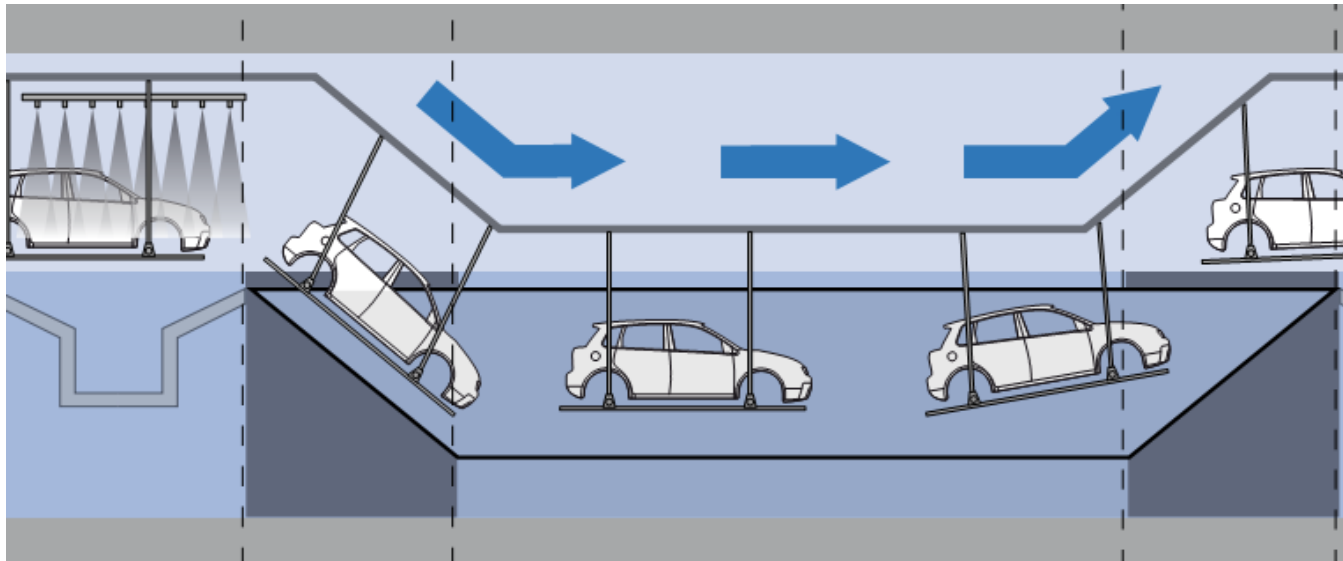
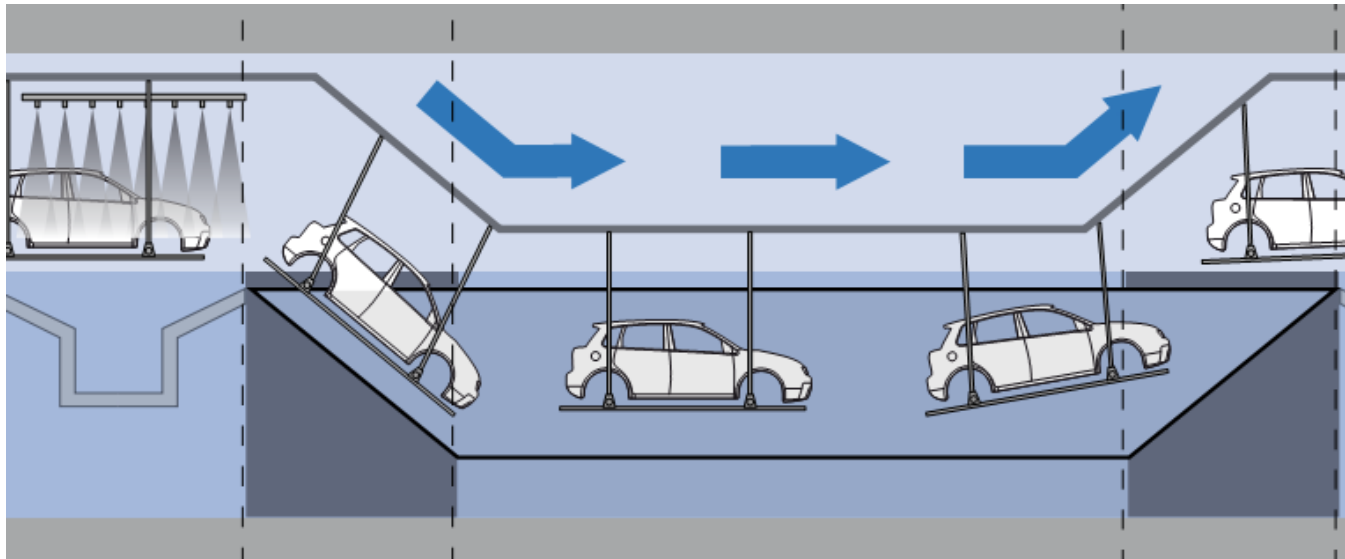


# 境界要素法を用いた 電着塗装シミュレータの開発

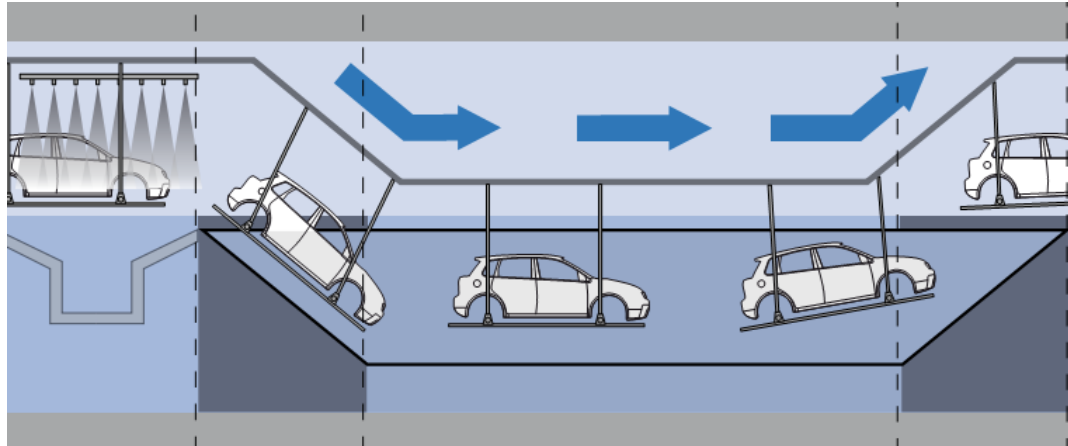


- 水野 哲 (東京工業大学)
- 大西 有希 (東京工業大学)
- 天谷 賢治 (東京工業大学)

# 研究背景



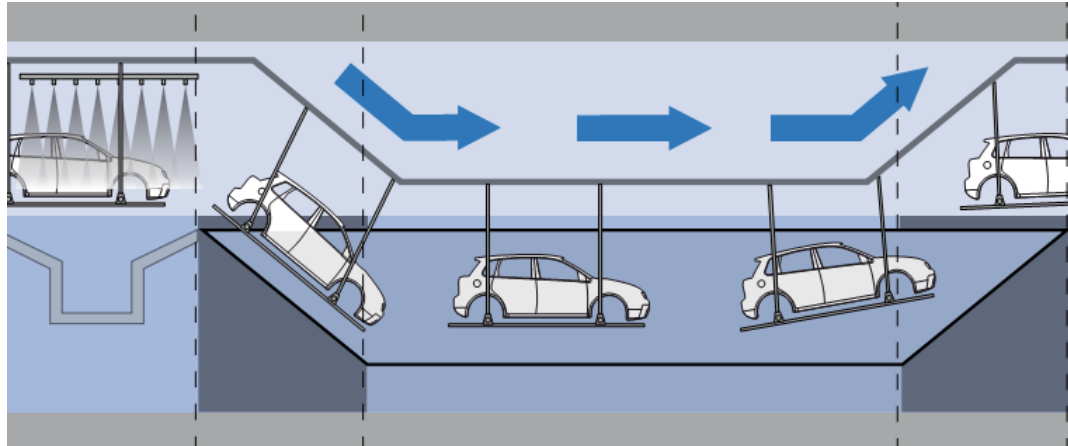
# 電着塗装について



(<http://www.rodip.com.br/>より)

- 自動車ボディの下塗り. 防食・防錆のため.
- ボディを電解液中に沈め電流を流し, 電気めっきと同じ要領で塗膜を表面に析出させる
- 補強部材が入り組んだ箇所や筒状部材の内部は**塗装されづらい**
- 塗装されづらい箇所を規定膜厚まで塗装する間に他の部分は必要以上に塗装される
- 塗料や電力, 塗装時間を無駄に消費
- その削減が課題となっている

# 電着塗装シミュレーションの必要性



(<http://www.rodip.com.br/>より)

現状では、経験や勘により

- 電極の配置や数，電圧などの塗装条件を工夫
- 塗装されづらい箇所に穴をあける



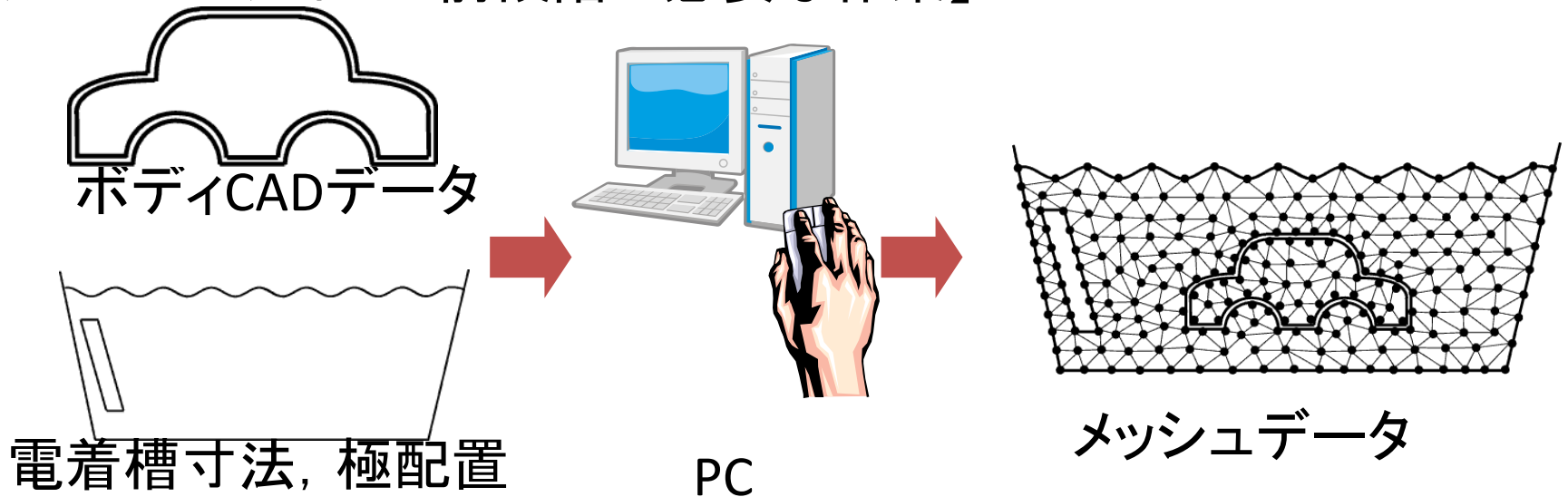
数値シミュレーションにより，

- 合理的かつ効率的に決定する      ことも必要

# 従来の電着塗装シミュレーション

- 有限要素法 (FEM) や有限体積法 (FVM) を用いた例がある
- 有限要素法 (FEM) や有限体積法 (FVM) では、  
解析領域である電解液をメッシュ分割

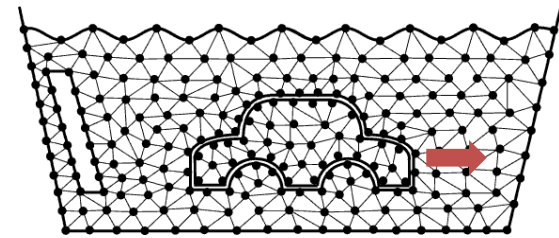
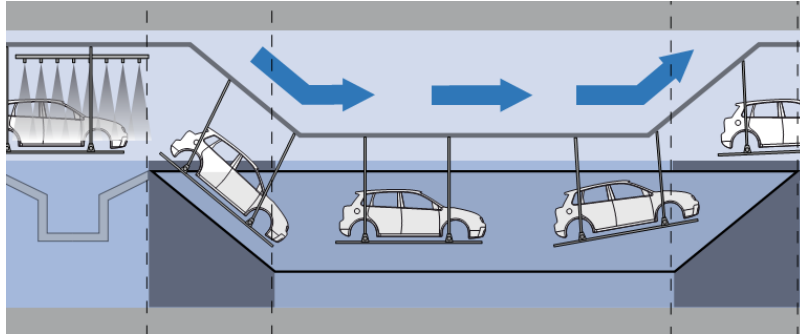
【シミュレーションの前段階で必要な作業】



- ・メッシュ分割には**多大な労力**
- ・精度良いシミュレーションには**専門的な知識・経験**が必要

# 従来の電着塗装シミュレーション

- ラインにのって電解槽中をボディが移動する解析を行う場合、



- 有限要素法 (FEM) や有限体積法 (FVM) では  
ボディが移動するごとにメッシュ分割をし直さなければならない



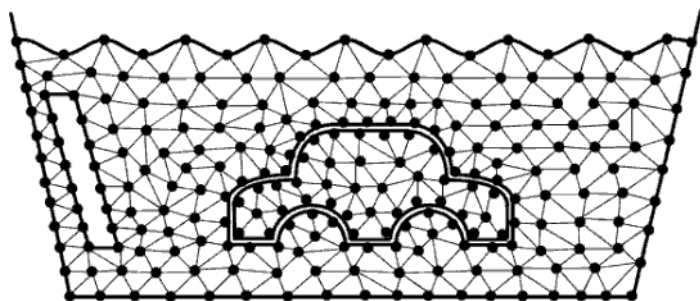
- 部品の解析やボディ形状を単純化した解析にとどまっている

**効率的に塗装工程全体の詳細な解析を行う手法が必要**

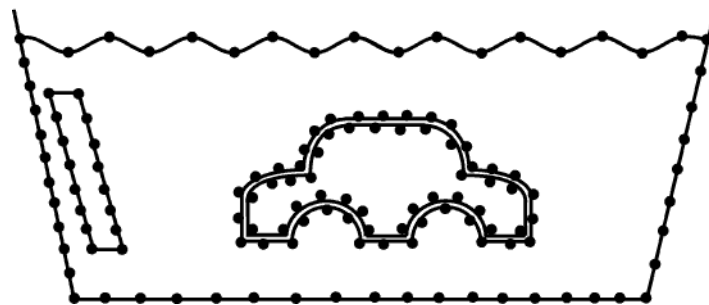
# 研究目的

メッシュ生成, 電解槽内を移動する解析 が容易

## 境界要素法 (BEM) を用いた 電着塗装シミュレータの開発



従来手法 (FEM, FVM など)



本手法 (BEM)

- BEMは, 解析領域の境界面のみのメッシュ分割でよい
- メッシュの生成において労力が格段に小さい
- ボディが電解槽中を移動する解析も, リメッシング不要

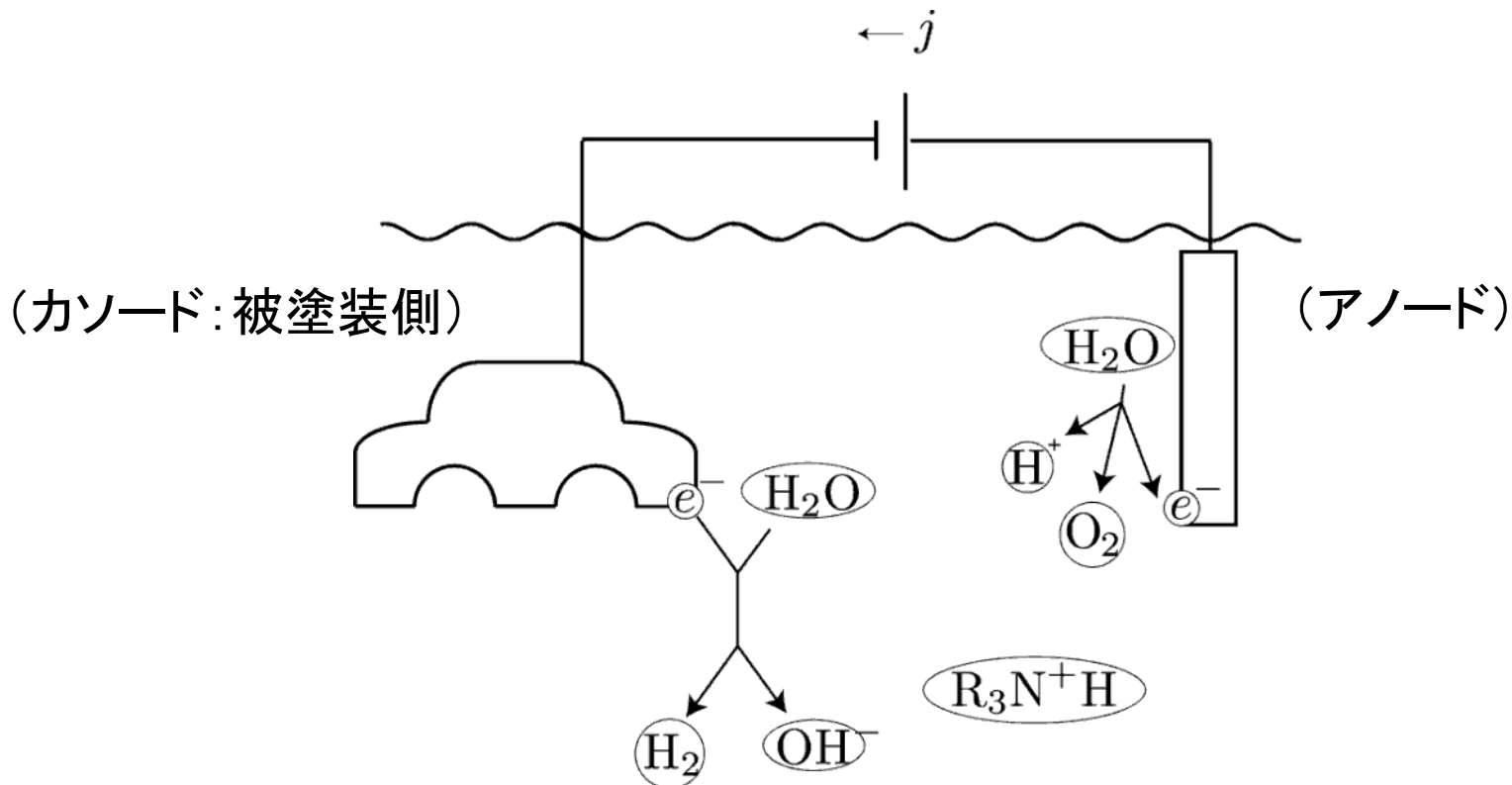
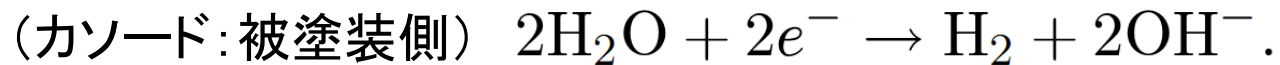
# 数理モデル

- 塗膜析出メカニズム
- 支配方程式、境界条件
- 塗膜析出モデル
- 計算の流れ



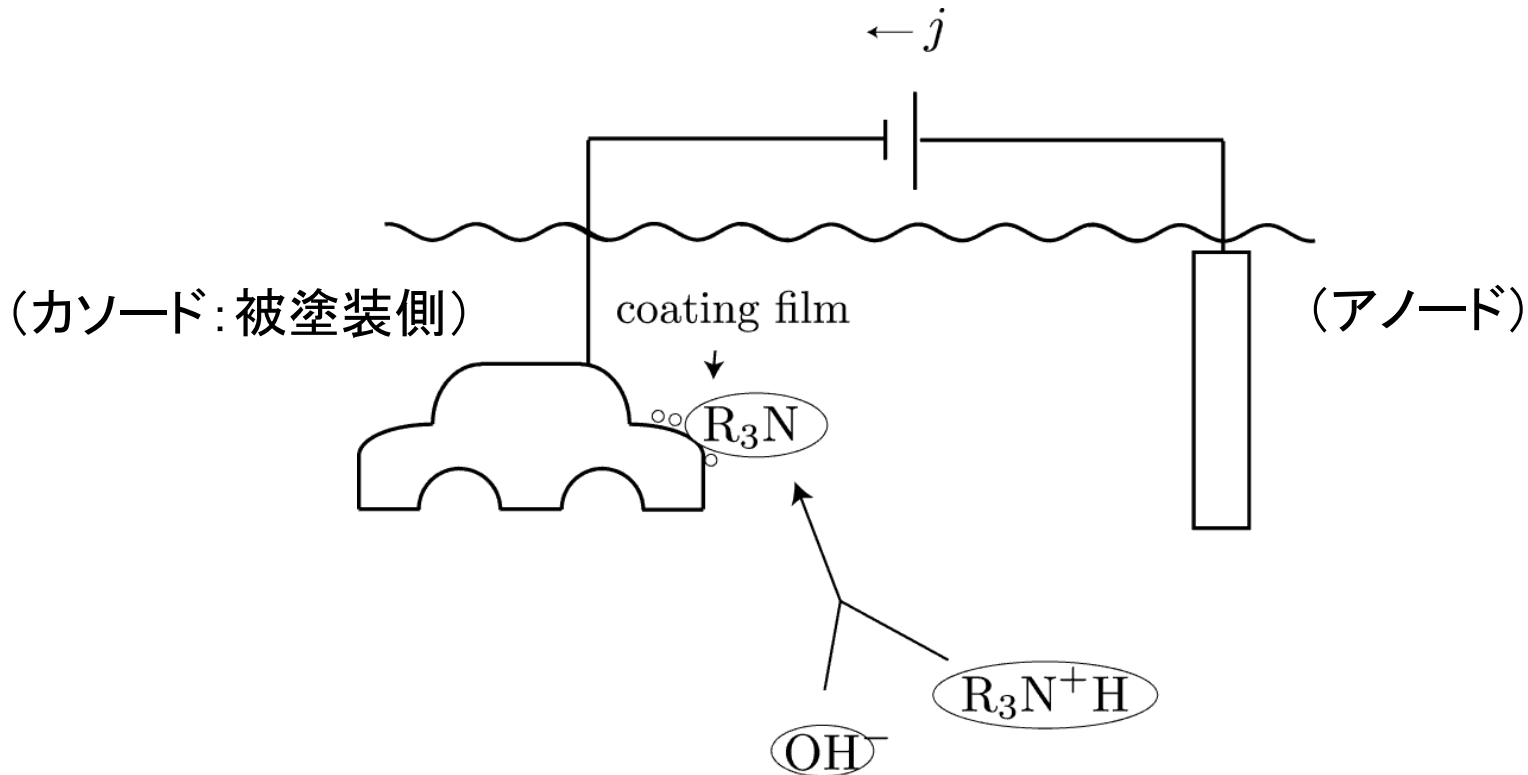
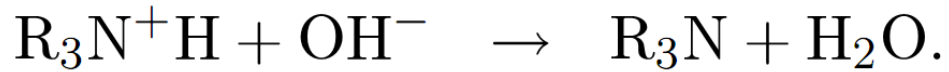
# 塗膜析出メカニズム

## 1. 電気が流れると水が電気分解される



# 塗膜析出メカニズム

2. OHイオンと酸性の塗料に溶解していた塗料イオンが結びつき塗膜析出



# 支配方程式，境界条件

## 【支配方程式】

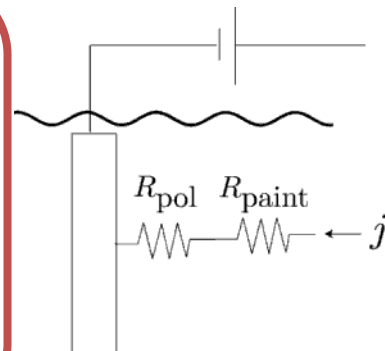
- OHイオン発生量  $\propto$  通電電流量  
→電着塗装シミュレーションは電場解析に帰着できる
- イオンの移動はnsecオーダーの時間スケールで完了
- 注目している塗膜析出の時間スケール(sec)に対して十分小さい

$$\nabla^2 \phi = 0. \quad \text{Laplace方程式}$$

## 【境界条件】

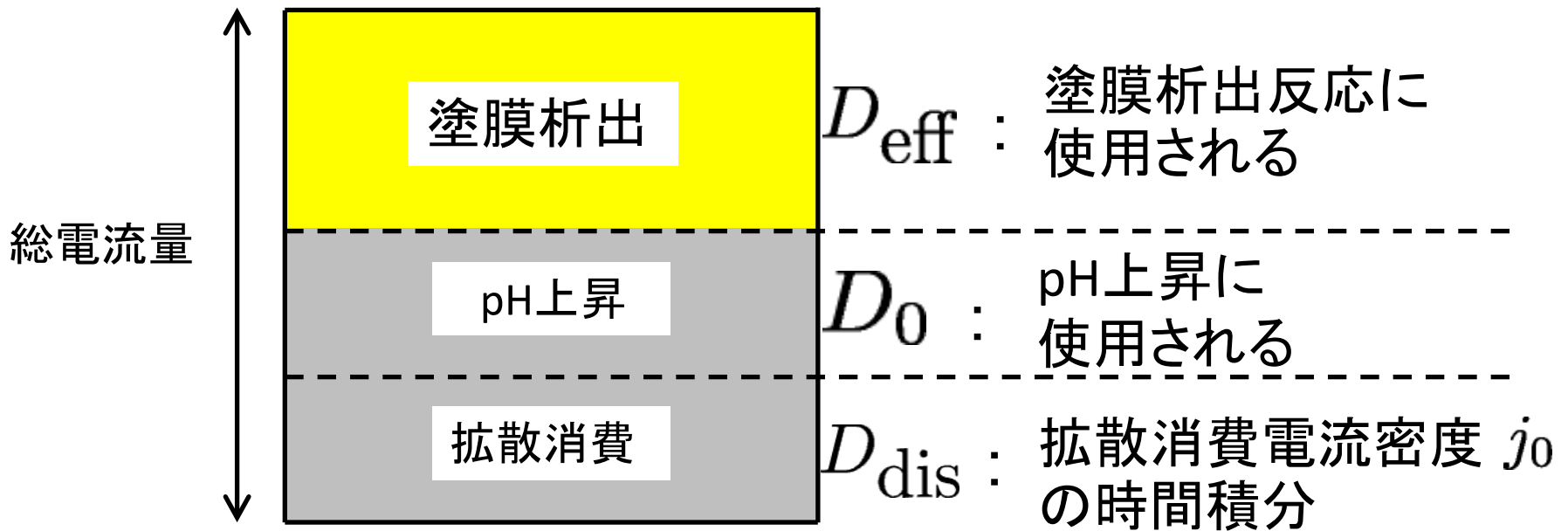
- カソード近傍では  
塗膜の抵抗  $R_{\text{paint}}$  と分極抵抗  $R_{\text{pol}}$ により電圧降下

$$\begin{array}{l} \text{(アノード)} \\ \text{(カソード: 被塗装側)} \\ \text{(液表面や壁面)} \end{array} \left\{ \begin{array}{l} \phi = \phi_{\text{anode}} \\ \phi = \left\{ R_{\text{paint}}(h) + R_{\text{pol}} \right\} j + \phi_0 \\ j = -\kappa \frac{\partial \phi}{\partial n} = 0 \\ R_{\text{paint}} = \alpha h. \end{array} \right.$$



# 塗膜析出モデル

- カソード近傍のpHがある一定の値を超えると析出を開始する  
( パラメータ  $D_0$  )
- カソード近傍からOHイオンはある一定の割合で拡散消費される  
( パラメータ  $j_0$  )



$$(\text{塗膜析出量}) = g D_{\text{eff}} \quad g : \text{有効クーロン効率}$$

# 計算の流れ

開始



## 電場解析

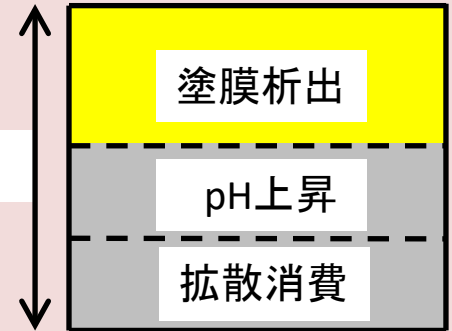
カソードに流れる電流量を計算



## 塗膜成長量の計算

OHイオンの拡散消費、  
pH上昇を考慮して  
塗膜成長量を計算

総電流量



## 時刻の更新

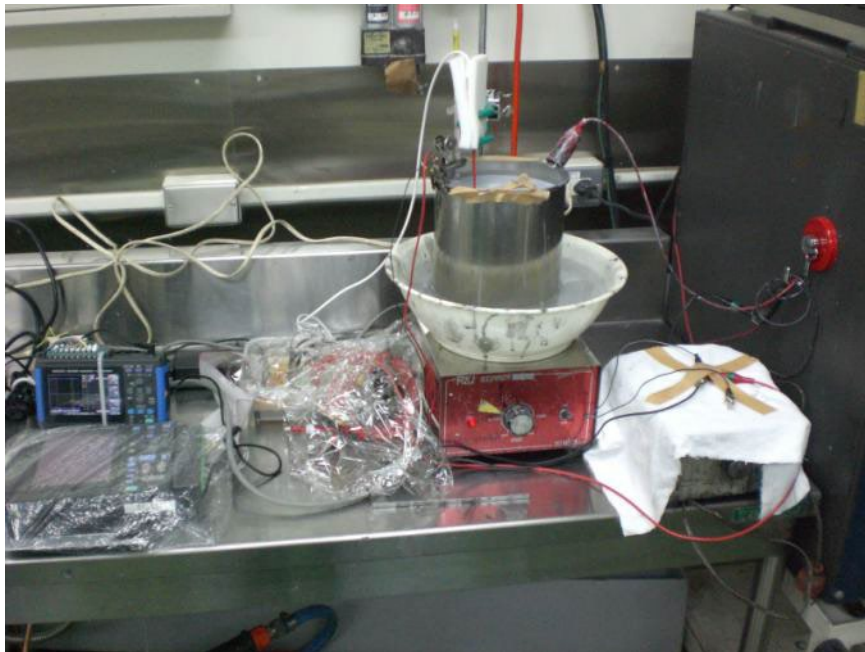
カソードの  
膜厚を更新



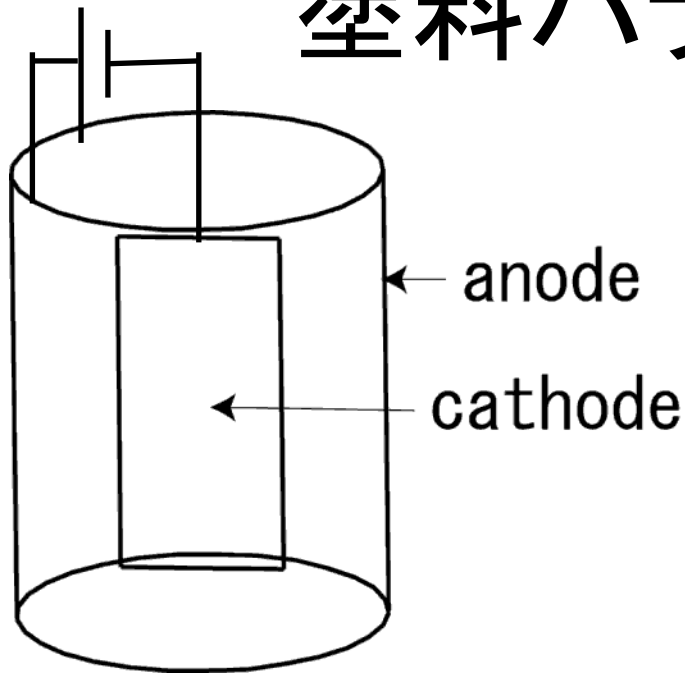
終了

# 塗料パラメータ同定実験

- カソード分極曲線 (塗膜抵抗, 分極抵抗)
- 塗膜析出パラメータ
  - 析出無効電荷密度  $D_0$
  - 拡散消費電流密度  $j_0$
  - 有効クーロン効率  $g$



# 塗料パラメータ同定実験



## 【塗料】

一般的な自動車電着塗装用塗料  
(日本ペイント社製)

## 【試験片】

70mm × 150mm 前処理済冷延鋼板

## 【実験条件】

印加電圧(10,30,50,100,150,250V)

電着時間(30,60,90,120,150,180秒)

## 【測定するもの】

電位の時間変化

電流密度の時間変化

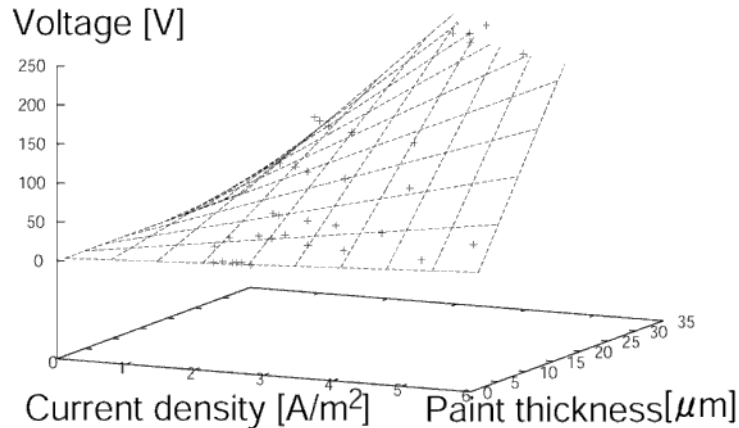
最終膜厚



# 同定結果

## カソード分極曲線

Paint resistance	$\alpha$	$2.40 \times 10^6$	$[\Omega/\text{m}]$
polarization resistance	$R_{\text{pol}}$	0.582	$[\Omega\text{m}^2]$



実験結果に対して同定結果がよく一致している。

$$\phi = \left\{ R_{\text{paint}}(h) + R_{\text{pol}} \right\} j + \phi_0$$

$$R_{\text{paint}} = \alpha h .$$

## 塗膜析出パラメータ

Ineffective charge area density	$D_0$	169	$[\text{C}/\text{m}^2]$
Diffusive current density	$j_0$	2.5	$[\text{A}/\text{m}^2]$
Effective coulombic efficiency	$g$	0.067	$[\text{g}/\text{C}]$

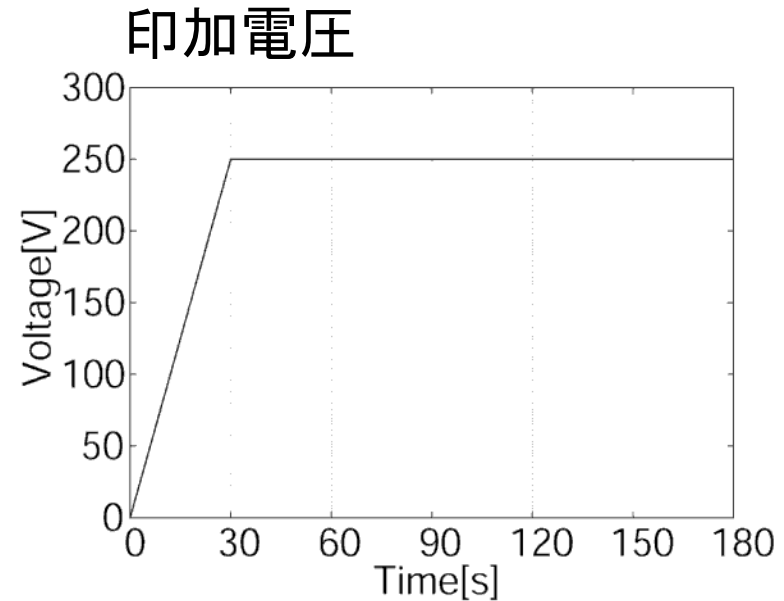
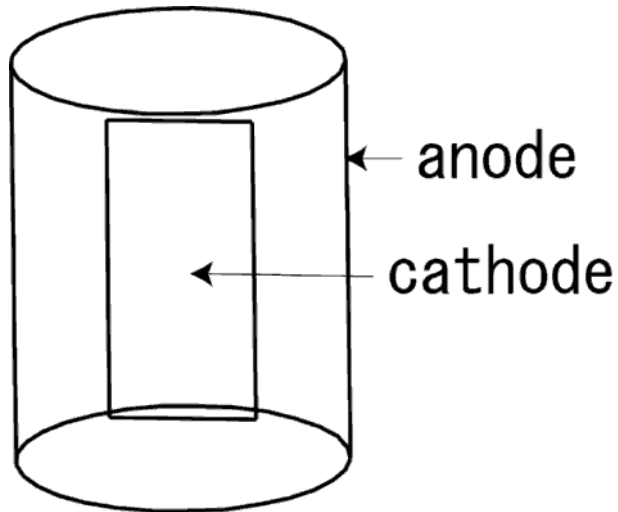


# 数値シミュレーション

- 1枚板電着塗装シミュレーション
- 4枚BOX
- 筒状部材
- 被塗装物が電解槽中を移動するシミュレーション

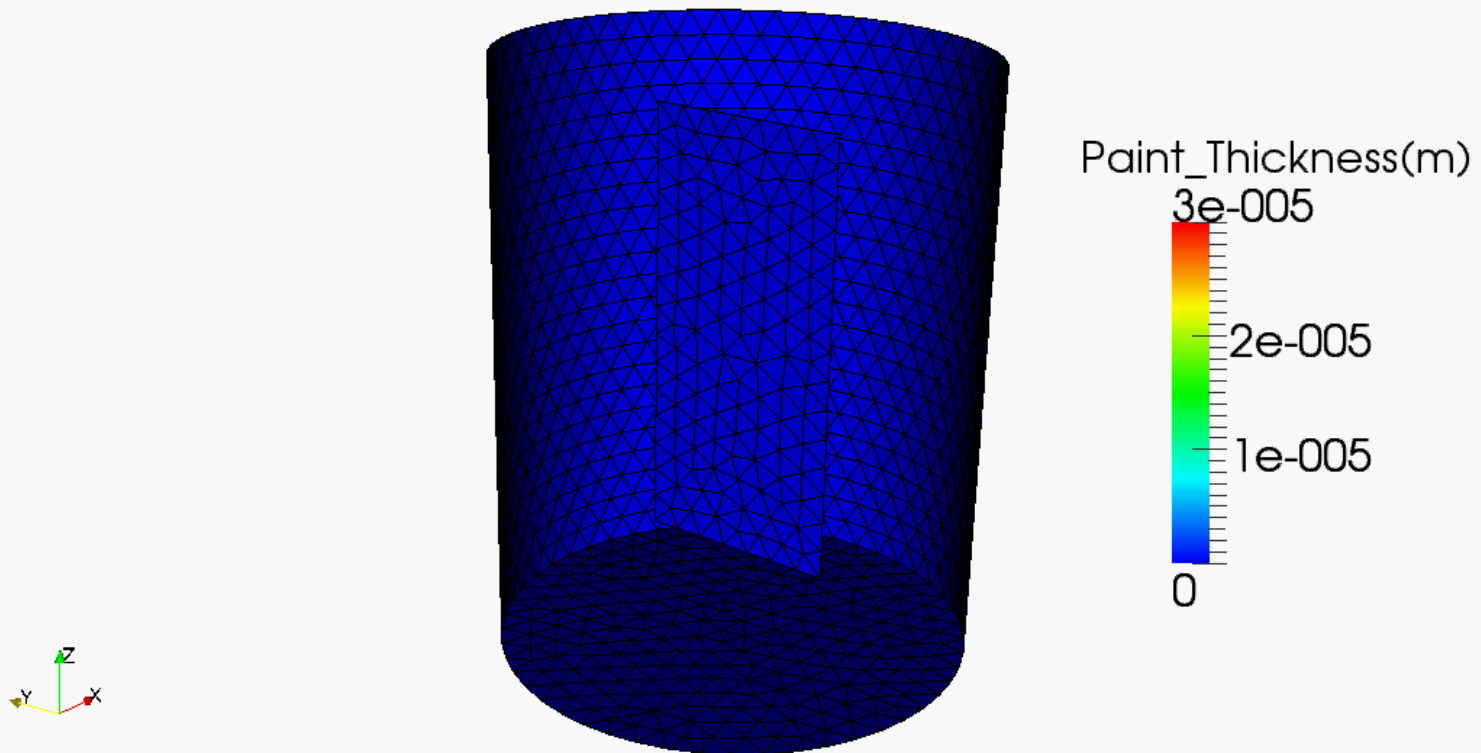
# 数値シミュレーション-1枚板

- 実験と同じ状況を模擬



Coating Voltage	$V$	250	[V]
Coating time	$T$	180	[s]
Voltage rising time	$T_1$	30	[s]
Conduvtivity of electrolyte	$\kappa$	0.169	[S/m]
Invalid charge density	$D_0$	165	[C/m <sup>2</sup> ]
Diffusive current density	$j_0$	2.5	[A/m <sup>2</sup> ]
Effective coulombic efficiency	$g$	0.067	[g/C]

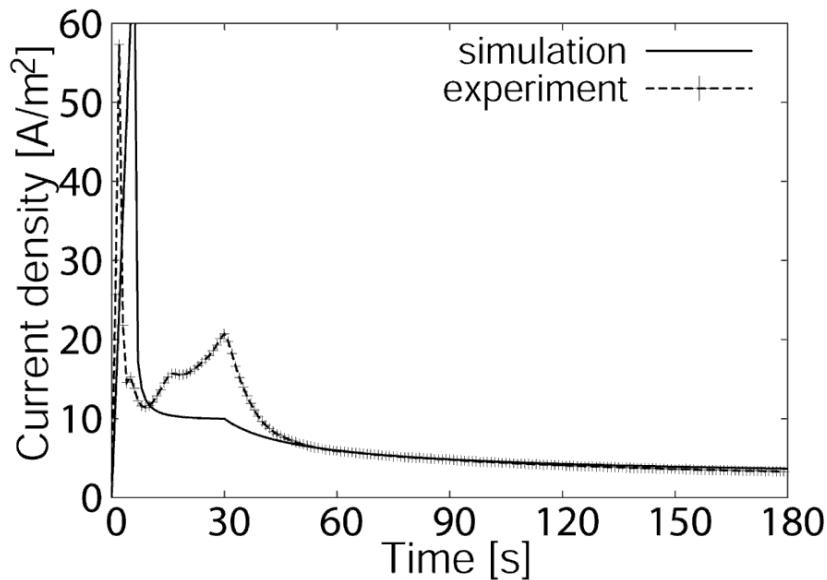
# 結果(膜厚の時間変化)



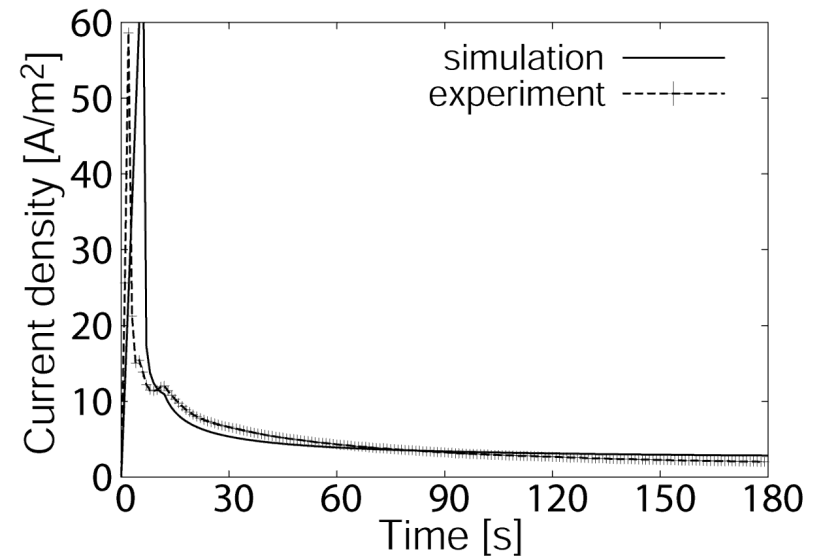
- 時間経過とともに膜が成長していく様子が再現できている

# 結果（電流密度の時間変化）

【250V, 180秒】

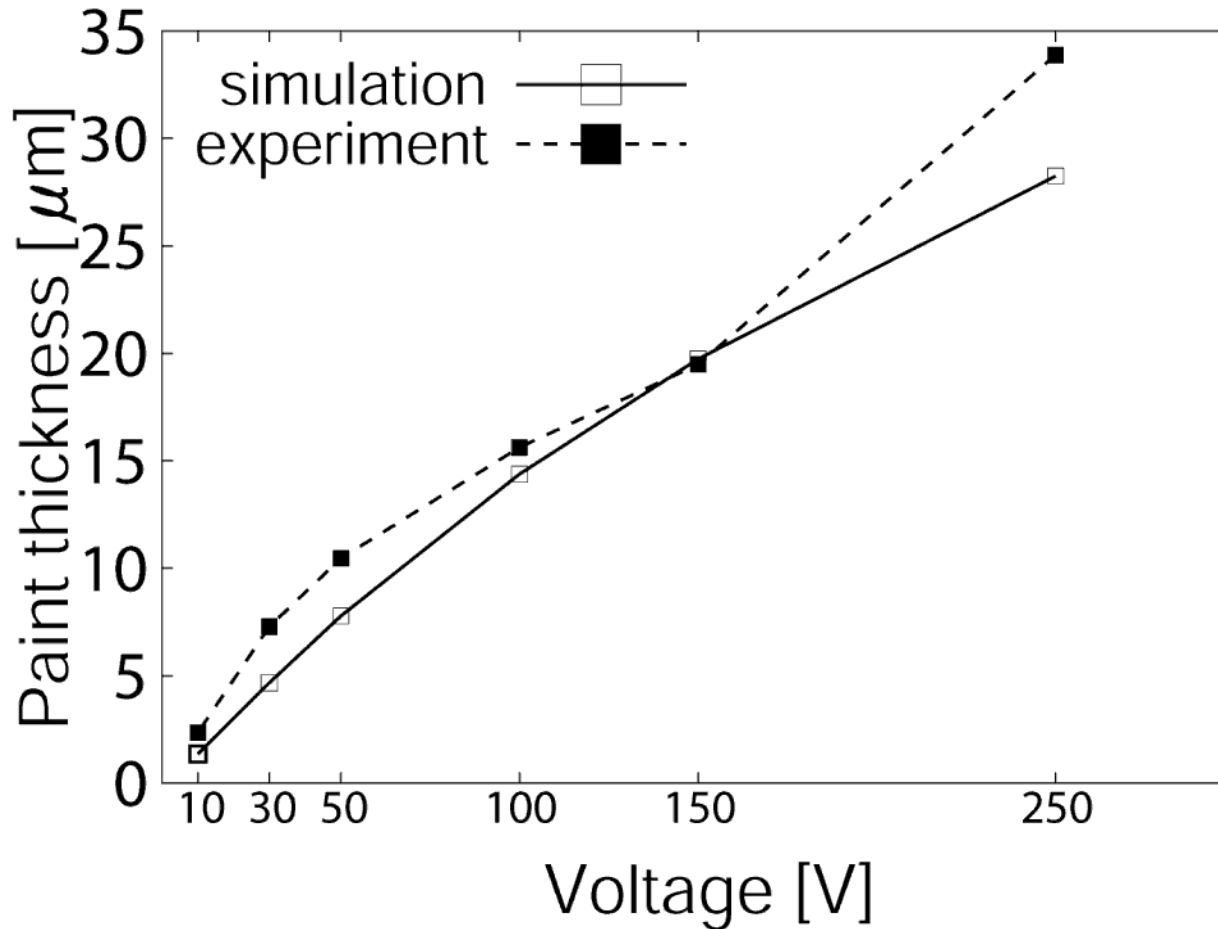


【100V, 180秒】



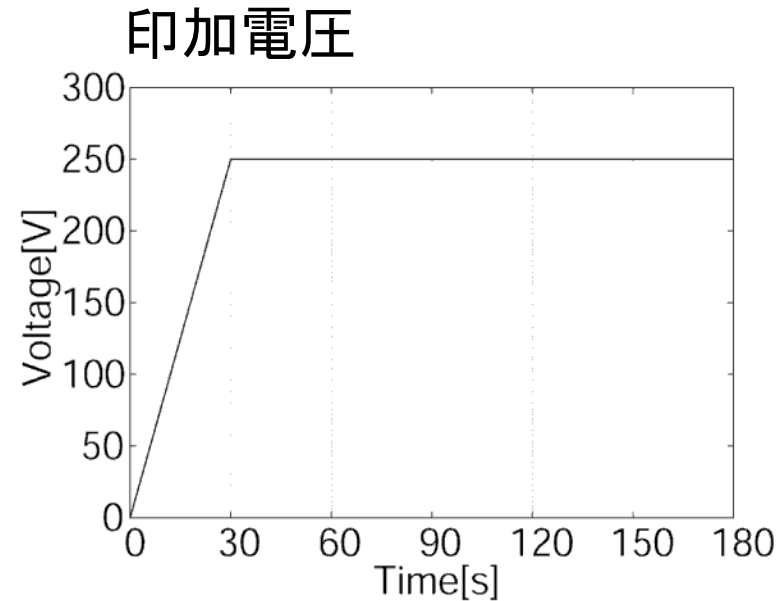
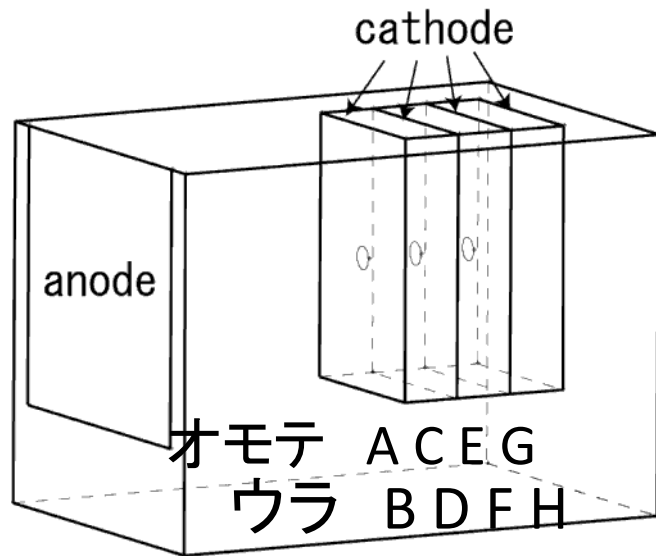
- 大きなピークをとったのち，塗膜成長とともに漸次的に減少していく
- 実験結果と同じ結果が得られた

# 結果（印加電圧と最終膜厚）



- 印加電圧が異なる場合について実験結果とおよそ同じ結果が得られている

# 数値シミュレーション-4枚BOX

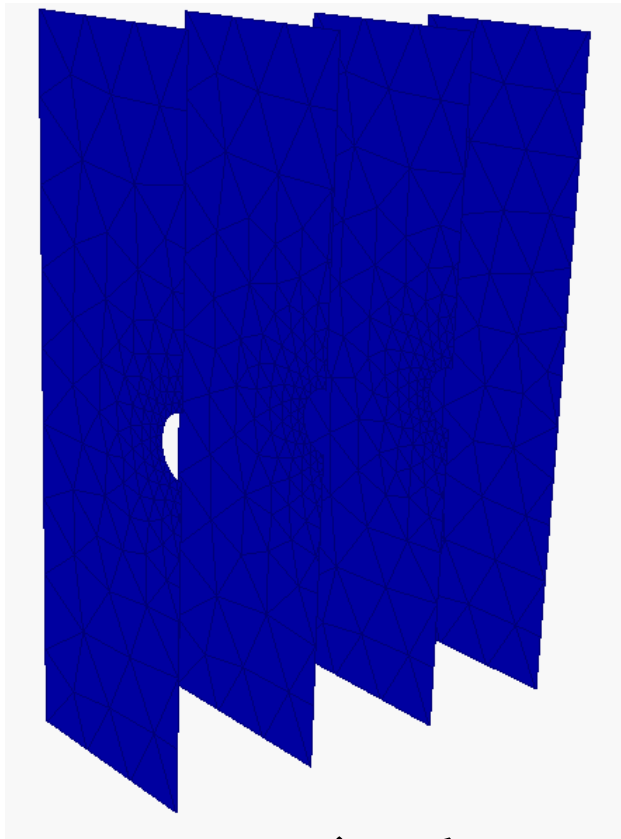


Coating Voltage	$V$	250	[V]
Coating time	$T$	180	[s]
Voltage rising time	$T_1$	30	[s]
Conduvtivity of electrolyte	$\kappa$	0.169	[S/m]
Invalid charge density	$D_0$	165	[C/m <sup>2</sup> ]
Diffusive current density	$j_0$	2.5	[A/m <sup>2</sup> ]
Effective coulombic efficiency	$g$	0.067	[g/C]

# 結果（膜厚の時間変化）

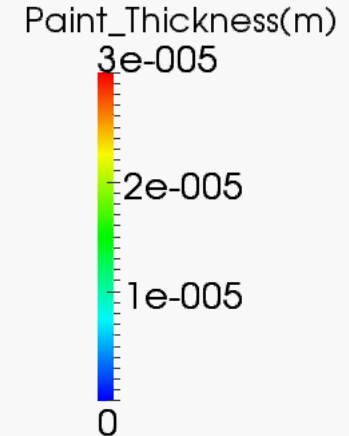
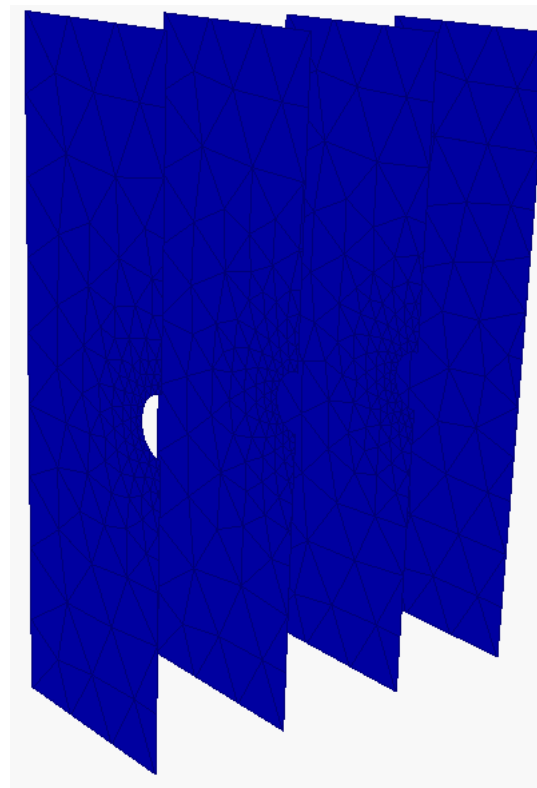
【オモテ面】

A面, C面, E面, G面



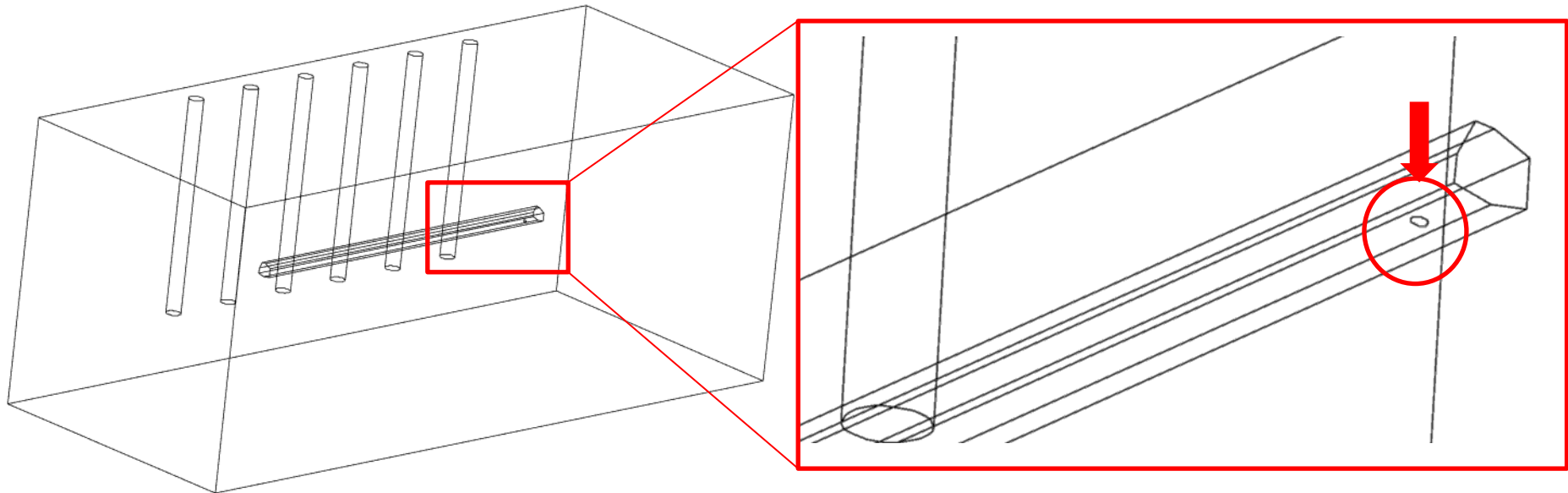
【ウラ面】

B面, D面, F面, H面



- アノードに近い面ほど膜厚が大きいという定性的に正しい結果が得られている

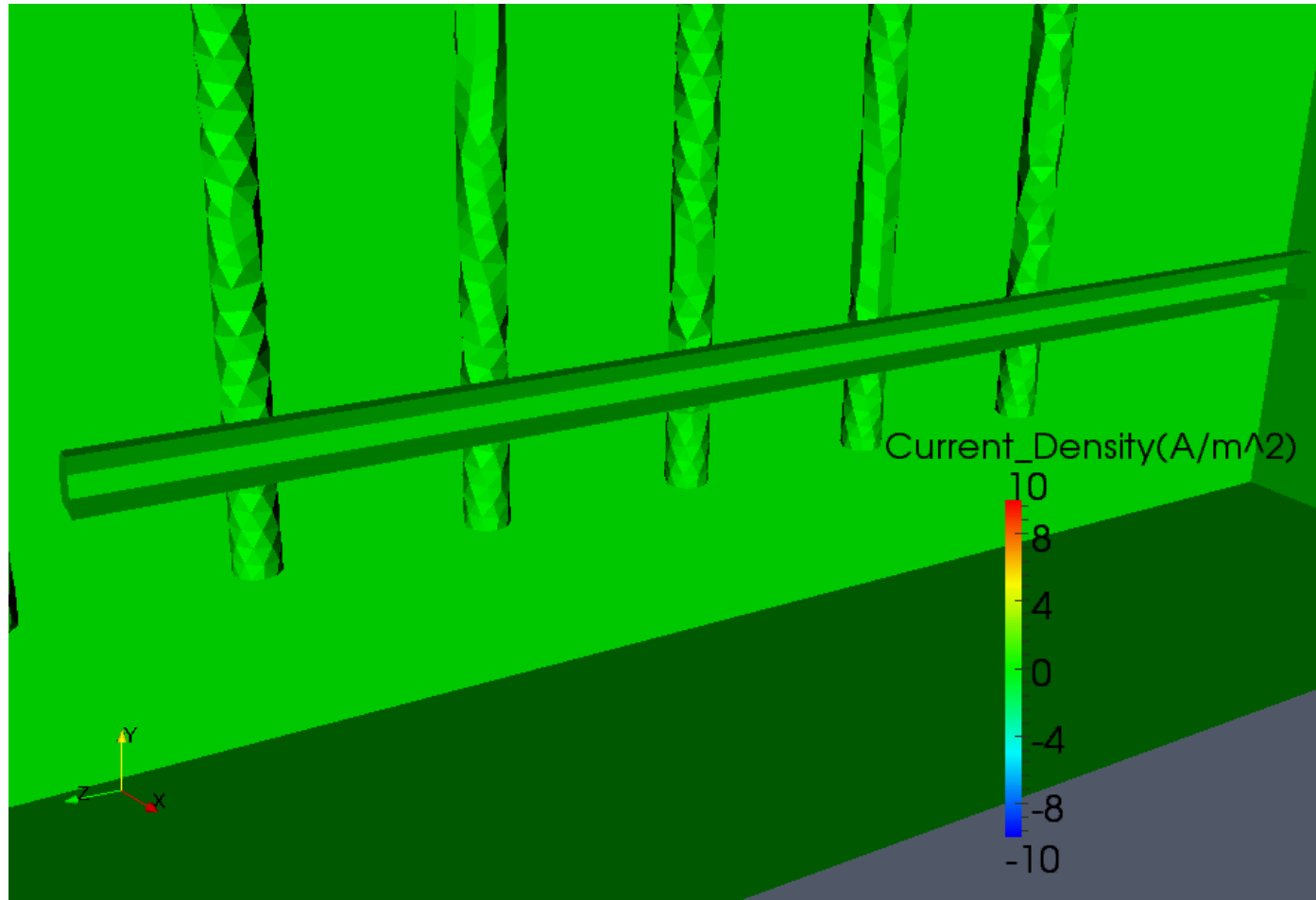
# 数値シミュレーション-筒状部材(穴1つ)



Coating Voltage	$V$	250	[V]
Coating time	$T$	180	[s]
Voltage rising time	$T_1$	30	[s]
Conduvtivity of electrolyte	$\kappa$	0.169	[S/m]
Invalid charge density	$D_0$	165	[C/m <sup>2</sup> ]
Diffusive current density	$j_0$	2.5	[A/m <sup>2</sup> ]
Effective coulombic efficiency	$g$	0.067	[g/C]

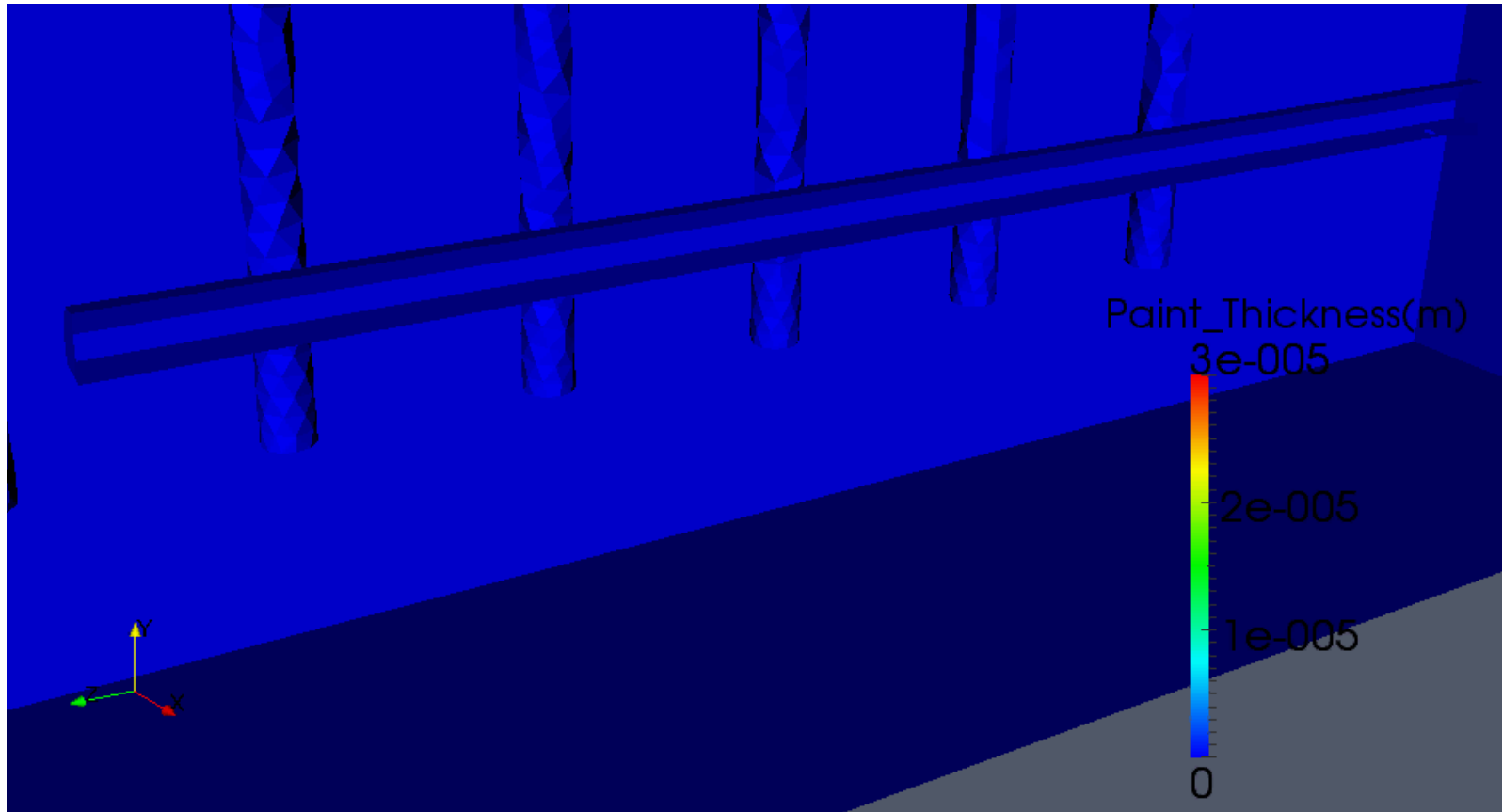


# 結果(電流密度の時間変化)



- 穴の近くから筒の先端に向かって、電流密度の集中している箇所(塗装が最も進んでいる箇所)が移動していく

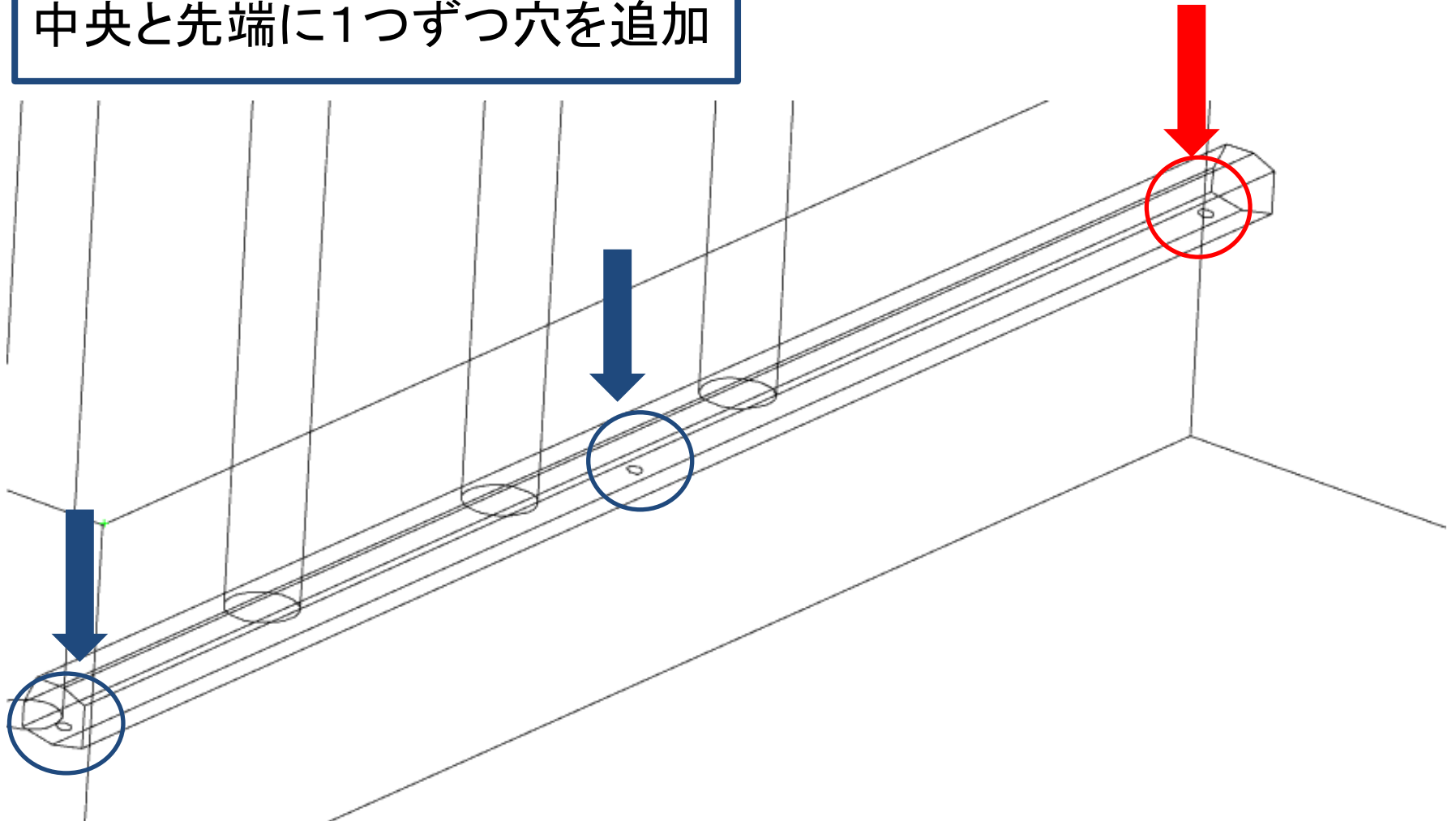
# 結果（膜厚の時間変化）



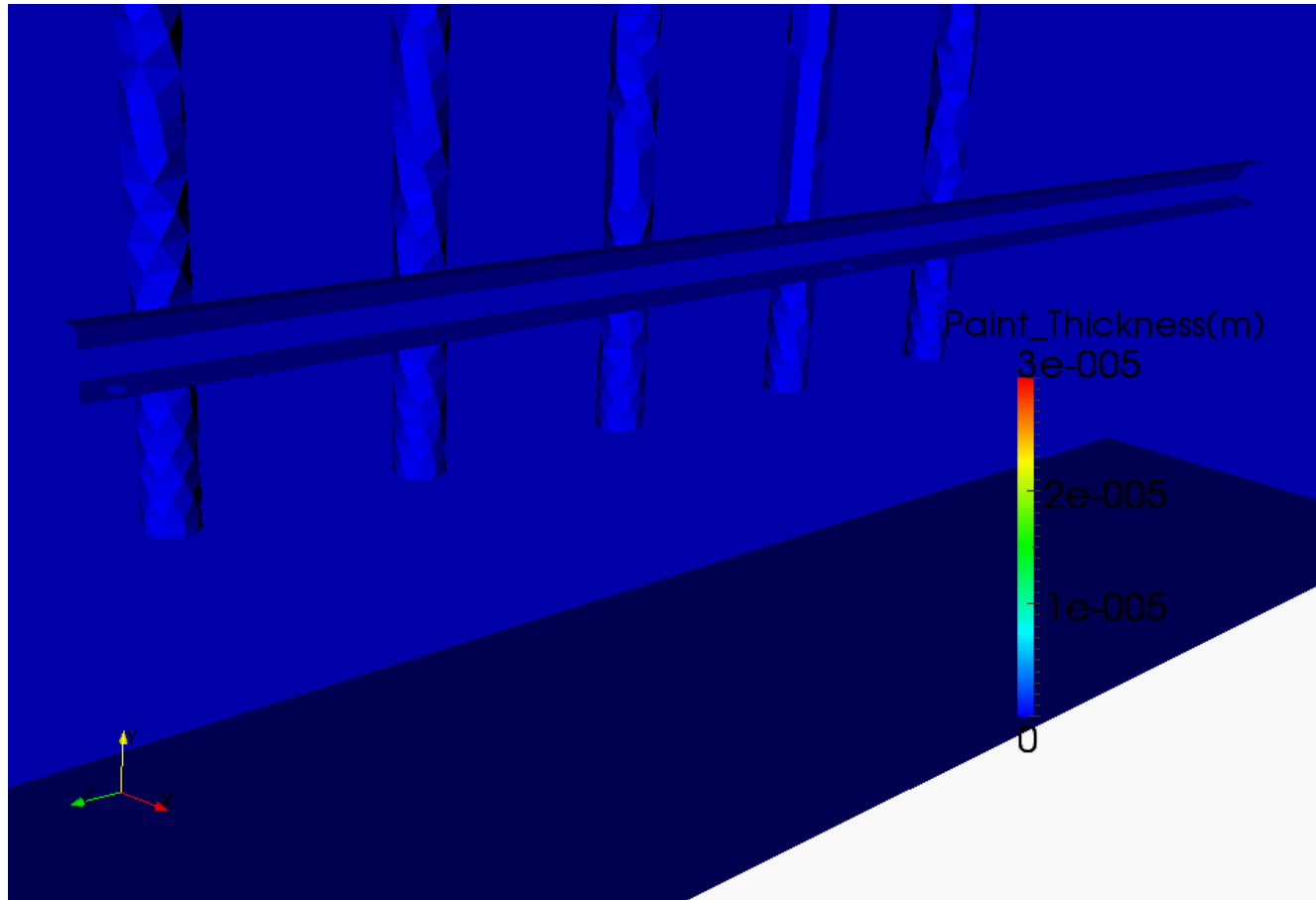
- 穴の近くから順に塗膜が成長している
- 筒の先端は塗装されていない
- 穴の個数や位置などを変えてシミュレーションし、最適化することも可能

# 数値シミュレーション-筒状部材(穴3つ)

中央と先端に1つずつ穴を追加



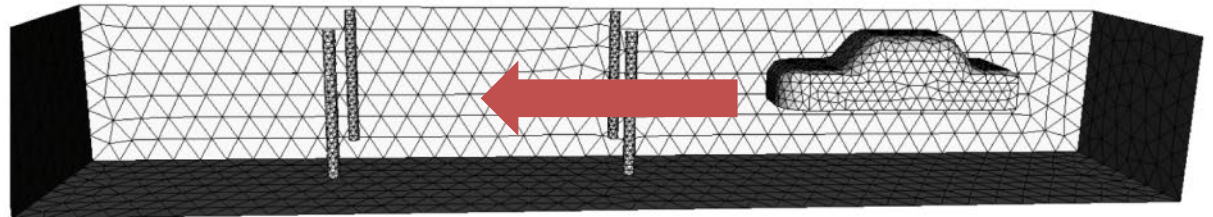
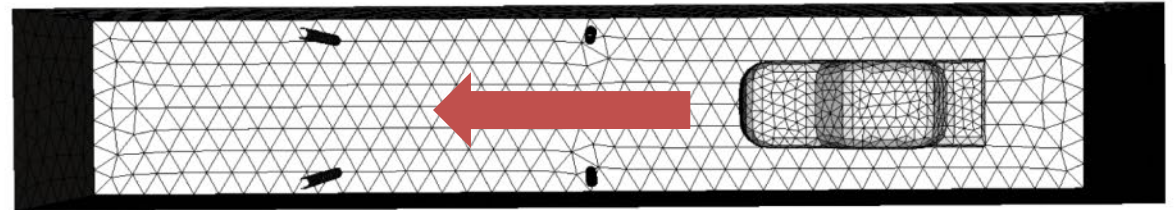
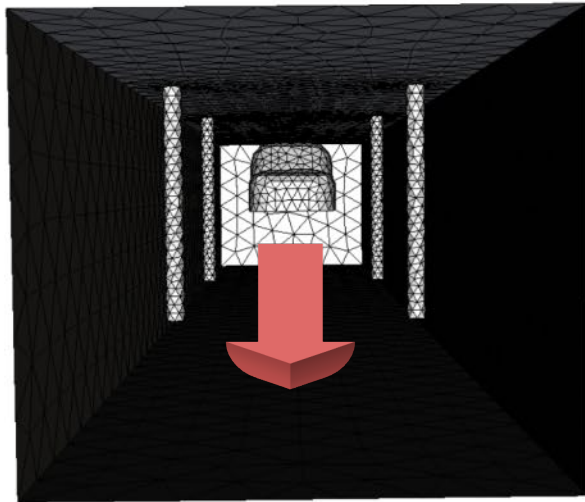
# 結果（膜厚の時間変化）



- 穴の近くから順に塗膜が成長している
- 筒の先端は塗装されていない
- 穴の個数や位置などを変えてシミュレーションし、最適化することも可能

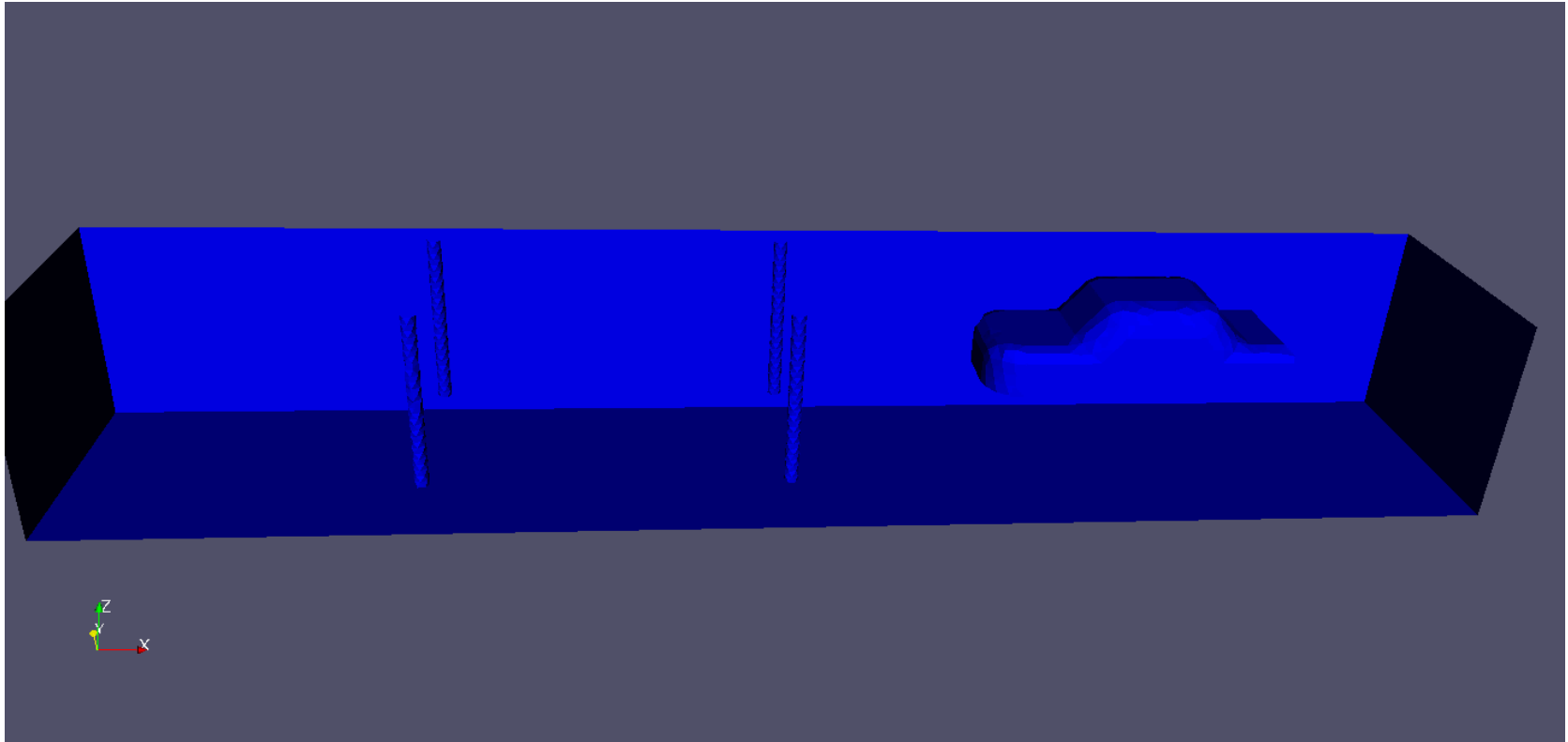
# 被塗装物が電解槽中を移動する シミュレーション

## 【問題設定】



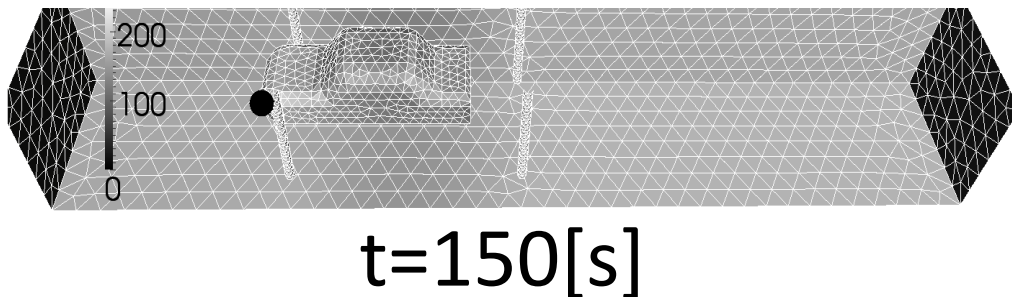
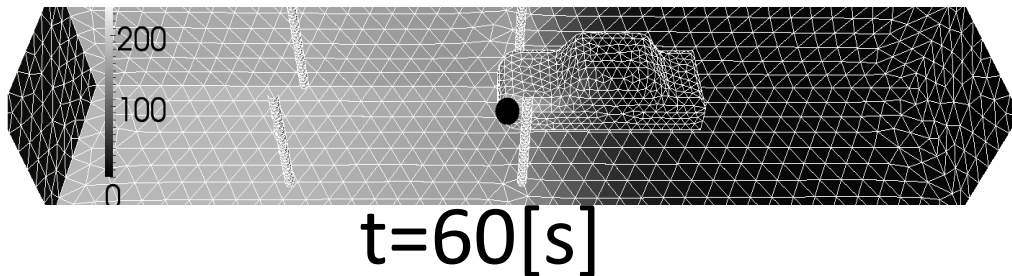
- 電解槽中をボディが移動する様子を模擬
- 左右に4本の円柱状の電極を配置
- 従来の方法 (FEM, FVMなど) では困難だった, 境界要素法 (BEM) によって塗装ラインでボディが移動していくシミュレーションが容易になった

# 被塗装物が電解槽中を移動する シミュレーション結果（膜厚分布）

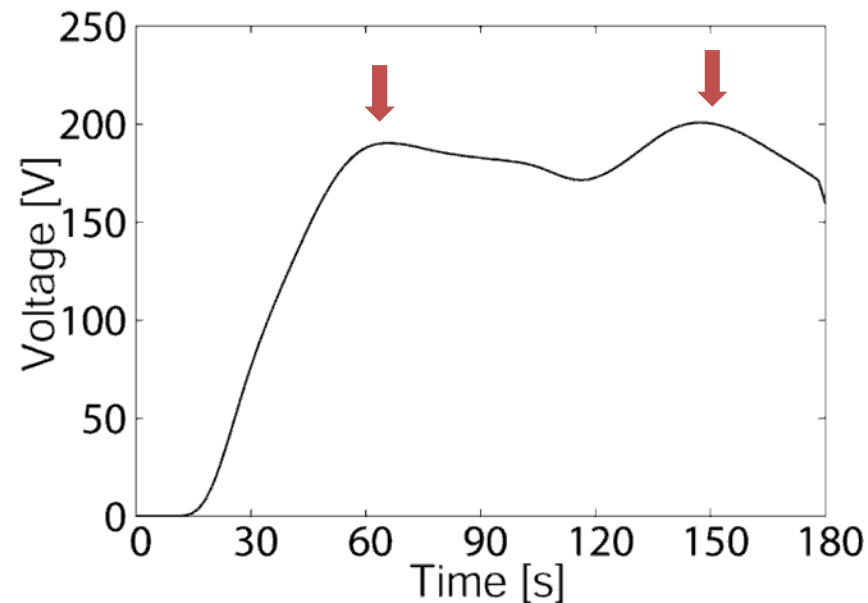


- ボディの移動とともに塗装されていく様子が再現されている
- 特に電極に近づいた箇所が塗装される速度がはやい

# 被塗装物が電解槽中を移動する シミュレーション



●の点における電位の時間変化



- 60秒後と150秒後に、被塗装物が電極に近づき電位が大きな値を示している
- 実現象に近い状況を再現できた
- 極の配置や数などの異なるパターンで効果を検証することもできる

# 結論

- **境界要素法**を用いた電着塗装解析**プログラムを開発した**
- 数値シミュレーションにより塗膜析出モデルの妥当性を検証した
- 数値シミュレーションでは実験結果と**およそ同じ傾向を示す結果が得られた**
- 4枚BOX, 筒状部材, 電着槽内を被塗装物が移動する数値シミュレーションにおいて, **定性的に正しい結果が得られた**
- シミュレーションにより, 穴の位置や数, 極の配置や数などを最適化できる

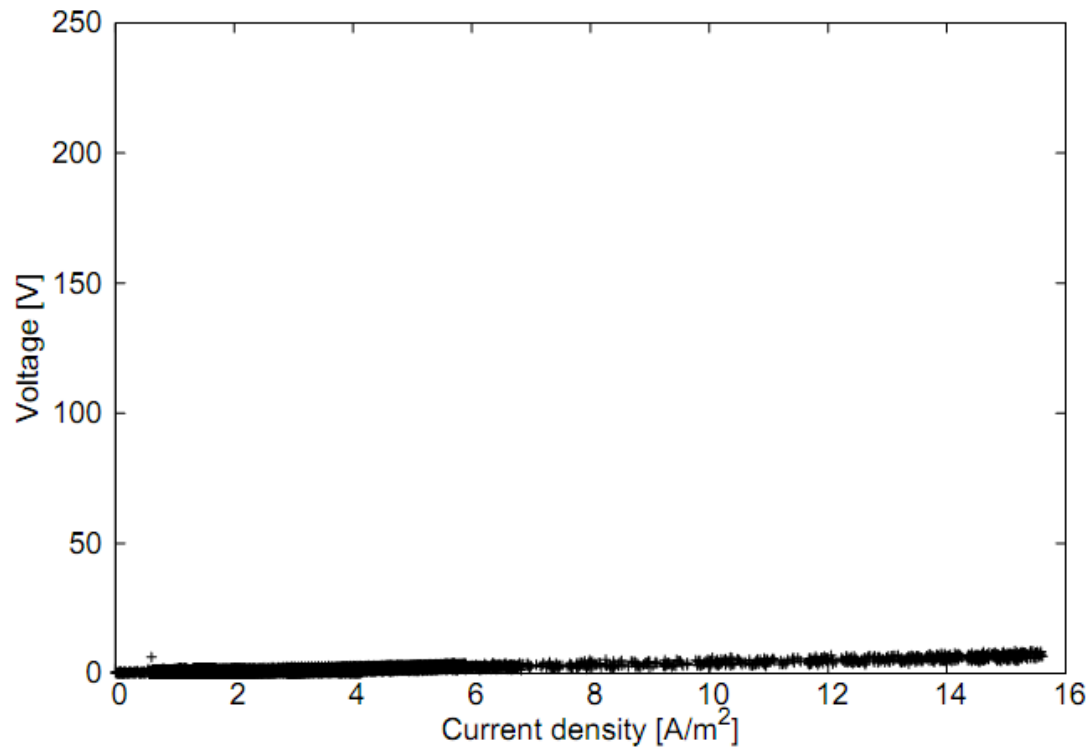
## 今後の課題

- 本シミュレータは, 現在はまだ発展途上であり, 析出モデルの改良を行いシミュレーションの精度向上を行う
- 今後はより現実的なシミュレーション、実験を行い有効性を検証する



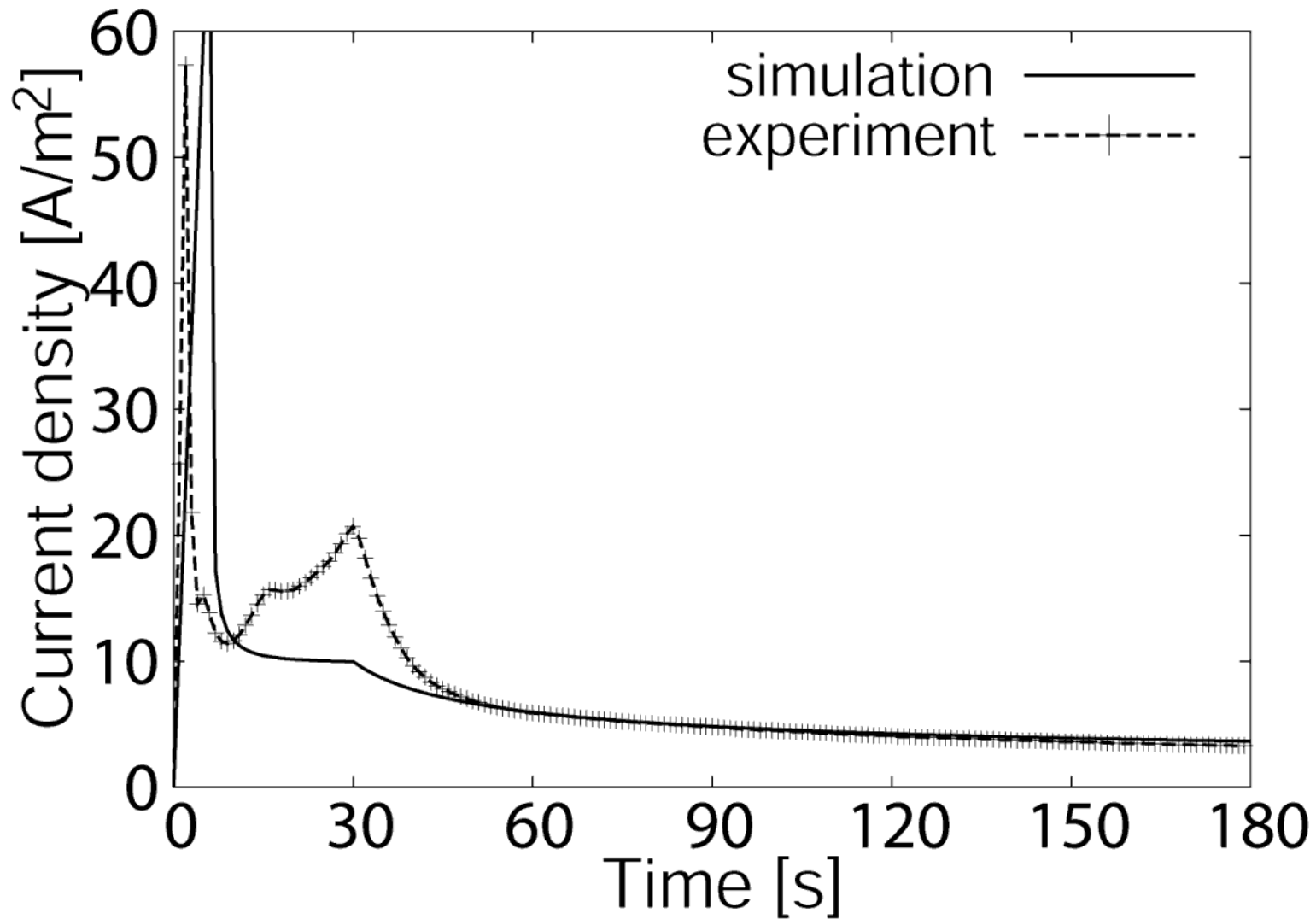
補足

# 実験結果 (アノードでの電圧降下)

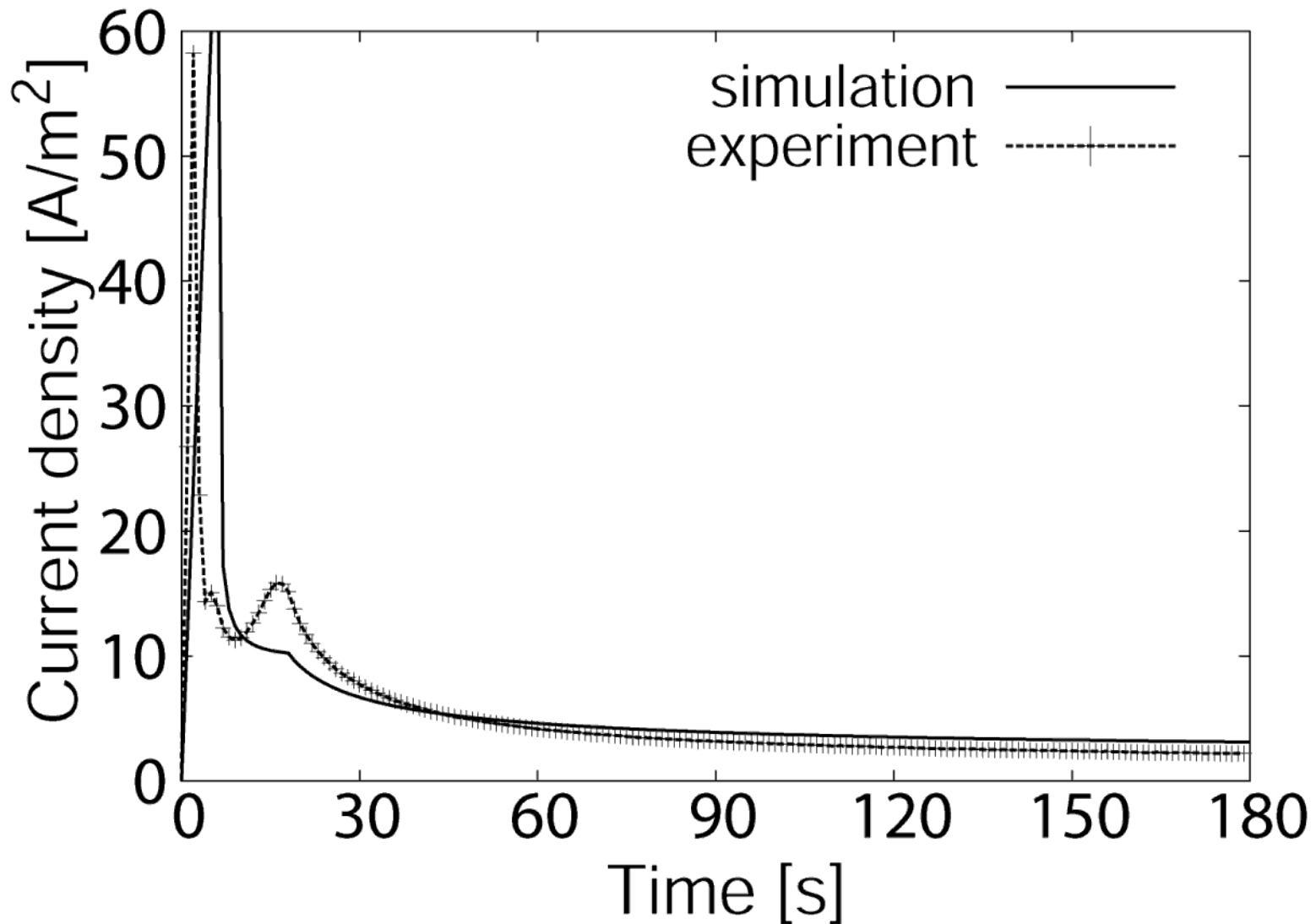


- 分極によるアノードでの電圧降下がみられる
- 電流密度が小さい場合のアノード近傍での電位降下は小さいため影響は無視できる
- 分極曲線ではなく電位を指定し与える

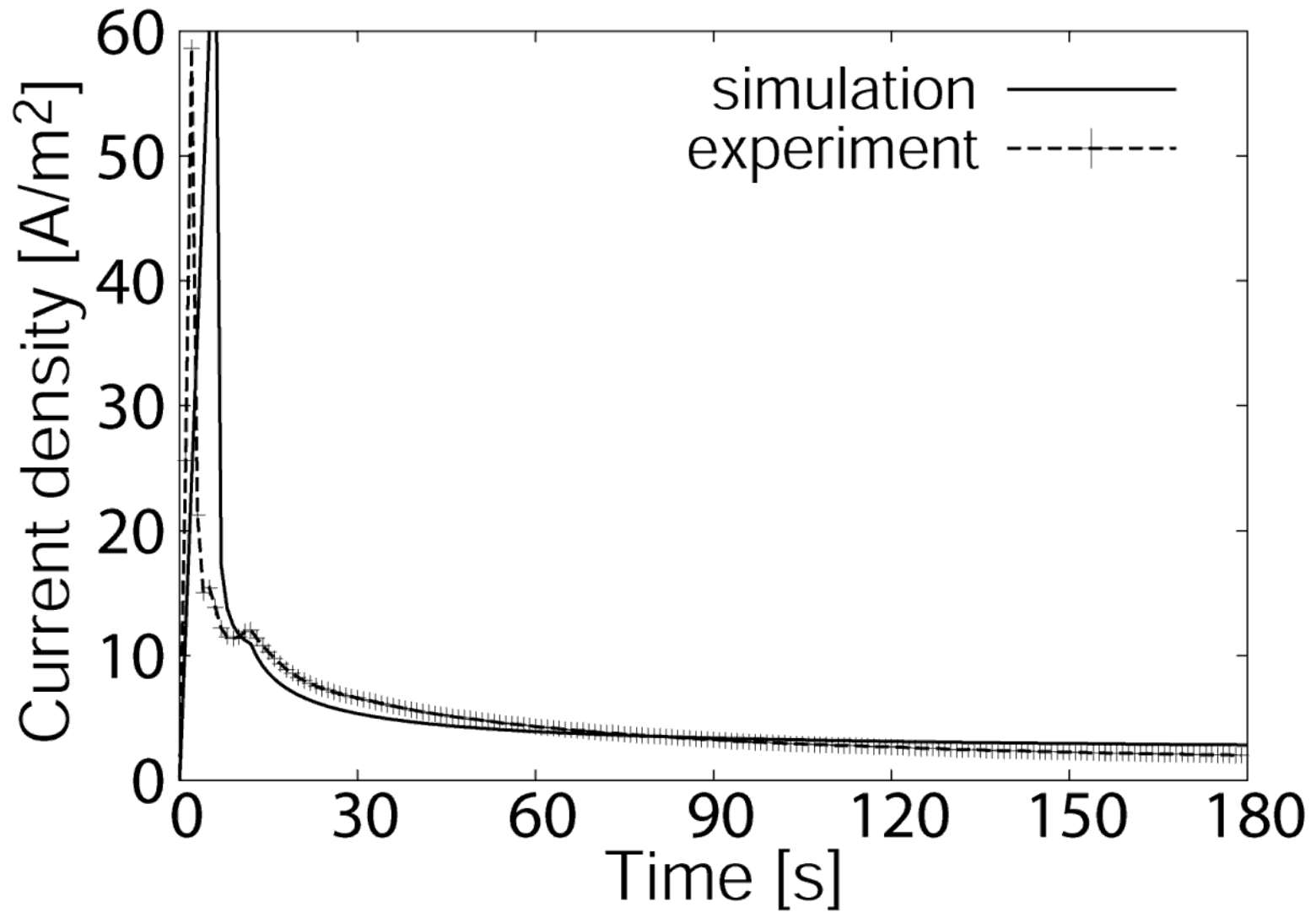
# 一枚板電着塗装-電流密度250V



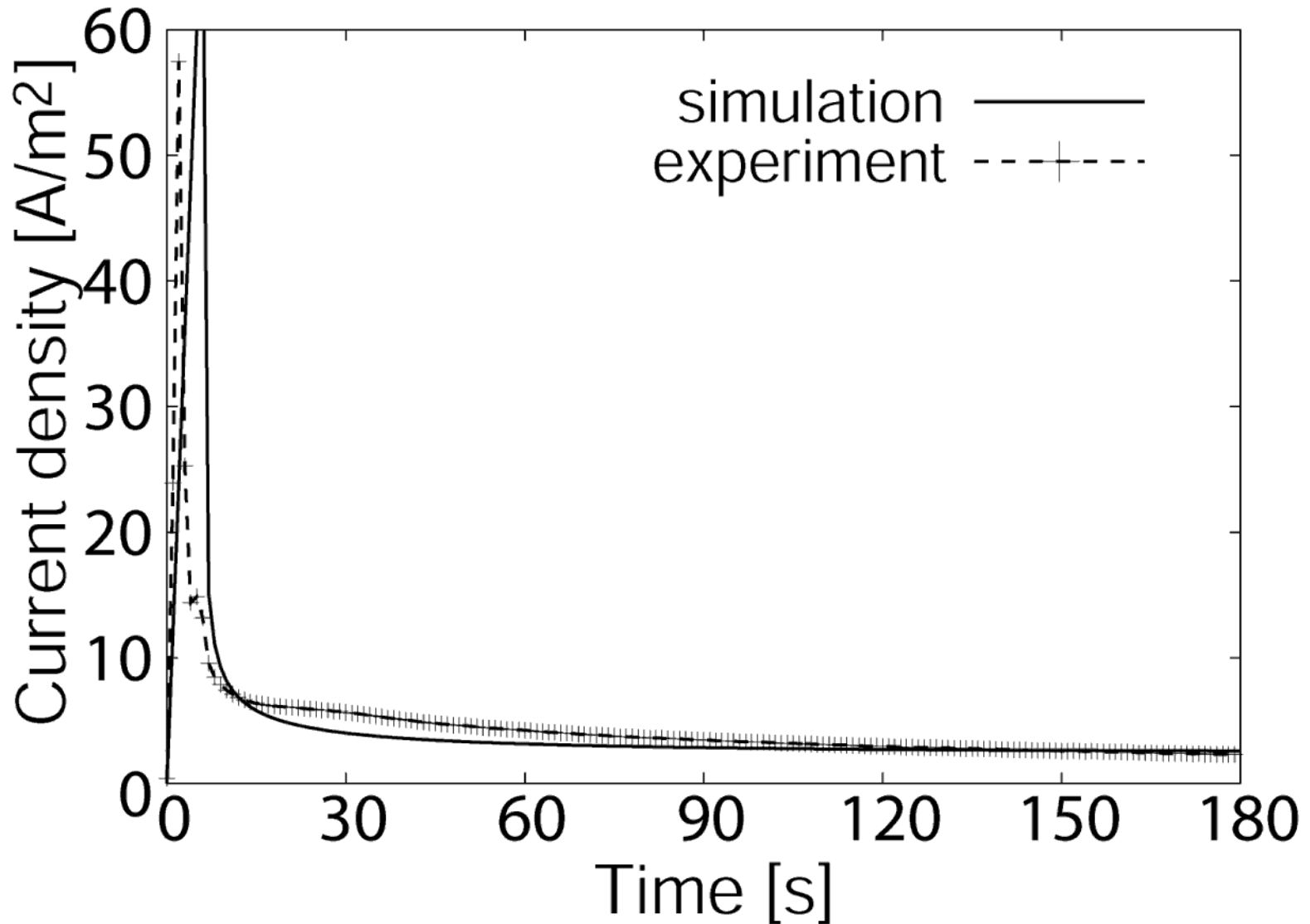
# 一枚板電着塗装-電流密度150V



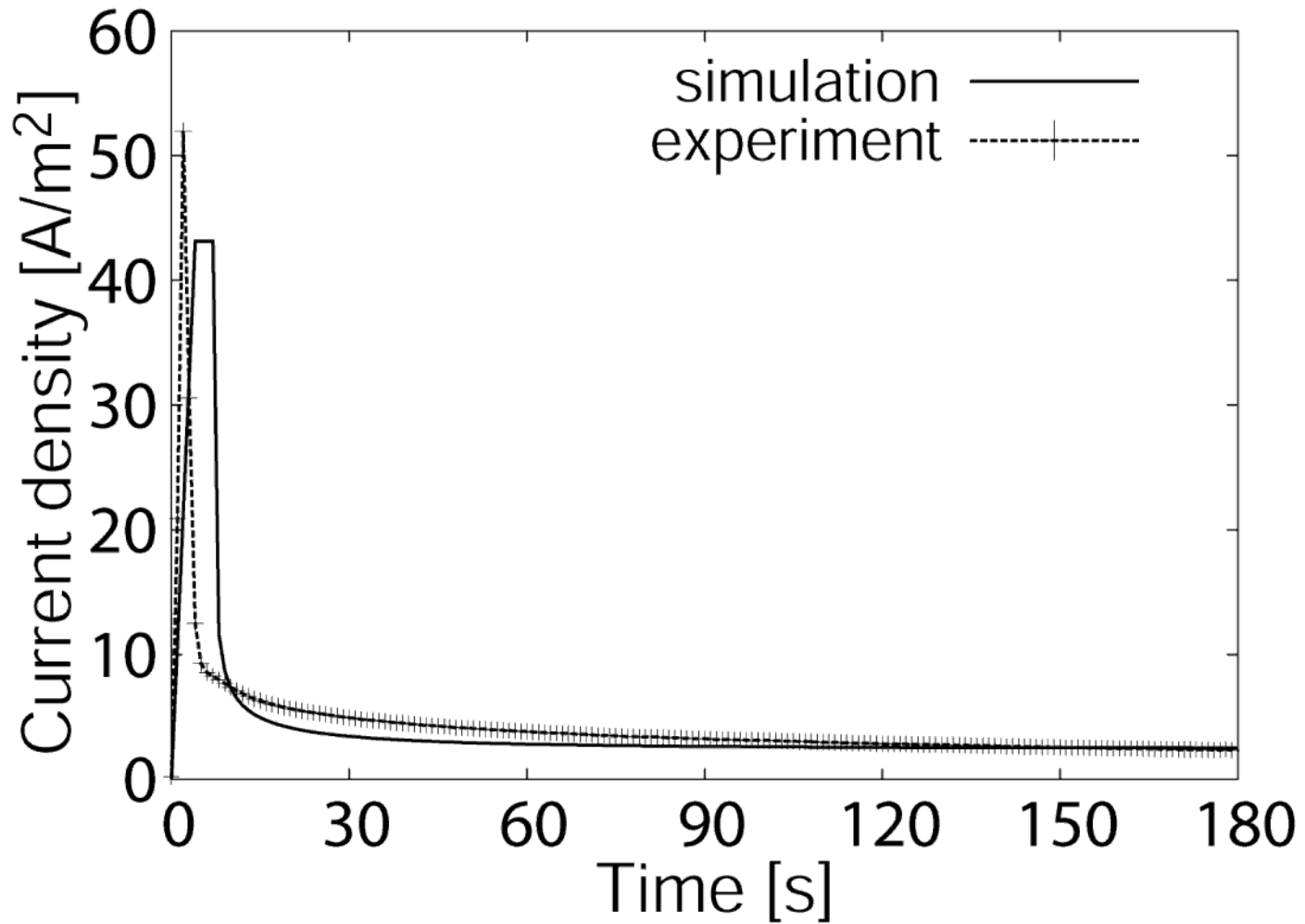
# 一枚板電着塗装-電流密度100V



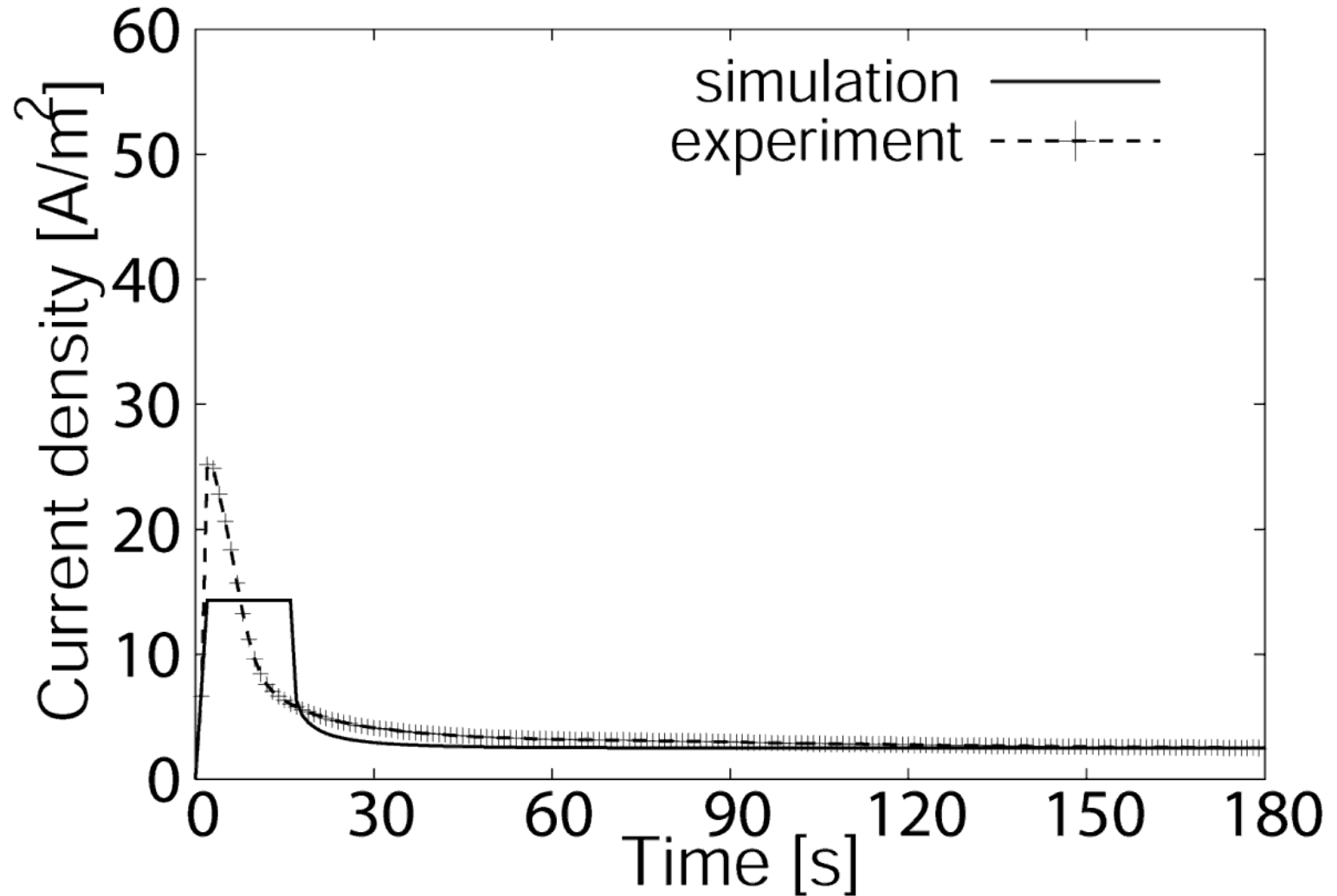
# 一枚板電着塗装-電流密度50V



# 一枚板電着塗装-電流密度30V

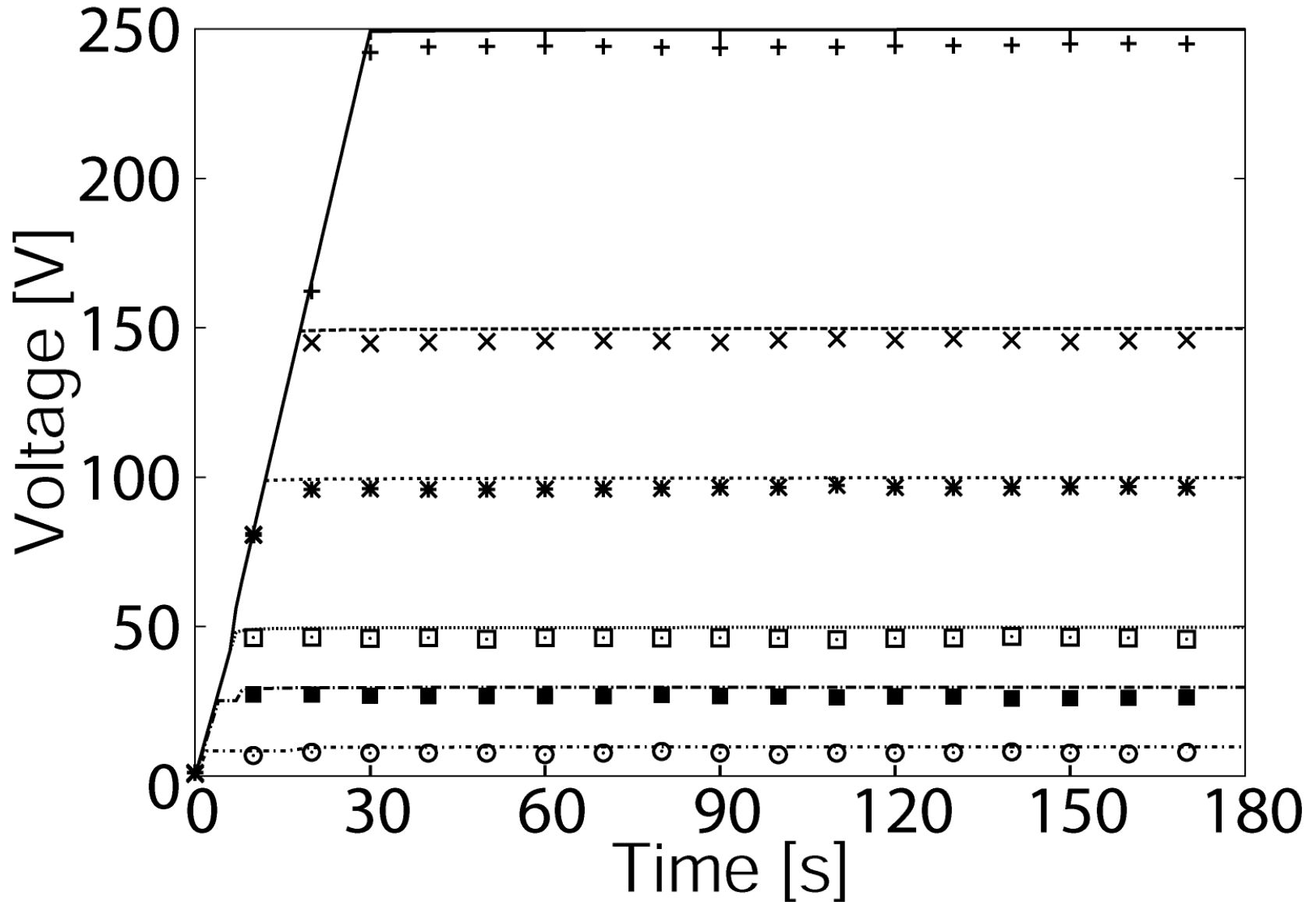


# 一枚板電着塗装-電流密度10V

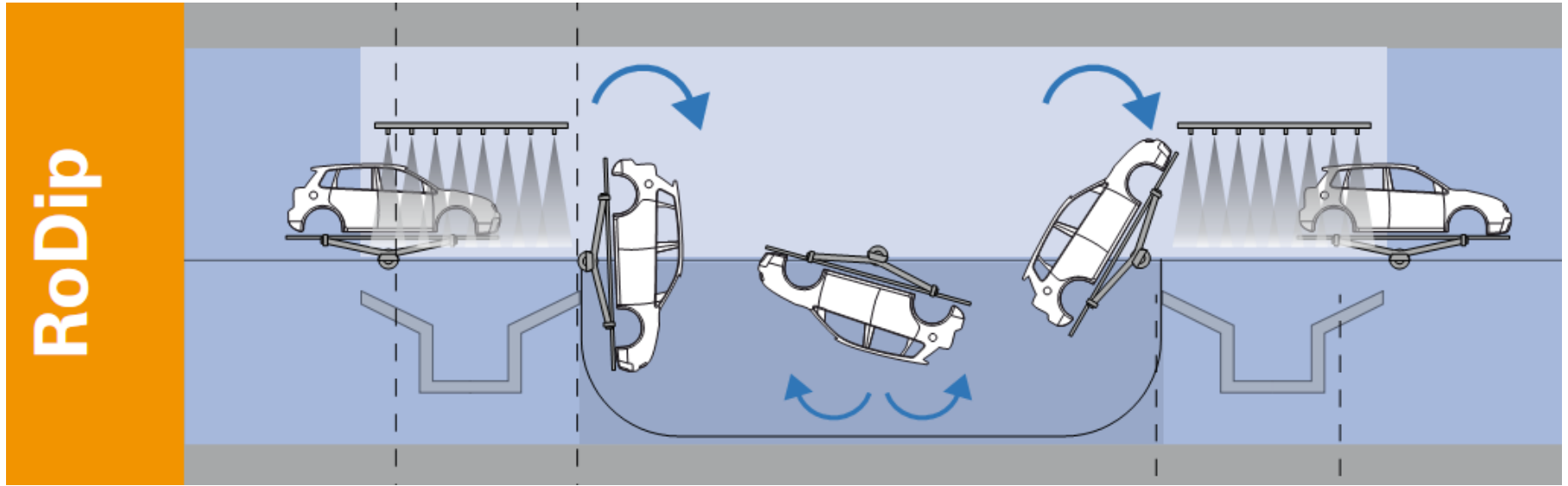




# 一枚板電着塗装結果-電位



# 新しい塗装システム



- 既存の方法では難しい
- 電解槽内を被塗装物が移動する解析が簡単にできる手法が望まれている

# 電着塗装シミュレーション

## 膜厚案内人(上村工業)

関西ペイント

FEM(有限要素法)

OHイオンの拡散消費 $j_0$ 、析出無効 $D_0$ を用いた析出モデル

## BEASY社(Electrocoating)

・イギリス

・BEM

・ $j_0$ のみ

## CAD-FEM社(VirtualPaintShop)

・アメリカ

・FEM(有限要素法)

・BMW

## Elsyca社

・ベルギー

・FEM(有限要素法)

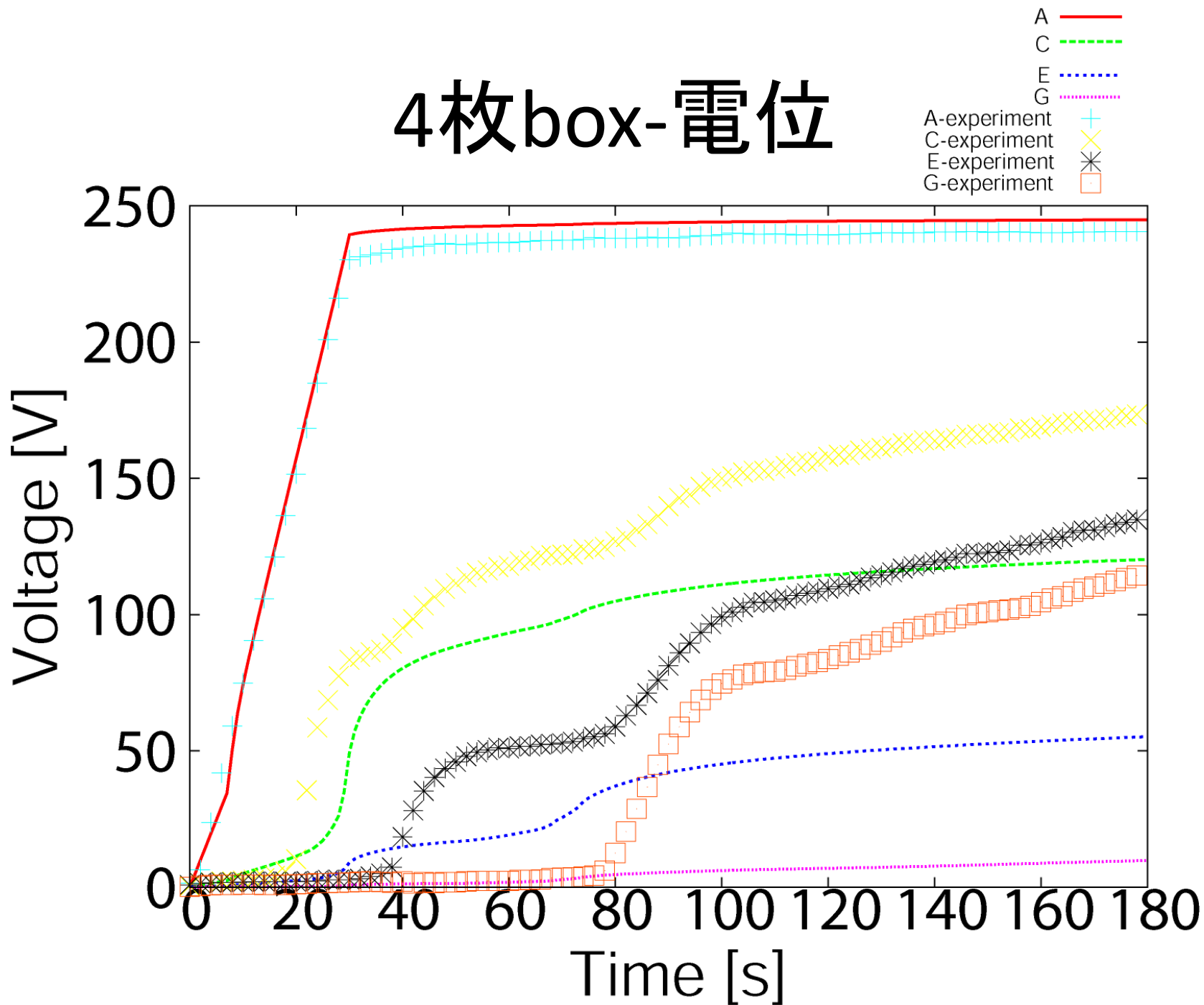
## ディライト(ED-Designer)

富士重工業, スズキ

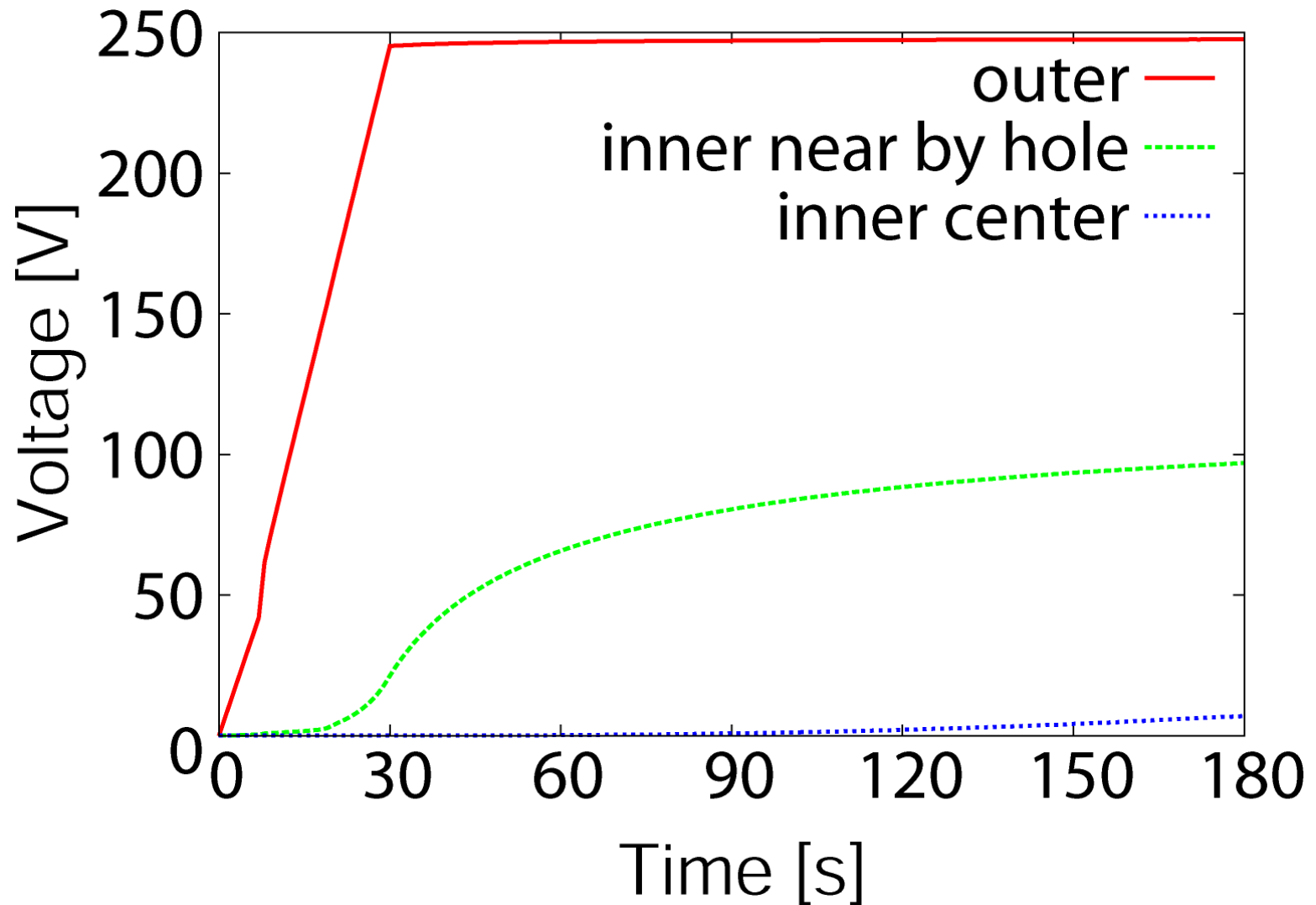
FVM(有限体積法)

実験相関式( $exp$ の補正式)

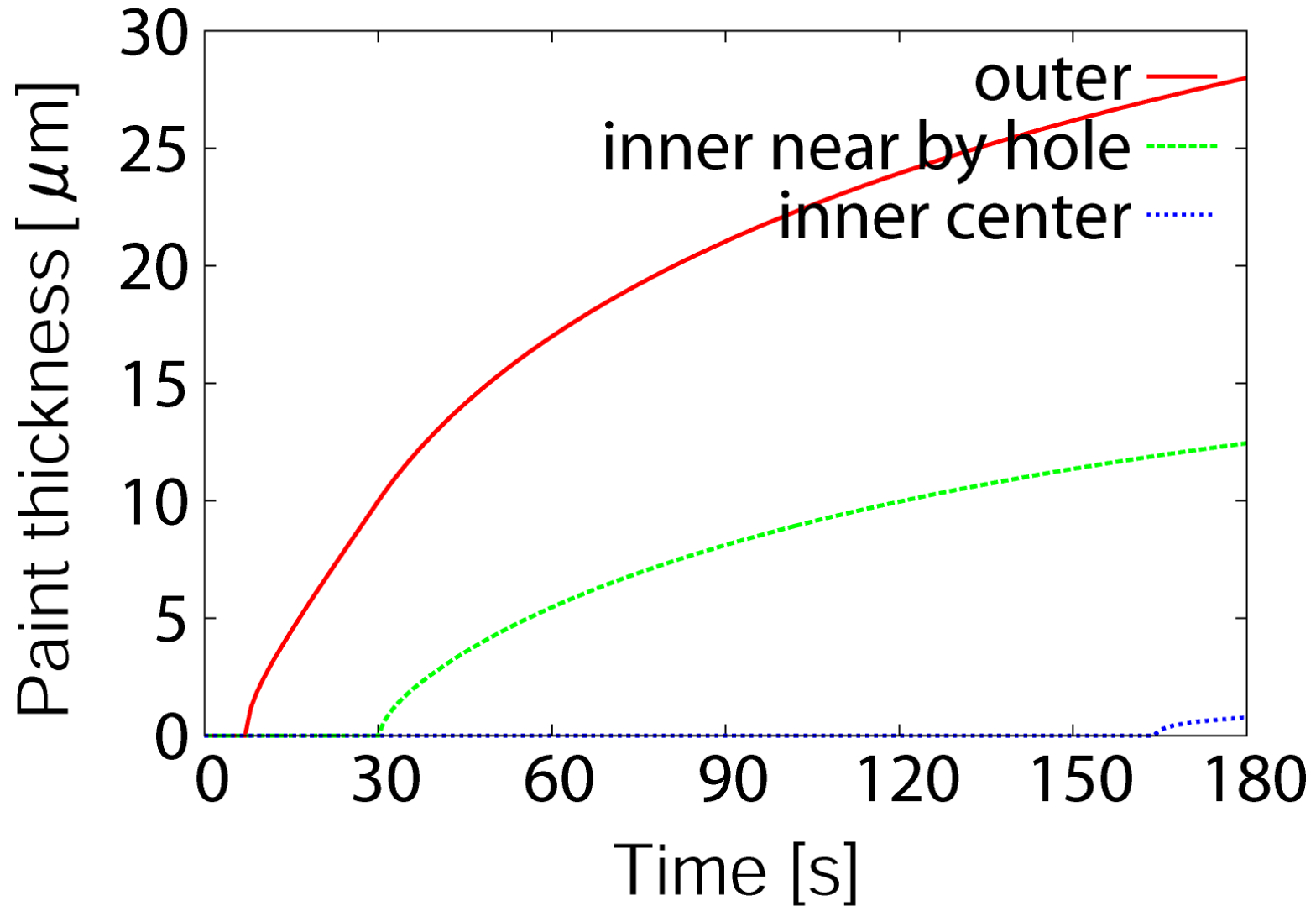
# 4枚box-電位



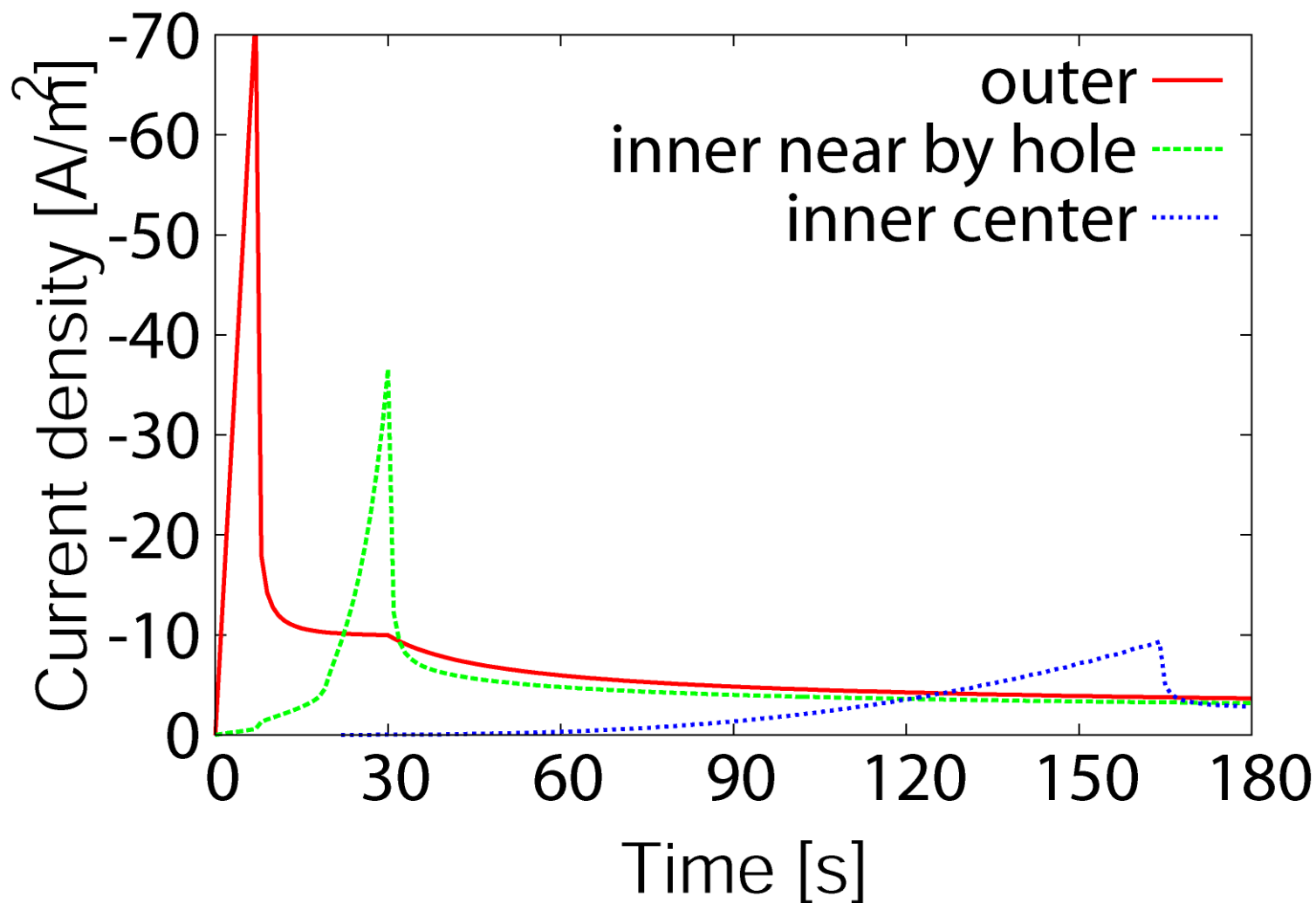
# 袋状部材シミュレーション結果(電位)



# 袋状部材シミュレーション結果(膜厚)



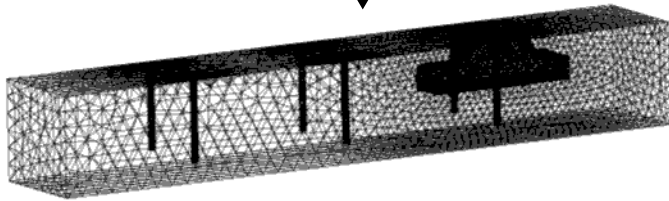
# 袋状部材シミュレーション結果（電流密度）



# 電着塗装シミュレーションの流れ

input

- ・自動車CADデータ
- ・電着ライン寸法, 極配置

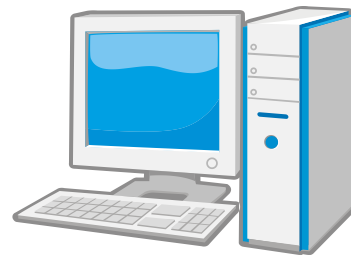


メッシュデータ

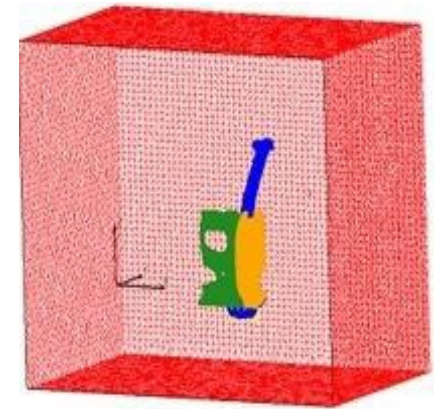
- ・電気伝導度  $\kappa$
- ・塗膜抵抗  $R$
- ・...

塗料特性データ

output



シミュレーション



シミュレーション結果

- ・電位分布
  - ・電流密度分布
  - ・膜厚分布
- の時間変化



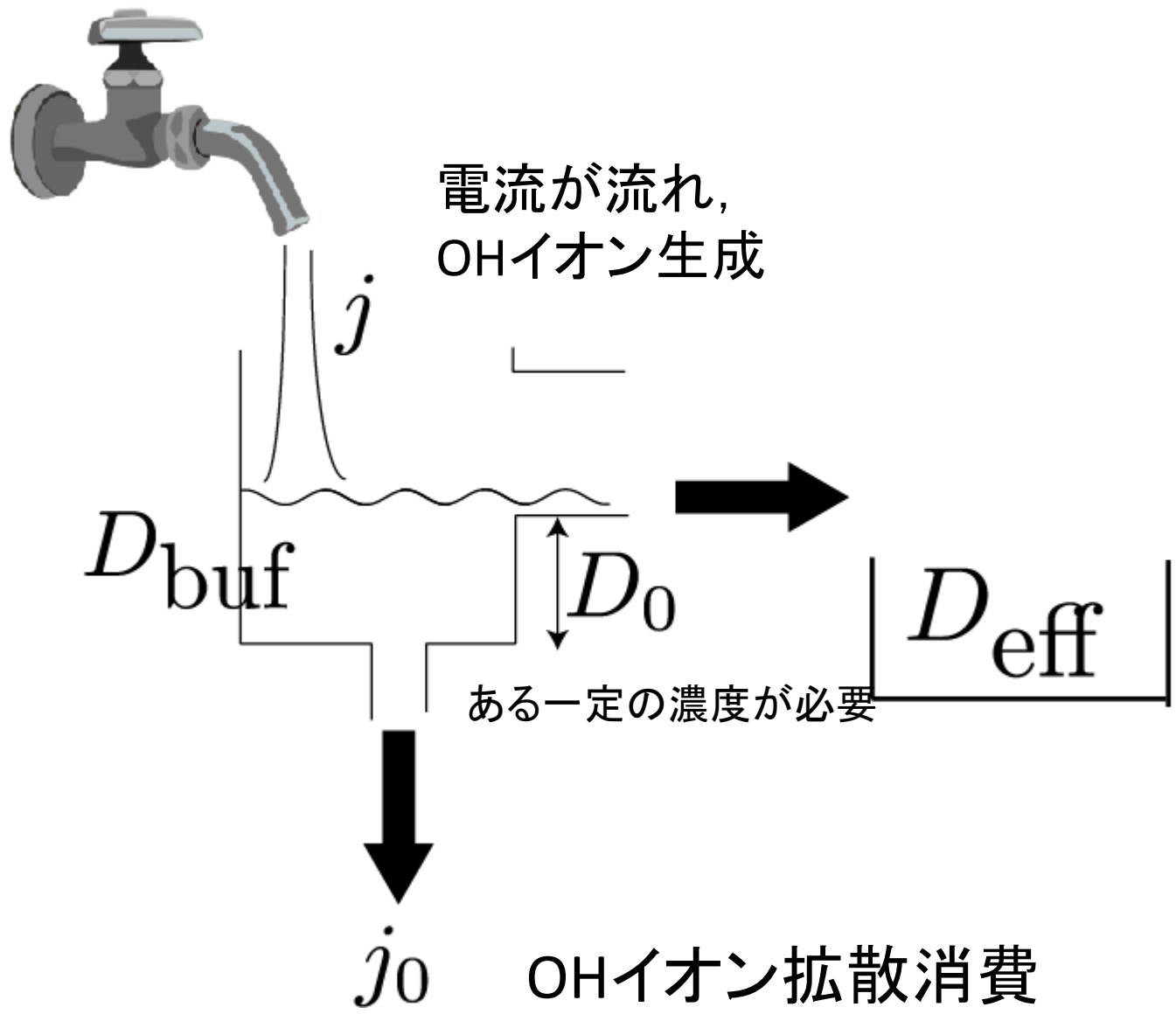
# 塗膜析出モデル

- カソード近傍でのOHイオン
  - ある一定の濃度を超えると析出を開始する(  $D_0$  )
  - ある一定の割合で拡散消費(  $j_0$  )

$$\sigma = g \cdot D_{\text{eff}} \quad \sigma: \text{析出塗膜質量密度}$$
$$g: \text{有効クーロン効率} \quad g = \text{const.}$$

$$\frac{d}{dt} D_{\text{eff}} = \begin{cases} 0 & (D_{\text{buf}} \leq D_0) \\ \max(j - j_0, 0) & (D_{\text{buf}} > D_0) \end{cases}$$

$$\frac{d}{dt} D_{\text{buf}} = \begin{cases} 0 & (D_{\text{buf}} = D_0 \text{ and } j > j_0) \\ 0 & (D_{\text{buf}} = 0 \text{ and } j < j_0) \\ j - j_0 & (\text{otherwise}) \end{cases}$$

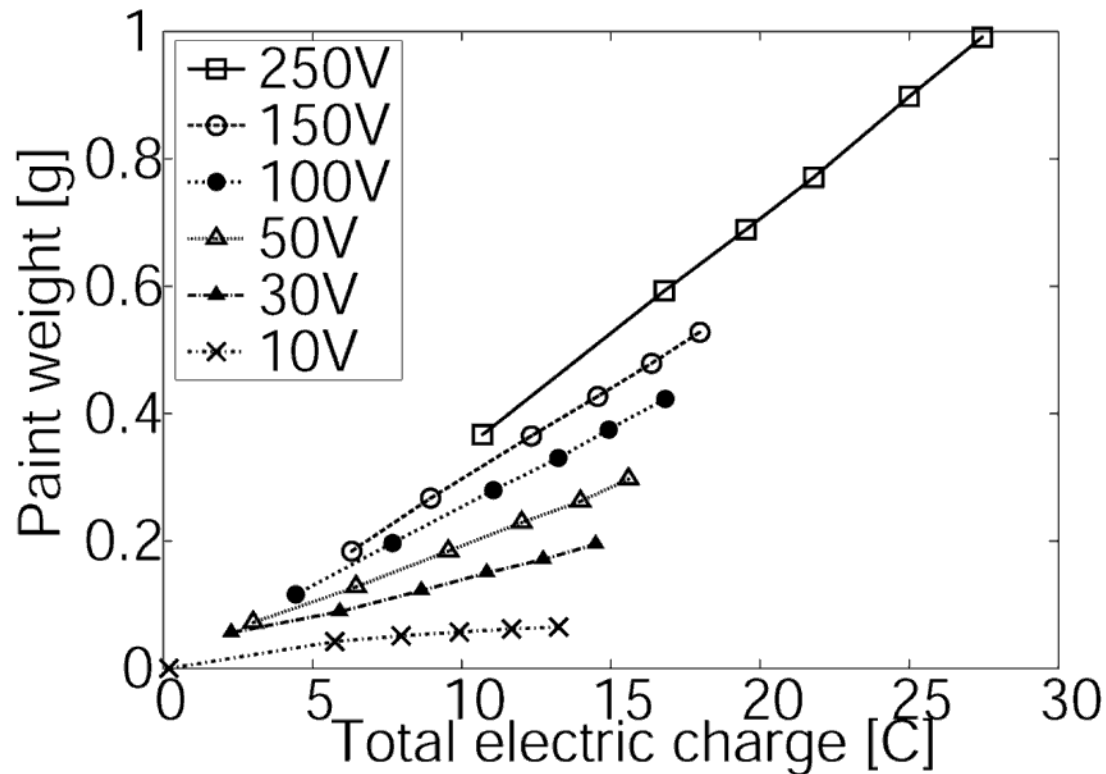


# 数値シミュレーション結果-4枚BOX

	実験結果	数値シミュレーション結果
A面	31.4 $\mu\text{m}$	27.7 $\mu\text{m}$
C面	20.8 $\mu\text{m}$	15.3 $\mu\text{m}$
E面	14.6 $\mu\text{m}$	7.56 $\mu\text{m}$
G面	12.2 $\mu\text{m}$	1.28 $\mu\text{m}$

# 塗膜析出パラメータ同定結果

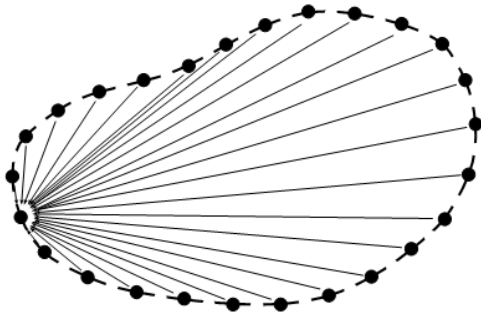
Invalid charge density	$D_0$	165	[C/m <sup>2</sup> ]
Diffusion current density	$j_0$	2.5	[A/m <sup>2</sup> ]
Growth rate	$g$	0.067	[g/C]



# 高速多重極法による計算の効率化

## BEM

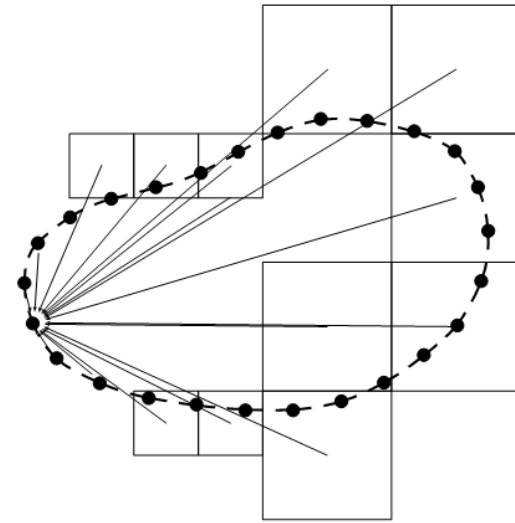
- 全ての要素からの寄与を計算



- 計算記憶容量  $O(N^2)$
- 計算量  $O(N^3)$  (直接法)  $\rightarrow$   
 $O(N^2)$  (反復法)

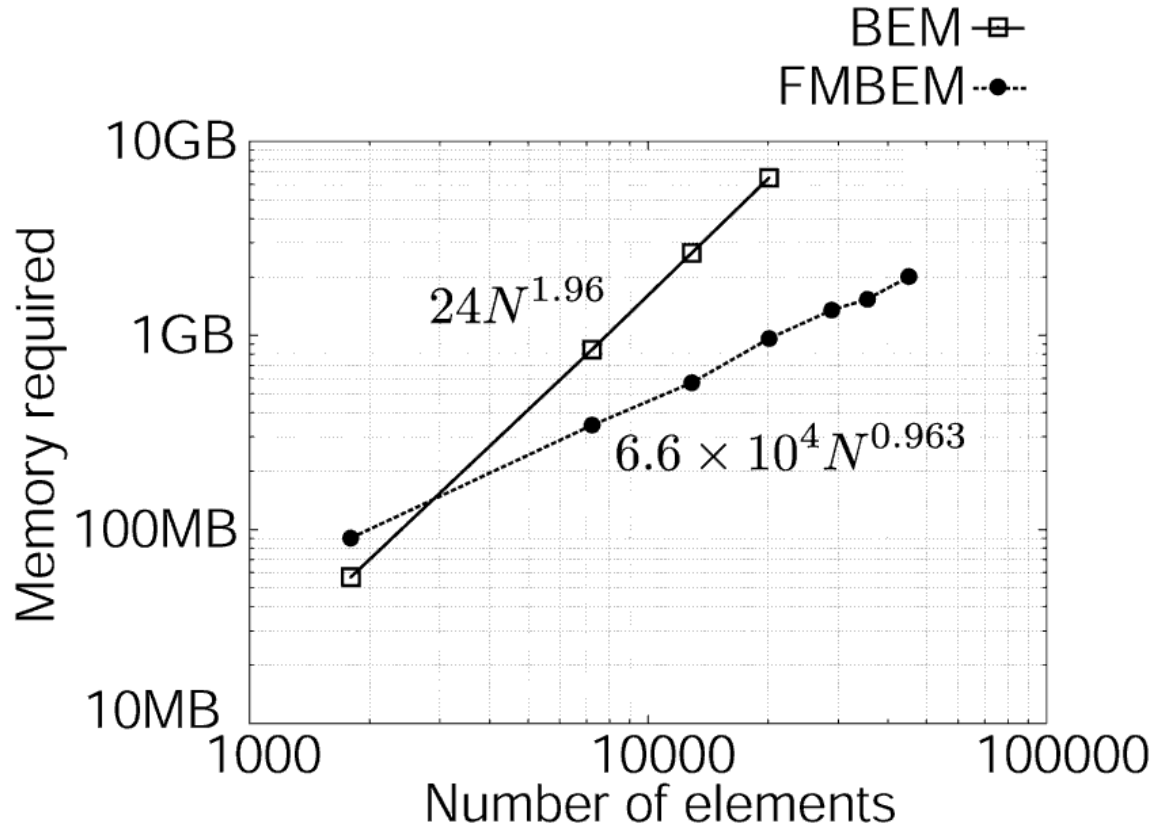
## FMBEM

- あるまとまった単位で寄与を計算



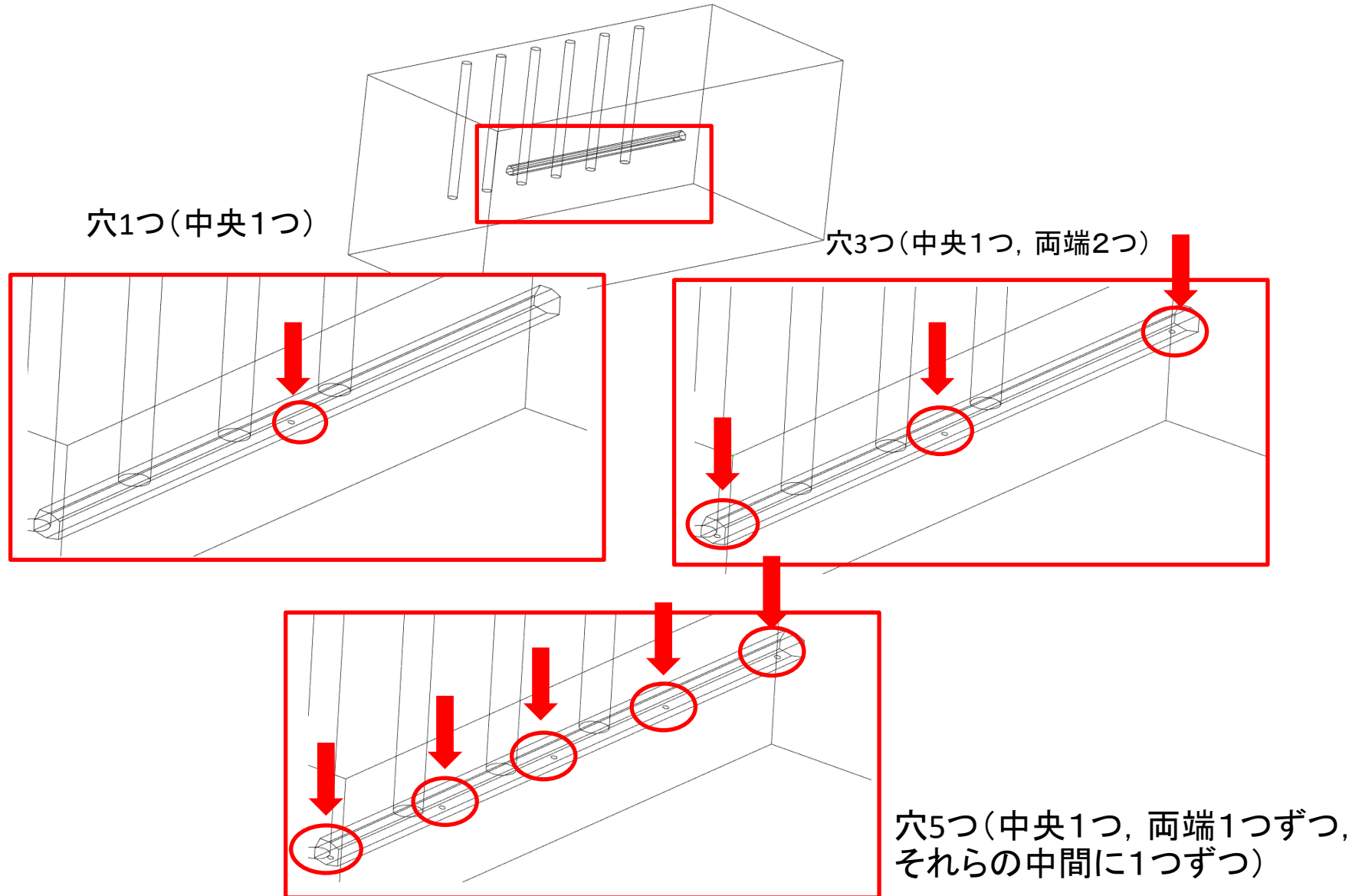
- 計算記憶容量  $O(N)$
- 計算量  $O(N)$

# FMBEMプログラム実行結果



- 計算時間については、まだチューニングや高速化の手法を行う必要があり、効果が確認できなかった
- 要素数に対する消費メモリの増加が小さいため、大要素数でも解析できる

# 数値シミュレーション②-電着穴の影響



# 結果(膜厚の時間変化)

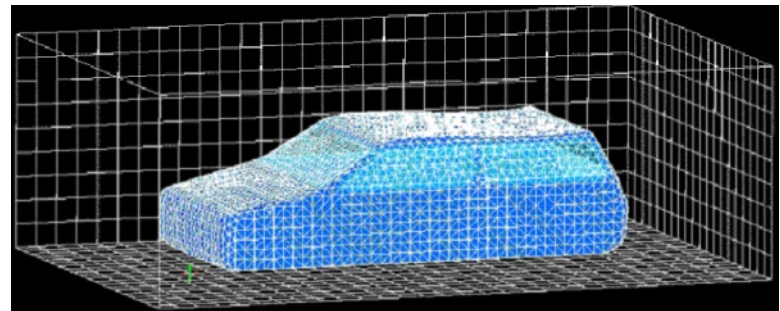
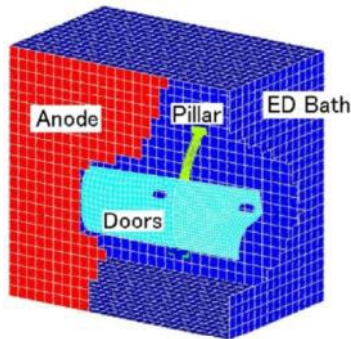


# 従来の電着塗装シミュレーション

- ラインにのって電解槽中をボディが移動する解析を行う場合、
- 有限要素法 (FEM) や有限体積法 (FVM) では  
ボディが移動するごとにメッシュ分割をし直さなければならない



- 部品の解析や単純化したモデルでの解析にとどまっている



T. KOMORIYA, et. al., “Development of Prediction Methods for Film Thickness in Electro-deposition Coating Process”, 4<sup>th</sup>-ASME\_JSME Joint Fluids Engineering Conference (2003) より

効率的に塗装工程全体の詳細な解析を行う手法が必要