544 大規模電着塗装シミュレーションの境界要素解析手法

Large Scale simulation for electrodeposition coating

○ 水野 哲 (東工大) 正 天谷 賢治 (東工大)

Tetsu MIZUNO, Tokyo Institute of Technology, 2-12-1, O-okayama, Meguro-ku, Tokyo 152-8552

Kenji AMAYA, Tokyo Institute of Technology

Key Words: BEM, Boundary Element Method, Electrodeposition coating, Mesh simplification, Laplace equation,

1. 緒 言

自動車のような複雑な形状の被塗装物にも均一に塗膜が付着し内部まで塗装のできる電着塗装は、現在、自動車の下塗り塗装として一般的に用いられている。

しかし、補強部材が幾重にも重なり合った部分は、塗膜が生成しづらくなることもある。そのため、現在のところは塗膜が生成しづらい箇所を設計過程における経験や勘によって予測し、電着穴や隙間を設けたり、電圧の調整などにより均一に塗膜が生成されるよう対処している。

電着塗装のシミュレーションにより、無駄なランニングコストの削減、開発プロセスの短縮をすることができるので、電着塗装シミュレーション技術の開発は望まれている。

電着塗装の原理は、電気めっきと同じであり、実際に電着塗装のシミュレーションをしている例もある⁽¹⁾⁽²⁾。

しかしこれらの研究では、センターピラーやドアの一部のみでの解析にとどまっている。自動車は複雑な形状やなめらかな曲面からできており、要素数が多く、ボディ全体を解析しようとする、メモリや計算時間の問題により計算が不可能となってしまう。

本研究では大規模電着塗装シミュレーションの境界要素解析手法を開発することを目的とする。CGのMesh simplificationにより要素数を減少し、全体解析を行う。全体解析の境界条件は、局所的に詳細解析を繰り返して構築する。

この手法を用いれば、ラプラス場において電流密度分布を求める問題について同様に計算でき、例えば複雑形状物体の電気めっきシミュレーションや、大規模腐食解析問題にも応用できる。

2. 数理モデル

電着塗装問題における、電着槽内、アノードおよびカソードの各領域の数理モデルについて説明する。

Fig. 1に示すように、電着槽内の電解液がしめる領域を Ω とし、 Ω は $\Gamma_n + \Gamma_a + \Gamma_c (= \Gamma)$ で囲まれているとする。ここでは、 Γ_n は電流密度が既知の境界（電着槽の側壁、液面）を、 Γ_a および Γ_c はそれぞれアノードおよびカソード表面境界を表す。領域 Ω における電位分布を ϕ 、境界 $\Gamma_a, \Gamma_c, \Gamma_n$

Fig.1 Electrodeposition-coating

上の ϕ の値を ϕ_a, ϕ_c, ϕ_n 、電流密度 i の値を i_a, i_c, i_n とする。電着槽液の電気伝導度を κ とする。アノード、カソード間に電圧をかけ時間が経過すると、カソード表面には塗膜が

析出する。塗膜の抵抗によって表面の状態が変化するので、境界条件が時間変化する非定常問題であるが、塗膜の生成速度は電位拡散速度に比べ十分に遅いので、微小時間内では境界条件の変化しない定常問題として扱える。そこで、単位時間ごとにカソード表面に析出する塗膜生成量を求め、境界条件を更新する操作を繰り返し、解析を行う。

2.1 電着槽内の電場 単位時間内では、領域 Ω における電位 ϕ は電極近傍を除いて、次のLaplace方程式を満たす。

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad (1)$$

式(1)の境界条件は次式で与える。

$$\begin{cases} \phi = \phi_a & \text{on } \Gamma_a \\ \phi = \phi_c - Ri & \text{on } \Gamma_c \\ i = -\kappa \frac{\partial \phi}{\partial n} = i_n = 0 & \text{on } \Gamma_n \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 R はカソード表面に析出された塗膜の抵抗($\Omega \cdot m^2$)であり、塗膜厚さ h により一意に決まる値である、また、 $\partial/\partial n$ は外向き法線方向の微分を表す、

2.2 カソード表面における膜の成長 カソード表面において、塗膜析出量はファラデーの法則より、流れる電流密度 i から、求めることができる。塗膜厚さを h とすると、次式の関係がある。

$$\frac{dh}{dt} = C(i_c - i_0) \quad (3)$$

ここで、 C は定数であり、電着塗料の分子量、ファラデー定数からなる定数である。電流を流す際に、一部の OH^- イオンは拡散によって消費されてしまうので、そのために、 i_0 によって補正する。

3. 数値解析手法

手法の手順

Fig.2にしたがって本手法の概要を説明する。

1. Mesh simplification

Mesh simplificationの手法により、大規模メッシュの

Fig.2 Schematic view of the method

要素をいくつかの要素群 $G_1, G_2, \dots$ にグループ化し、少要素数メッシュを生成する。(3) 大規模メッシュを M_{fine} 、少要素数メッシュを M_{coarse} とする。

2. BEM in 'Global'

M_{coarse} において BEM により、大域的な電位・電流密度分布を計算する。 M_{coarse} は要素数が少ないので短時間で計算が可能となる。

3. BEM in 'Local'

各要素群ごとに BEM 解析を行う。2 の結果を考慮した境界条件で計算する。 M_{fine} の全要素について電位・電流密度分布が求まり、電流密度から成長塗膜厚さも得ることが出来る。

4. update 'Global' B.C.

各要素群内の塗膜の抵抗値の合計と、 M_{fine} と M_{coarse} の面積比から、 M_{coarse} の各要素の境界条件を決定する。

5. 2~4 の操作を必要回数繰り返す。

3.1 Mesh simplification

CG の分野で活発に研究されている、Mesh simplification は膨大なポリゴンデータを扱いやすくするために、ポリゴン形状を損なうことなくメッシュ数を削減する手法である。(3)(5)

Mesh simplification のアルゴリズムは数種類あるが、ここではグループ化のできる頂点集約型を用いる。これは、節点間の距離や幾何学的特徴などからなる評価関数を各節点ごとに計算し、全体の形状に最も影響の小さい頂点 2 つの組を 1 つに集約するというものである。

Fig.3 Mesh simplification

Fig.3 に例を示す。要素数 9、節点数 9 のメッシュが Mesh simplification され、要素数 7、節点数 8 になっている。すなわち node1 と node2 が 1 つの新しい頂点 node2' に集約される。ここでは、Mesh simplification によって消失してしまった要素 8 と 9 がそれぞれ 1' と 4' に統合されたと考えられることによって、要素のグループ化をする、つまり、要素 $\{1, 8\}, \{4, 9\}$ がそれぞれ要素群となり、それぞれ $\{1'\}$ と $\{4'\}$ の要素に集約されたと考えられる。

この操作を繰り返し、要素群にグループ化する操作と新しい要素を生成する操作を同時に行う。

要素数 N の大規模メッシュを M_{fine} 、その要素を e_j (j は要素番号) とする。Mesh simplification によって形成された要素群を G_k (k は群番号) とする。 M_{fine} を n 個の要素群にグループ化するとする ($n < N$)。

$$M_{fine} = \{e_1, e_2, \dots, e_N\} = \{G_1, G_2, \dots, G_n\} \quad (4)$$

$$G_k = \{e_a, e_b, \dots\}, \quad |G_k| = n_k \quad (5)$$

$$\{e \mid (M_{fine} \ni e) \cap (\overline{G \ni e})\} = \emptyset \quad (6)$$

$|G_k| = n_k$ は要素群の 1 つ G_k に n_k 個の要素が含まれていることを表す。式 (6) の $\emptyset$ は空集合を表しており、 M_{fine} の要素はいずれかの要素群に必ず属することを意味している。また 1 つの要素群 G_j を 1 つの要素 E_j (j は要素番号) で代表させることによって要素数 n の少要素数メッシュ M_{coarse} を生成することが出来る。

$$M_{coarse} = \{E_1, E_2, \dots, E_n\} \quad (7)$$

3.2 BEM in Global

3.1 で生成された少要素数メッシュ M_{coarse} において、大域的な電位・電流密度分布を計算する。 M_{coarse} は要素数が少ないので短時間で計算が可能となる。式 (1) の境界条件を次式のように与える。

$$\begin{cases} \phi = \phi_a & \text{on } \Gamma_a \\ \phi = \phi_c - Ri & \text{on } \Gamma_c \\ i = -\kappa \frac{\partial \phi}{\partial n} = 0 & \text{on } \Gamma_n \end{cases} \quad (8)$$

ここで、 R は M_{coarse} の各要素 E ごとに異なる値である。

3.3 BEM in Local

Fig.4 のように開領域に 1 つの要素群のみ存在するとして解析する。要素群 G_k での計算では境界条件は次式で与える。

$$\begin{cases} i = I^k & \text{on } \Gamma_\infty^k \\ \phi = \phi^k - R^k i & \text{on } \Gamma_c^k \\ i = -\kappa \frac{\partial \phi}{\partial n} = 0 & \text{on } \Gamma_{tail}^k \end{cases} \quad (9)$$

$$I^k = S^k i^k \quad (10)$$

ここで、 ϕ^k, i^k, R^k はそれぞれ 3.2 の結果である、要素 E_k の電位、電流密度、塗膜の抵抗 ($\Omega \cdot m^2$) を表している。また、 $\Gamma_c^k, \Gamma_{tail}^k$ それぞれ要素 e の表面、裏面の境界を表す。また、 Γ_∞^k は無限境界であり、無限位置からの総電流量を境界条件として与える。

この計算を全要素群に対して行い、 M_{fine} 全要素の詳細な電位・電流密度分布を得る。

Fig.4 Boundary Condition of 'Local' calculation

3.4 update 'Global' B.C.

Local で BEM 解析をして得られる要素の電位を $\phi_1^k, \phi_2^k, \dots, \phi_{n_k}^k$ 、電流密度を $i_1^k, i_2^k, \dots, i_{n_k}^k$ とする。また、面積を $s_1^k, s_2^k, \dots, s_{n_k}^k$ とする。

Global で与える境界条件 Γ^k は Local での解析結果、塗膜厚さから求まる抵抗値 $R_1^k, R_2^k, \dots, R_{n_k}^k$ を用いて、次式のようにして更新する。

$$\phi = \phi_c - R^k i \quad \text{on } \Gamma_c^k \quad (11)$$

$$R^k = \frac{S^k}{\sum_{p=1}^{n_k} s_p^k} \sum_{q=1}^{n_k} R_q^k \quad (12)$$

4. 結言

従来は計算が不可能であった大規模電着塗装シミュレーションを、Mesh simplification を適用し、解析する手法を提案した。今後は計算の効率性、精度の向上などの検証を行う。

文 献

- (1) J.M.W.Baynham, R.Adey, V.Murugaian & D.Williams, 'Simulating electro-coating of automotive body parts using BEM', Simulation of Electrochemical Processes
- (2) 小森谷 徹 (富士重工業) '自動車の電着塗装工程における塗膜厚さ予測手法' 日本機械学会
- (3) Michael Garland, Paul S.Heckbert, 'Surface Simplification Using Quadric Error Metrics', SIIGRAPH 97, Computer Graphics Proceedings
- (4) 御堂河内奨, 岡保宏, 根本幸宏 '電着塗装における均一性塗装性向上技術' 塗料の研究 136 号 (2001 年)
- (5) Jovan Popovic, Hugues Hoppe 'Progressive Simplicial Complexes' SIIGRAPH 97, Computer Graphics Proceedings