金型への直接通電抵抗加熱および電磁誘導加熱を利用した CFRTP成形法の開発[†]

田中 和人* 赤松 駿** 片山 傳生* 桑原 秀行***

Development of Molding Method of Carbon Fiber Reinforced Thermoplastics by Using Direct Resistance Heating and Induction Heating

by

Kazuto TANAKA*, Shun AKAMATSU**, Tsutao KATAYAMA* and Hideyuki KUWAHARA***

For the applications of CFRTP to car components in the automotive industry, it is necessary to reduce the cost of the molding process. Recently, a heating method of the mold by using high frequency direct resistance heating, which heats only the mold surface by joule heating is attracting a great deal of attention, as it enables fast mold heating for cost reduction. When the high frequency alternative current is applied to the upper and lower molds in the same direction, however, the temperature of the press surface of the mold is inefficiently heated due to the attenuation of magnetic field. Furthermore, although the CFRTP molding method using the proximity effect was developed, in which the high frequency alternative current is applied to the upper and lower molds in the opposite direction, electric short circuit of the molds by current difference is one of the issues to be solved. In this study, the CFRTP molding method was developed by applying alternating current to only the lower mold in which the lower mold was heated with direct resistance heating and the upper mold and carbon fiber fabric were heated by induction heating. One pair of rectangular solids was used as the simplest mold system and FEM analysis of the electromagnetic field and heat transfer were compared with the experimental results. The upper mold and carbon fiber fabric were successfully heated by induction heating from the applied alternating current to the lower mold. The mold was efficiently heated by reducing the thickness and using materials with relatively higher magnetic permeability.

Key words:

CFRTP, Direct resistance heating, Induction heating, Temperature distribution, Current density distribution, FEM analysis

1 緒 言

近年、自動車産業においては環境負荷低減や電気自動車における航続距離の確保のために車体軽量化が求められており、高比強度や高比剛性を有する軽量材料として、母材に熱可塑性樹脂を用いた炭素繊維強化熱可塑性プラスチック (Carbon Fiber Reinforced Thermoplastics: CFRTP) が注目されている^{1),2)}。

連続炭素繊維を強化材として用いた CFRTP の成形は、工程を大きく分けると、強化材であるファブリックへの樹脂含浸と形状を付与する賦形に分けられる。一般的に熱可塑性樹脂は、熱硬化性樹脂に比べて樹脂含浸時の粘度が高いため、熱可塑性樹脂のプリプレグや積層板を作製するための樹脂含浸に特化したプロセスと、これらを素材とした賦形プロセスに分けることが多い³⁾。成形時間を含めたコスト削減のためには、これらの二つの工程を同時に行うことが望ましく、筆者等はこれまで電磁誘導加熱を利用した金型を用いた高速成形法の開発を行ってきた⁴⁾。

また、筆者等はより低コストが期待される成形方法として、高周波交流電流を加熱対象に直接通電することによって生じるジュール熱により加熱を行う直接通電抵抗加熱を金型に応用し、円柱金型に対して、CFRTP 製パイプの成形手法を開発してきた⁵⁾。

本手法を、より一般的な成形に利用するためには、マッティングダイなどの上下の金型を有する成形への応用が期待される。Fig. 1 に示すように上下金型の対面した二面において同方向へ高周波交流電流を通電する方法では、成形を行うプレス面で磁場が弱め合うために、加熱効率が悪いという欠点がある。一方、Fig. 2 に示すように対面させた上下の金型において逆向きへ高周波交流電流を通電した場合には、近接効果によりプレス面に電流を集中させることが可能となり、加熱を効果的に行うことができる^{6,7)}。しかしながら、この場合には強化繊維に炭素繊維を用いた場合など、金型を閉じた時に、短絡する危険性があり、より安全性を考慮した成形法の開発が必要とされてきた。

[†] 原稿受理 平成30年10月10日 Received Oct. 10, 2018 ©2019 The Society of Materials Science, Japan

* 正 会 員 同志社大学 生命医科学部医工学科 〒610-0394 京田辺市多々羅都谷
Dept. of Biomed. Eng., Doshisha Univ., Tatara-miyakodani, Kyotanabe, 610-0394.

** 学生会員 同志社大学大学院 〒610-0394 京田辺市多々羅都谷
Dept. of Biomed. Eng., Doshisha Univ., Tatara-miyakodani, Kyotanabe, 610-0394.

***マテリアルプロセスングテクノロジー(Material Processing Technology, MPT) 〒651-0058 神戸市中央区葺合町蟬山, Chuo-ku, Kobe 651-0058.

一方, 導体に対して高周波交流電流を流すと, 電磁誘導により近接する導体を加熱することができるため, これまで金属⁸⁾や炭素繊維⁹⁾の加熱に利用されてきた. マッチングダイにおいても, 上下の金型のうち片方だけに高周波交流電流を印加することで, もう一方の金型と強化繊維である炭素繊維が, 電磁誘導により加熱されることが期待できる.

そこで本研究では, 対面する金型的一方のみに高周波交流電流を直接通電し, 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を加熱する成形方法の開発を目的とし, 最も単純な形状として平板を成形する場合を想定した一対の金属直方体を金型と見なして, 有限要素解析を用いて温度分布や電流密度分布解析を行うとともに, 実験結果との比較を行った. ここでは, 高周波交流電流を通電した金型からもう一方の金型への伝熱の影響を明らかにするために, 上下金型間に断熱材を挿入したモデルで解析を行うとともに, ホットプレートを用いて金型への伝熱の影響を評価した. また, 金型への高周波交流電流の通電による炭素繊維の電磁誘導加熱特性を明らかにするために, 炭素繊維および比較対象とするガラス繊維に対して, 高周波交流電流を通電した金型からの電磁誘導と金型からの熱伝導による加熱を比較した. また, 上金型の板厚や材質が金型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 金型の温度分布評価および炭素繊維の発熱特性

2・1 実験および解析方法

2・1・1 上下金型の温度分布評価 Fig. 3 (a)に示す模式図のような, 全周に 2 mm の面取りが施された幅 130 mm, 長さ 240 mm, 厚さ 30 mm の SUS430 の直方体一対を上下金型として用い, 下金型に電流を供給する

Fig. 1 Schematic drawing of the mold heated by direct resistance heating with high frequency alternative current in the same direction for upper and lower molds.

Fig. 2 Schematic drawing of the mold heated by direct resistance heating with high frequency alternative current using proximity effect.

状態を考える. なおここでは, 上金型の下面および下金型の上面をプレス面と称することとする.

Fig. 3 (a)に模式図を示した実験装置の実物を Fig. 3 (b)に示す. プレス圧力 20 トンの油圧プレスに直接通電抵抗加熱用の 20 kW の交流電源装置を備えた加熱プレス機 (第一機電 (株)) を実験に用いた. 電源ユニットの中心から取り出した銅フィードに取付けた銅の編み組線を介して, 下金型に取付けた銅製の電極 (幅 130 mm, 板厚 8 mm) と下金型を接続した. なお, 上下金型の金型間隔は, 5 mm とし, Fig. 3 (b)に示すように金型の長辺において, 電源ユニットに近い方を内側 (Inner), 反対の側を外側 (Outer) と称することとする. 高周波交流電流の周波数は 35 kHz, 下金型への供給電力は 4.4 kW とし, 60 s 間通電を行った. その間の上下金型のプレス面の温度分布は, K 型熱電対とデータロガー (ZR-RX40, オムロン) を用いて室温で測定した. なお, 熱電対も誘導加熱されるが本研究ではその影響は, 0.5 °C 以下であったため, この影響は考慮していない.

温度分布および電流密度分布の有限要素解析には, 汎用工学シミュレーションソフトウェア COMSOL Multiphysics®を用いた. 解析では 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し, 金型の温度分布を算出した. 解析モデルは, Fig. 3 (c)に示すように, 実験に用いた上下金型と同一の寸法とし, 空気への放熱を考慮するために, 周囲には空気の層を設定し, 要素には四面体要素を用いた. 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¹⁰⁾を示す. また, 空気層の最外層は, 20 °C に固定し, 実験条件と同様に, 高周波交流電流の周波数は 35 kHz, 下金型に対する供給電力を 4.4 kW とし, 銅フィードに電力を 60 s 間供給した際の温度分布および電流密度分布を求めた.

2・1・2 上金型の温度におよぼす伝熱の影響 下金型へ高周波交流電流を通電し, 下金型から上金型への伝熱を考慮しない場合の上金型の加熱特性を評価するために, Fig. 4 に示すように上下金型間に幅と長さが金型と同寸法で厚さ 2 mm の熱伝導率が 0.08 W/m・K の断熱材を挿入したモデルで, 2・1・1 と同様の通電条件で解析を行った.

高周波交流電流の直接通電により発熱した下金型から上金型への伝熱の影響を実験により明らかにするために, 下金型の代わりに Fig. 5 に示すようにホットプレートを 160 °C あるいは 50 °C に設定し, 上方 5 mm に金型を設置し, 金型の端部および中央部の温度を測定した.

2・1・3 下金型への通電による成形素材となる炭素繊維の発熱特性 下金型への通電による成形素材となる炭素繊維の発熱特性を明らかにするために, PAN 系炭素繊維平織物 (TR3110M, 目付 200 g/m², 積層構成[0°/90°], 三菱ケミカル) と, 比較対象として, 不導体であるガラ

ス繊維平織物（日東紡績，WFA230-100BS6，積層構成 $[0^\circ/90^\circ]$ ，目付 200 g/m^2 ）に対して，本研究で提案している下金型の上に高周波交流電流を通電する方法（本成形法：DR）と金型からの伝熱だけで加熱されるホットプレス成形の2種類の方法を用いて，それぞれの平織物の温度を比較した。

Fig. 3 Schematic drawing of the mold heated by direct resistance heating and induction heating with high frequency alternative current.

Table 1 Materials properties for FEM analysis¹⁰⁾.

	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

金型からの熱伝導測定には，精密万能試験機（島津製作所，AGX-250kN）を加圧装置とし，簡易温度調節器（富士電熱開発社）とカートリッジヒータにより 200°C に保った金型を用いた装置（ホットプレス成形機）を利用した．以降この装置を用いた成形をホットプレス成形（Hot press）と称することとする．2・1・1に示した直接通電抵抗加熱プレス機およびホットプレス成形機の金型プレス面に，Fig. 6に示すようにテフロンシート，炭素繊維平織物あるいはガラス繊維平織物を置き，これらの温度を熱電対を用いて測定した．

Fig. 4 FEM model of the mold with heat insulator.

Fig. 5 Experimental set up for temperature measurement of thermal conduction from hot plate to mold.

Fig. 6 Experimental set up for temperature measurement of carbon fiber or glass fiber heated by DR and hot press.

2・2 結果および考察

2・2・1 実験結果および解析結果の比較 通電開始後 60 s 後の下金型プレス面の長手方向 (以下, Line A と称する) および幅方向 (以下, Line B と称する) の実験と FEM 解析により求めた温度分布および FEM 解析により求めた電流密度分布を Fig. 7 に示す. 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. 下金型の Line A, Line B 両者において両端の温度が中央部に比べて高くなった. これは, それぞれの(ii)に示す電流密度分布からわかるように角部において電流が集中するエッジ効果¹¹⁾のために温度が高くなったと考えられる. また, Line A においては, これらの結果は左右対称であったのに対して, Line B では, 銅フィードに近い内側は, 外側に比べ電流密度が高くなり, これに対応して内側が外側よりも温度が高くなった. これは下金型と, 対面する銅フィードにおいて電流が逆向きに流れているため, 近接効果により, 銅フィードと金型での近接面で磁場が大きくなり, 電流が流れやすくなった¹⁰⁾ためと考えられる.

Fig. 8 に上金型プレス面の Line A, Line B の温度分布,

Fig. 7 Temperature and current density distribution of lower mold on Lines A and B in experimental and analyzed results.

電流密度分布および磁束密度分布を示す. Line A, B 両者において室温より金型の温度が高くなっており, 下金型

Fig. 8 Temperature, current density and magnetic flux density distribution of upper mold on Line A and B in experimental and analyzed results and temperature distribution with heat insulator on Line B.

への高周波交流電流の通電により、上金型が電磁誘導加熱されていることがわかる。また Line A での電流密度は、端部が中心部に比べて高くなった。Fig. 7 (a) (ii)に示したように下金型の端部は、エッジ効果により高い電流密度を示していた。これにより中央部より端部で Fig. 8 (a) (iii)に示すように磁束密度が高くなり、Fig. 8 (a) (ii)に示すように電流密度が高くなったと考えられる。その結果、上金型の Line A において端部で中心部より温度が高くなったと考えられる。一方、Fig. 8 (b)に示す Line B においては、端部よりも中央部の磁束密度および電流密度が高い値を示した。下金型から発生した磁場の重なりが端部に比べて中心部で多くなったために、Fig. 8 (b) (iii)に示すように磁束密度が高くなり、Fig. 8 (b) (ii)に示すように電流密度が高くなったと考えられる。

2・2・2 上金型の温度におよぼす伝熱の影響 上下金型の間に断熱材を挿入した時の上金型プレス面の Line B において、解析により求めた温度分布を Fig. 8 (b) (i)にあって示している。断熱材を挿入した場合、上金型の Line B の両端部で、断熱材なしに比べて温度が低くなっていることがわかる。

160 °C に設定したホットプレートから 5 mm 離れた金型の端部と、50 °C に設定したホットプレートから 5 mm 離れた金型の中央部の温度履歴を Fig. 9 に示す。金型の Line B の内側の端部および中央部に相当する箇所では、60 s 間に 61.5 °C、中央部では 27.6 °C まで温度が上がることをわかる。

以上の結果より、上金型プレス面においては、下金型への高周波交流通電により生じた電磁誘導加熱に加えて直接通電抵抗加熱により加熱されている下金型からの伝熱により加熱されるため、Fig. 8 (b) (i)に示すように金型の端部、特に下金型において温度が高い内側で温度が高くなったと考えられる。

2・2・3 下金型への通電による成形素材となる炭素繊維の発熱特性 本成形法とホットプレス成形の金型上に設置したテフロンシート上面と炭素繊維の温度測定結果を Fig. 10 に示す。本成形法では炭素繊維の温度がテフ

ロンシートの上面の温度より高いのに対し、ホットプレス成形では、炭素繊維の温度がテフロンシート上面より低い結果となった。ホットプレス成形においては、金型表面からテフロンシートを介して、上部の炭素繊維に熱が伝わったのに対して、本成形法では、金型からの伝熱に加えて電磁誘導で発生する誘導電流により、炭素繊維自体が発熱しているものと考えられる。したがって、テフロンシート上面の温度より炭素繊維の温度が高くなったと考えられる。

つぎに、本成形法の金型上において、テフロンシート、炭素繊維平織物とガラス繊維平織物の温度測定を行った結果を Fig. 11 に示す。電気伝導体である炭素繊維のみがテフロンシート上面温度より高く、不導体であるガラス繊維はテフロンシート上面温度よりも低い温度であった。この結果からも、電気伝導体である炭素繊維が下金型への高周波交流電流の通電による、電磁誘導により発熱することがわかる。

以上より対面する金型の一方のみに高周波交流電流を直接通電し、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を加熱することができることがわかる。

3 温度分布に及ぼす上金型の板厚および材質の影響

3・1 解析モデルおよび解析条件 上金型の板厚および材質が温度分布に及ぼす影響を明らかにするために Fig. 12 に示すように SUS430 を素材とした $t = 10$ (SUS430)、

Fig. 10 Temperature history of carbon fiber and teflon sheet.

Fig. 9 Temperature history of the corner and center points heated with heat transfer from hot plate.

Fig. 11 Temperature history of carbon fiber and glass fiber.

20 (SUS430), 30 (SUS430) の3種類の板厚を有するモデルと, SS400 を素材とした板厚 $t = 10$ (SS400) の合計4種類のモデルに対して $2 \cdot 1 \cdot 1$ と同様に解析を行った.

3・2 解析結果および考察

Fig. 13 に上金型の板厚と材質が異なる各モデルの上金型プレス面の Line B における温度分布および電流密度分布を示す. 上金型の板厚が薄いほど, 高い温度分布を示し, 電流密度分布については, 金型の板厚によらず一定であった. なお, これらのモデルにおいて, 下金型プレス面の Line B における温度分布と電流密度分布は, Fig. 7 と同一の結果であり, モデルによる差はなかった. 高周波交流電流において表面電流の e^{-1} 倍の電流となる表面からの距離である表皮深さ δ は, 次式で表すことができる¹²⁾.

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

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. この式より SUS430 において周波数 35 kHz における表皮深さを算出すると 0.19 mm となる. いずれのモデルにおいても金型の厚さに比べて表皮深さが十分に小さいため, 上金型電流密度分布は板厚に寄らず一定

になったものと考えられる. したがって, 上金型の厚みが薄いほど, 上金型の体積が小さくなり, 熱容量が小さくなるため, 上金型の厚みを薄くすることで上金型の温度分布が高くなったと考えられる.

上金型の材質については, SS400 のほうが SUS430 よりも高い温度分布および電流密度分布を示した. 渦電流は磁束密度の 2 乗に比例する¹³⁾ため, SUS430 よりも高い 1000¹⁴⁾の比透磁率を有する SS400 は, 磁束密度が高くなり, 温度分布が高くなったと考えられる.

4 結 言

本研究では, 対面する金型的一方のみに高周波交流電流を直接通電し, 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を加熱する成形方法の開発を目的とし, 最も単純な形状として平板を成形する場合を想定した一対の金属直方体を金型と見なして, 有限要素解析を用いて温度分布や電流密度分布解析を行うとともに, 実験結果との比較を行った. また, 炭素繊維および比較対象とするガラス繊維に対して, 高周波交流電流を通電した金型からの電磁誘導と金型からの熱伝導による加熱を比較した. また, 上金型の板厚や材質が金型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.

1. 対面する金型的一方のみに高周波交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を加熱することができる.
2. 通電を行っていない金型の厚みを薄くし, 高磁性材料を金型に使用することで, 金型プレス面を効率的に加熱することができる.

参 考 文 献

- 1) 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, pp.24-28 (2012).
- 2) S. Baba, "Continuous fiber reinforced thermoplastics CFRTP-GFRTP and market", Journal of the Japan Society for Precision Engineering, Vol.81, No.6, pp.503-506 (2015).
- 3) M. Fiorotto and G. Lucchetta, "Experimental investigation of a new hybrid molding process to manufacture high-performance composites", International journal of material forming, Vol.6, No.1, pp.179-185 (2013).
- 4) K. Tanaka, N. Kohashi, Y. Kinoshita, T. Katayama and K. Uno, "Compression molding of carbon fiber reinforced thermoplastics using non-woven stitched multi-axial cloth by means of induction heating system", Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol.58, No.7, pp.642-648 (2009).
- 5) K. Tanaka, R. Harada, T. Uemura, T. Katayama and H. Kuwahara, "Rapid pipe molding process of carbon fibre reinforced thermoplastics by high-frequency

Fig. 12 FEM models of different thickness and material of upper mold.

Fig. 13 Temperature and current density distribution of upper mold on Line B in each thickness and materials of upper mold.

- direct resistance heating”, WIT Transactions on the Built Environment, Vol.112, pp.133-139 (2010).
- 6) D. Yao, T.E. Kimerling and B. Kim, “High-frequency proximity heating for injection molding applications”, Polymer Engineering and Science, Vol.46, No. 7, pp.938-945 (2006).
 - 7) S. C. Chan, P. S. Minh, and J. A. Chan, “Mold temperature control using high-frequency proximity effect induced heating”, International Communications in Heat and Mass Transfer, Vol.39, pp.216-223 (2012).
 - 8) S. C. Chan, H. S. Peng, and W. R. Jong, “Simulations and verifications of induction heating on a mold plate”, International Communications in Heat and Mass Transfer, Vol.31, No. 7, pp.971-980 (2004).
 - 9) R. Rudolf, P. Mitschang and M. Neitzel, “Induction heating of continuous carbon-fiber-reinforced thermoplastics”, Composites Part A, Vol.31, pp.1191-1202 (2000).
 - 10) 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, Japan, Vol.67, No.3, pp.367-374 (2018).
 - 11) T. Okabe, K. Yasuda and K. Nakata, “Dynamic observations of welding phenomena and finite element analysis in high frequency electric resistance welding”, Japan welding society, Vol.32, No.3, pp.156-163 (2014).
 - 12) M. Katsurai, “Fundamental electromagnetism for science and engineering”, Ohmsha Ltd, pp.158-161 (2000).
 - 13) K. Funahashi, “Denkizikigaku”, Tokyo Denki University Press, pp.489-498 (1962).
 - 14) M. Horii, N. Takahashi and J. Takehara, “Optimization of transformer tank shield model using 3-D finite element method”, IEEJ Transactions on Power and Energy, Vol.122, No.1, pp.45-50 (2002).