, T. Katayama and H. Kuwahara, “FEM Analysis of Temperature Distribution of Mold for CFRTP Pipe Molding Heated by Direct Resistance”, *Journal of the Society of Materials Science*, **64** [11], 947-953 (2015).
- 9) K. Tanaka, R. Harada, T. Uemura, T. Katayama and H. Kuwahara, “Rapid Pipe Molding Process of Carbon Fibre Reinforced Thermoplastics by High-Frequency Direct Resistance Heating”, *WIT Transactions on the Built Environment*, **112**, 133-139 (2010).
- 10) K. Tanaka, S. Akamatsu, T. Katayama and H. Kuwahara, “Development of Molding Method of Carbon Fiber Reinforced Thermoplastics by Using Direct Resistance Heating and Induction Heating”, *Journal of the Society of Materials Science*, **68** [7], 565-571 (2019).
- 11) K. Tanaka, Y. Furukawa, T. Katayama, K. Watanabe, M. Kawaguchi and H. Kuwahara, “Influence of Grooves and Position of Electrodes on Temperature Distribution of a Flat Mold Using High Frequency Direct Resistance Heating”, *High Performance and Optimum Design of Structures and Materials IV*, **196**, 87-95 (2020).
- 12) K. Tanaka, J. Nakatsuka, T. Katayama and H. Kuwahara, “FEM Analysis of Temperature Distribution of Flat Mold by Direct Resistance Heating Method”, *Journal of the Society of Materials Science*, **67** [3], 367-374 (2018).
- 13) K. Kuroda, Y. Saito, K. Horii, “Shape Optimization of High Frequency Current Carrying Conductor by Skin Effect Visualization”, *The Visualization Society of Japan*, **26** [1], 271-274 (2006).
- 14) K. Ikenaga, “Strengthening Technology of Steel Materials by Induction Hardening”, *Journal of the Japan Society for Technology of Plasticity*, **666** [57], 613-615 (2016).