

有限要素法を用いた電着塗装のつき廻り計算 シミュレーション手法の研究

Estimation of Throwing Power and Coating Thickness of ED Coating Using FEM.

竹内 寿浩* 今中 正* 渡邊 弘和*
Toshihiro TAKEUCHI Tadashi IMANAKA Hirokazu WATANABE

要 旨

電着塗装のつき廻り量を計算シミュレーションする手法として、電着塗装のつき廻り機構の性質を電気モデル化した。さらに、電着塗装つき廻りを3次元モデルで計算するためにこの電気モデルを熱伝導機構との相似性を利用し熱伝導モデルへ置き換え、有限要素法を用いて計算する手法を考案した。本計算手法は実際の電着塗装つき廻り結果と良く一致した。

ABSTRACT

A simulation study of the throwing power and coating thickness of ED-coat, by substituting an electric circuit model for the ED-coat attributes. The electric circuit model is substituted by a three dimensional FEM thermal conduction model. The results achieved by this method were in correlation with experimental values.

1. まえがき

電着塗装はFig. 1で示すように溶液中に被塗装物と電極を配置して直流電圧を加え、塗装粒子を電気泳動により被塗装物に付着させる塗装手法である。本方式は、塗膜が被塗装物に均一に付着し塗装欠陥も少ないため防食性能も良く、自動車の下塗り塗装として一般的に用いられている。しかしながら電着塗装は電気の流れにくい場

所、たとえばFig. 2に示すボディの袋構造部などは電流密度が低下し塗膜が析出しなくなる短所がある。

この現象を防止するためには、袋構造部に穴や隙間を作り内部の電流密度を上げる必要があり、それに必要な穴数や面積などを計算できる計算シミュレーション技術の開発は、車両開発の効率向上はもとより塗料開発にも利用できるため種々の研究が行われている^{1) 2)}。

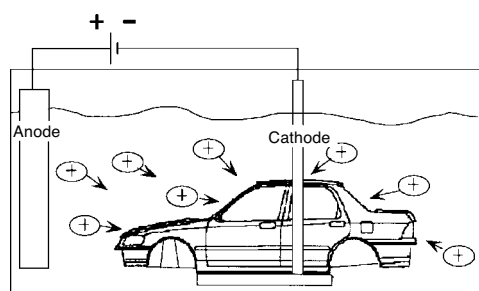


Fig. 1 ED Coating Method

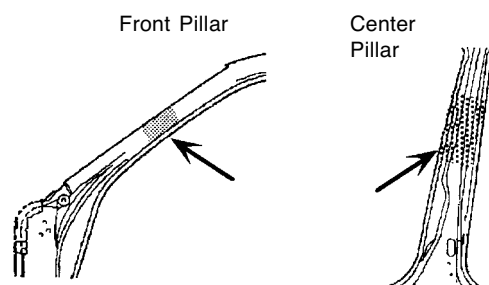


Fig. 2 Example of Areas Difficult for ED Coating

* 栃木研究所

しかし、電着塗装の場合めっきと異なり塗装時間の経過と共に内部へ流れる電流が増加し、塗装の付着量を計算予測するためには、3次元モデルを用いた電場解析を行い経過時間後の電流密度を計算する必要があり、実用化されていない。

本研究では電着塗装の付着機構をイオンの吸着現象の類似性からコンデンサモデル化し、さらに、電着塗装のつき廻り機構を等価電気モデル化した。

この等価電気モデルを3次元モデルとして計算するために、熱伝導機構との相似性を利用して熱伝導モデルへ置き換え、有限要素法を用い計算シミュレーションを行う手法を開発した。

2. 電着塗装機構の等価電気モデル化

カチオン電着では被塗装物をマイナスに帯電させ、プラスに帯電させた分散粒子（樹脂分、硬化材、顔料等からなるエマルジョン）を被塗装物に電気泳動で吸着、脱水するモデルが考えられている。

この帯電粒子の吸着現象は、イオンの吸着現象である電気二重層と類似性がある。電気二重層モデルでは通常イオンが熱運動を行い整列しないため、イオンの分布を統計的手法であらわす試みがなされている。しかし電着塗装では塗装粒子が電極の被塗装物に析出し固定される。そこで、1890年に Helmholtz³⁾ により与えられた Fig. 3 で示す簡単な平行板コンデンサモデルとして扱うことができる。電着塗装機構の電気モデル化を検討した。

荷電塗装粒子の電気泳動抵抗を電着液電気抵抗 R_0 、電気泳動電圧を電気負荷電圧 E 、電気泳動粒子の吸着量すなわち塗膜厚さを電気コンデンサの荷電 Q にそれぞれ置き換えると、Fig. 4 で示すコンデンサ C と抵抗 R_0 からなる電気回路モデルであらわすことができる。

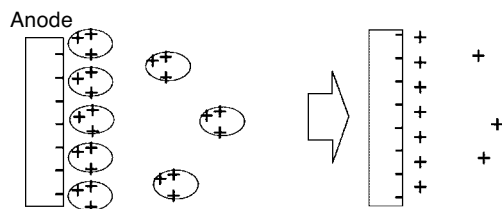


Fig. 3 Substitute ED Coating Model to Condenser Model

本モデルは荷電塗装粒子を電子（イオン）に置き換えているため、電気モデルのコンデンサ荷電量は直接電着塗装時の荷電塗装粒子の物理量をあらわさないが、見かけ上電着時の荷電量と塗膜厚さが比例し、それぞれの間の関係は相似である。

そこで実際の塗膜生成過程とコンデンサに荷電が蓄積される電気モデルを比較した。Fig. 5 は Fig. 4 の電気モデルの t 時間後の荷電 Q をあらわす (1) 式と、実際に電着塗装の膜厚変化を測定した結果を示す。この結果から本電気モデルで電着時の塗膜析出過程が再現できると考えた。

$$\text{Coating Thickness}(Q) = CE \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{R_0 C}\right) \right) \cdot (1)$$

電着塗装は Fig. 6 に示すように、電着液電気抵抗 R_0 の増加により電着塗装の塗膜厚さは減少し、単位面積のパイプ内へのつき廻り距離は短くなる。ここで、電着電圧を E 、電気泳動粒子の吸着モデルのコンデンサー容量を C として、この電着塗装の性質を近似的に電気回路へ置き換えると Fig. 7 で示される等価電気モデルが得られる。

さらに、本電気モデルにおいてパイプ内部への距離 X によるパイプの面積 S およびパイプの周長 L の変化を考えると Fig. 8 で示す電気モデルとなる。

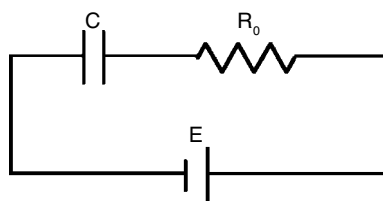


Fig. 4 Basic Electric Circuit Model of ED Coating Method

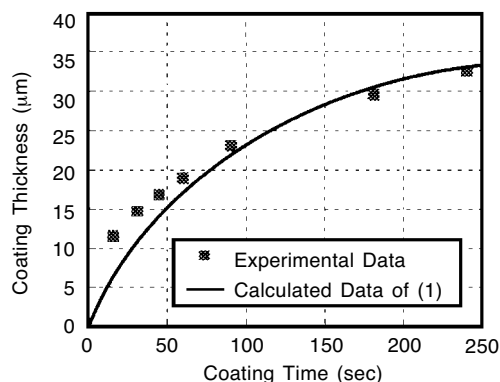


Fig. 5 Comparison of Experimental Value and Calculated Value

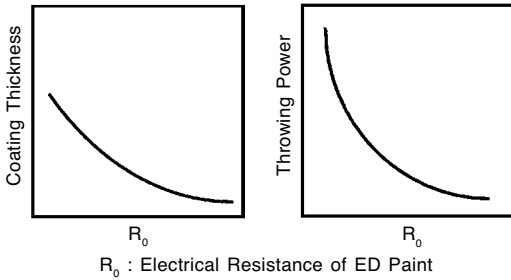


Fig. 6 Basic Attribute of ED Coating

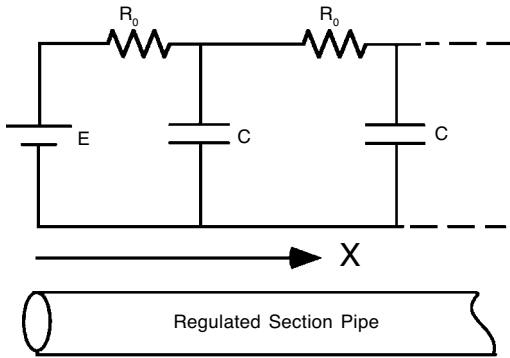


Fig. 7 Basic Electric Circuit Model of ED Coating Method

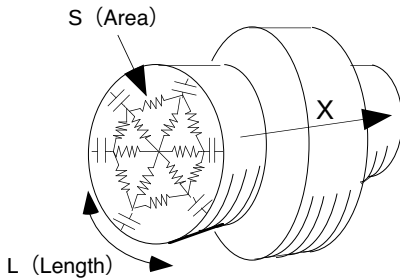


Fig. 8 Structuralized Electric Circuit Model

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = \frac{1}{R_0 C} \cdot \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} \quad \dots \dots (2)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = a \frac{S(X)}{L(X)} \cdot \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} \quad \dots \dots (3)$$

ϕ : Potential Voltage

t : Time

R_0 : Resistance per Regulated Length

C : Capacitance per Regulated Length

a : Throwing Power Constant

3. 電気モデルから熱モデルへの置き換え

電着塗装のつき廻りを計算するためには、この電気回路を計算する必要があるが開発段階で使える実用的な計算手法がない。そこでこの等価電気モデルをさらに熱計算モデルへ置き換えることを検討した。

単位面積のパイプをモデル化した Fig. 7 で示される電気モデルの、抵抗およびコンデンサを微小要素とすると、(2) 式が成り立つ。ここで $1/R_0 C$ は電着塗装つき廻り率を示す。

この単位面積のパイプがパイプ口元からの距離 X によりパイプ面積 S 、パイプ周長 L が変化する場合、電着液電気抵抗 R_0 、コンデンサ容量 C は (3) 式であらわせる。

この方程式は一般形状の場合理論解はないが、フーリエの法則により電気伝導と熱伝導は同一伝達式であらわれ、(3) 式は熱伝導方程式と同一型である。さらに溶液の電気伝導はオームの法則が成り立つことが知られており (4)、(5) 式より電気伝導と熱伝導を相似として扱える。この相似関係により電着塗装つき廻り機構から熱伝導への置き換えを行い、複雑な構造物内部の電着液電気抵抗を有限要素法による熱伝導モデルとして計算を試みた。

Electrical Equation

Thermal Equation

$$I = \frac{1}{R} E \quad \longrightarrow \quad q = -k \frac{dT}{dx} \quad \dots \dots (4)$$

$$dQ = C dE \quad \longrightarrow \quad dQ = c dT \quad \dots \dots (5)$$

I : Current

R : Resistance

E : Voltage

dQ : Fine Variation of Electricity

C : Electrical Capacity

dE : Fine Variation of Voltage

q : Heat Flux

k : Thermal Conductivity

dT/dx : Gradient of Temperature

dQ : Fine Variation of Thermal

c : Thermal Capacity

dT : Fine Variation of Temperature

4. 熱計算モデルの有限要素法計算

Fig. 9 に Fig. 7 の電気モデルから置き換えた熱伝導モデルを示す。

このモデル化では塗膜形成部に相当するコンデンサ要素部を、熱容量要素部 β で置き換え熱容量 c を持たせたが、コンデンサが異方性を持つのに対し通常の熱伝導が等方性という特性の違いがある。そのため、熱伝導モデルでは熱容量要素部 β において X 方向への熱伝導が生じてはならない。また、Y 方向への抵抗 r は 0 とする必要がある。そこで有限要素法計算モデル上では α 部と熱容量要素部 β のグリッドを共有させ熱容量要素部 β を膜要素であらわした。

この電気モデルから熱伝導モデルへの置き換え精度を検証するため、単位面積のパイプモデルを熱伝導モデルの有限要素法により解析したところ電気モデル計算結果と一致し、熱計算モデルで差異無く計算できることを確認した。

Fig. 9 に示した熱伝導モデルを有限要素法モデルとして実際に計算する場合、塗膜厚さはコンデンサ C への荷電量すなわちコンデンサモデル部への入熱量となる。そこで (5) 式の関係から膜要素化されたコンデンサモデル部への入熱量を膜要素部の温度としてあらわし、塗膜厚さと定義した。

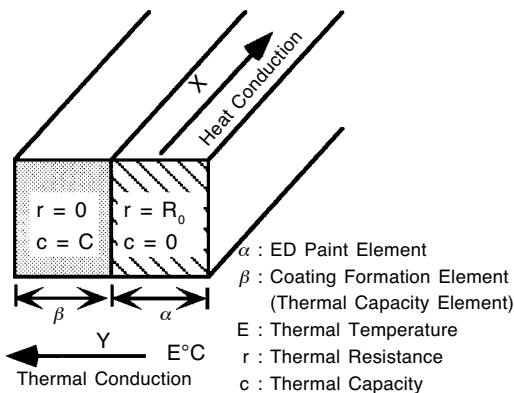


Fig. 9 Basic Thermal Conduction Model of Electric Circuit Model

5. 電着塗装つき廻りパイプモデルの近似式との比較

本計算モデルによる電着塗装つき廻り計算シミュレーションと、パイプ法の実験で得られた近似式とのコリレーションを行い、本計算モデルの妥当性を確認した。

(6)式は単純なパイプ内面への電着塗装つき廻りをあらわす実験式である^{4) 5)}。本実験式では被塗装物の表面抵抗と電着塗料以外の電気伝導は考慮されないため、電気モデルは Fig. 4 に示すコンデンサ C と抵抗 R_0 のみの回路となり、熱伝導モデルは Fig. 9 に示す簡単なモデルであらわせる。本実験式の中で $R/r = 100$ とした場合 Table 1 で示すように有限要素法の計算値と実験式で得られた結果は誤差範囲内で完全に一致し、本モデルの検証結果では電着塗装つき廻りの基本性質があらわされていることが確認された。

$$Th^2 = (a/L) \cdot (R/r) \dots \dots \dots (6)$$

Th : Throwing Power

a : Area of Cross Section

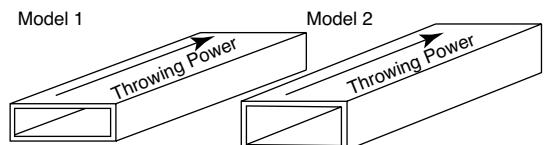
L : Distance Round the Pipe

r : Specific Resistance of the Paint

R : Resistance by Voltage and Paint Condition

Table 1 Comparison of Experimental Expression and FEM Result of Simplified Thermal Conduction Model

	Model 1	Model 2
a (Area of Pipe Cross Section)	210	420
L (Distance Round the Pipe)	74	88
Throwing Power by Experiment	16.85	21.85
Throwing Power by Simulation	16.85	21.85



6. 有限要素法による電着塗装 つき廻り計算の実用化

電着塗料膜厚と通電荷電量を測定した結果をFig. 10に示す。Fig. 10より塗料粒子以外の通電粒子はあるものの、実用上荷電量と膜厚はほぼ比例し塗装粒子以外の通電は無視しても大きな差異は無いと考えた。

そこで、Fig. 9に示す計算モデルと、実際の電着塗装つき廻り実験値を比較した。電着塗装つき廻りのテストにはFig. 11に示すテストピースを製作し計算結果と比較した結果Fig. 12に示す差異が見られた。本来被塗装物表面にリン酸亜鉛皮膜などの抵抗があるため、膜厚の薄い部分がさらに薄く計算されると予測されたが、実際には膜厚の薄い部分で計算シミュレーション値は実験値より厚く計算された。

この原因の解析として電圧とクーロン効率の測定を行った結果Fig. 13で示す関係が得られた。これはクーロン効率が電圧に依存していることを示す。この差異を補正するため、本モデルであらわされる温度すなわち塗膜厚に対してFig. 13で得られた値を補正值として掛け合わせて実塗膜厚とし、Fig. 14の結果が得られた。

本計算手法の精度を確認するため、さらに構造の異なるテストピースを作成し実験値と本計算手法と比較したところ、大きさと形状を変化させてもほぼ良好なシミュレーション結果が得られた (Fig. 15)。

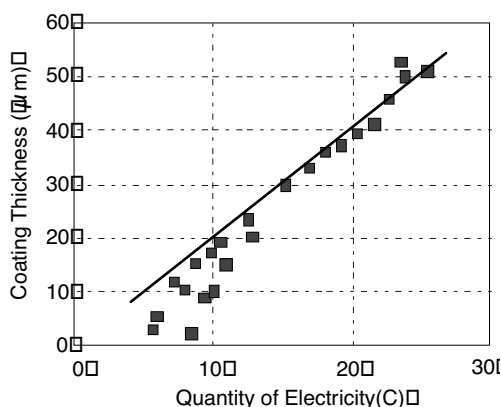


Fig. 10 Coating Thickness vs. Quantity of Electricity

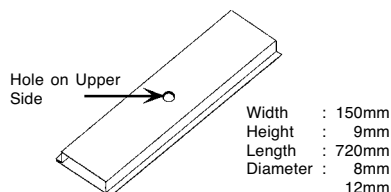


Fig. 11 Experimental Model of ED Coating

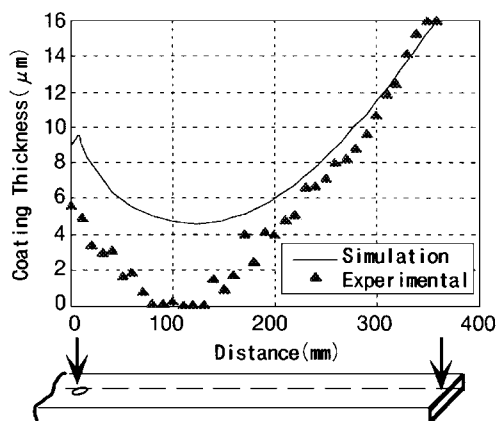


Fig. 12 Comparison of Experimental Value vs. Simulation Value

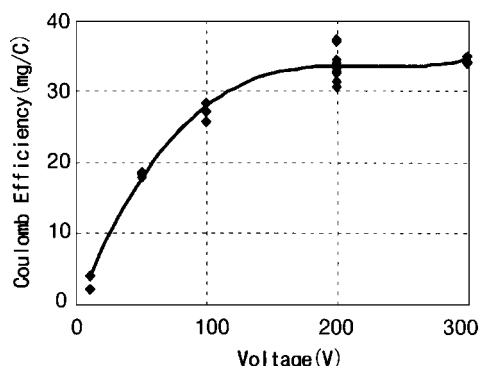


Fig. 13 ED Coating Voltage vs. Quantity of Electricity Rate

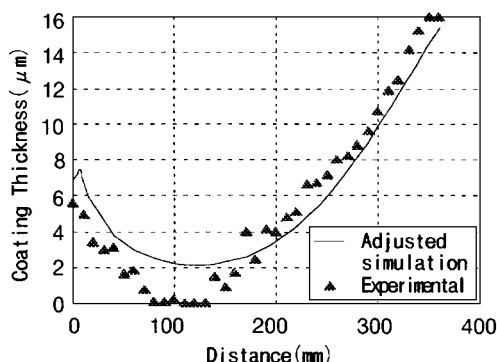


Fig. 14 Experimental Value vs. Adjusted Simulation Value

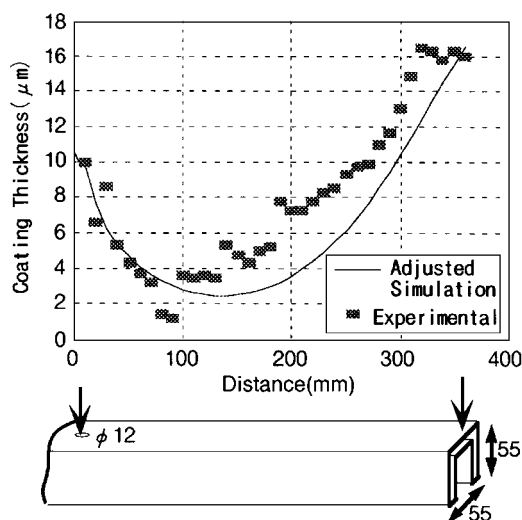
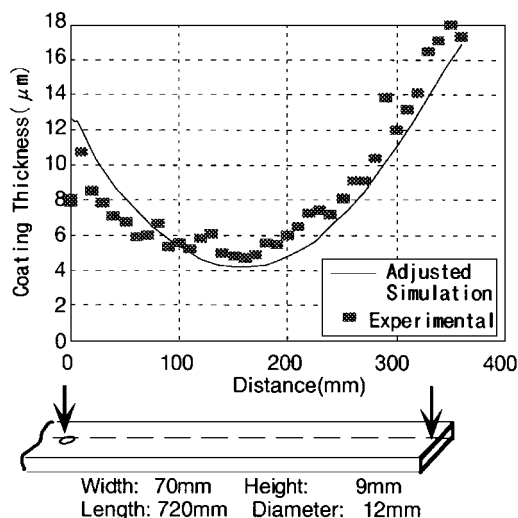


Fig. 15 Comparison of Experimental Value vs. This Simulation Result

7. 計算モデルの精度向上

Fig. 7で示した電気モデルは電着塗装のつき廻り機構の最も簡単なモデルであるが、実際には電着塗装の前に被塗装物表面に施されるリン酸亜鉛皮膜の電気抵抗 R_1 と電着塗装粒子以外の通電粒子の通電が存在する。

これらの影響は電着塗装に対しFig. 16に示す影響を与える。この二つの因子を電気モデルに反映させるとFig. 17に示す電気モデルが考えられる。

この電気モデルを熱伝導モデル化するとFig. 18に示すモデルが得られた。このモデルはFig. 9に対してさらに複雑な条件でのシミュレーションが行えるため、電着塗料開発などにおいて利用できると思われるが、計算を行

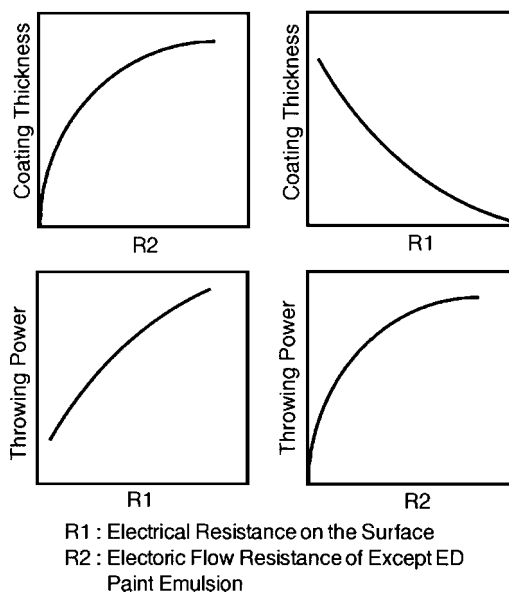


Fig. 16 Attribute of ED Coating

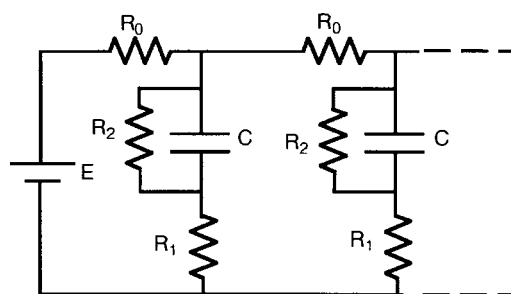


Fig. 17 Electric Circuit Model of ED Coating Model

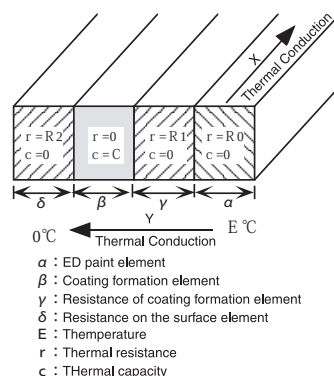


Fig. 18 Thermal Conduction Model of Electric Circuit Model (Fig. 17)

うために必要な有限要素法モデルの作成が実モデルでは困難であり、電着塗装つき廻りの計算としては実用に至っておらず今後の課題である。

8. まとめ

電着塗装つき廻りの実用的な計算予測を行うため、電着塗装機構を考察し、電着塗装の持つ性質を電気モデルに置き換えた。

実際に必要とする複雑な3次元構造を電気モデル化し計算を行う実用的手段はない。そこで、電気伝導機構と熱伝導機構の相似性に着眼し、熱伝導計算を電着つき廻りシミュレーションとして利用するための手法を開発した。

本手法は基本的に熱伝導を有限要素法を用いて計算する技術を利用できるため、モデル作成技術が確立されており、有限要素法の汎用計算ソフトにより実用上も短時間でモデル作成と計算を行うことができた。

このシミュレーション計算結果、電着液抵抗とコンデンサであらわす簡単なモデルにより、電着塗装のつき廻りを図面上で検討するために必要な計算精度が得られた。

今後、前処理や塗装電着条件を含めたシミュレーションを行うため、諸因子の寄与度の解析が必要であり、研究課題と考える。

9. 参考文献

- 1) 國見均、木村均、風間重徳、電着塗膜析出のシミュレーション解析、塗装工学、24、3、(1989) 94
- 2) 佐野哲、薄田茂、自動車ボデーの電着塗装付廻り性予測、自動車技術会学術講演会前刷集、933、(1993) 85
- 3) 藤代亮一、ムーア物理化学(下)、(1976) 517
- 4) 古野伸夫、川井均、大藪権昭、電着塗装のつきまわり性、色材、42、8、(1969) 362
- 5) 古野伸夫、川原友三郎、大藪権昭、電着塗装液のつきまわり性測定記録装置の開発、色材、45、9、(1972) 474

■著 者■



竹内 寿浩



今中 正



渡邊 弘和