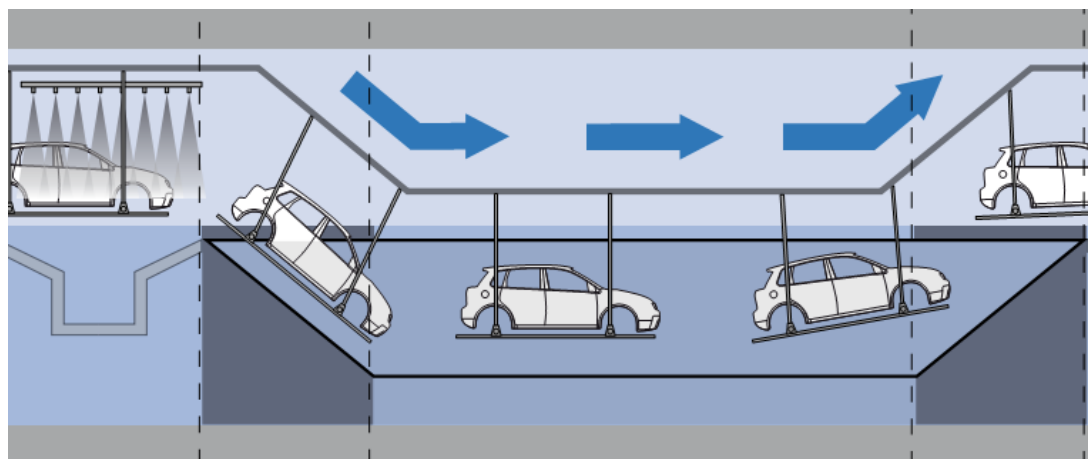
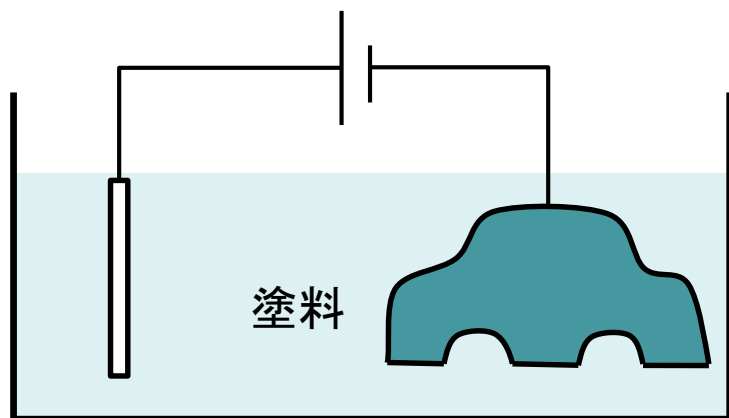


電着塗装シミュレーションにおける クーロン効率の膜厚依存性を考慮した 非線形塗膜析出モデル

東京工業大学 長井 悠, 大西 有希, 天谷 賢治



研究背景



(<http://www.rodip.com.br/>より)

アノード
電極

被塗装物
(カソード)

■ 電着塗装とは通電することで塗膜を析出させる塗装法

- 自動車ボディの下塗りなどに用いられている

■ 袋状の部材では膜厚の均一性が保たれない

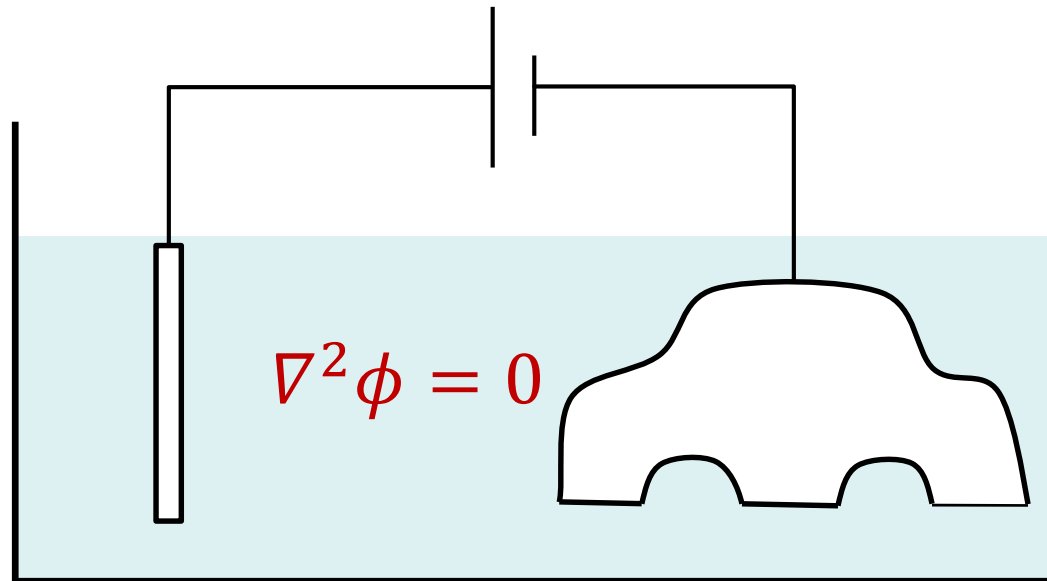
- 電極の位置, 電圧, 電着時間などの最適化が必要

■ 実車試験では時間とコストがかかる

⇒ **数値シミュレーション**が有用



電着塗装シミュレーションの概要



- 塗料中の電場解析を行う
- カソードの電流密度から析出量を計算
- 塗膜の電気抵抗などを境界条件として与える

重要な数理モデル

- 電着塗装シミュレーションにおいて
膜厚を計算するために必要な数理モデルは以下の二つ

塗膜析出モデル

塗膜の析出速度を決定

塗膜抵抗モデル

塗膜の電気抵抗を決定

- 従来のシミュレータでは

析出速度 \propto 電流

電気抵抗 \propto 膜厚

各モデルが簡単すぎるため精度が不十分

研究目的

塗膜析出現象の非線形性を考慮して 電着塗装シミュレーションを高精度化する

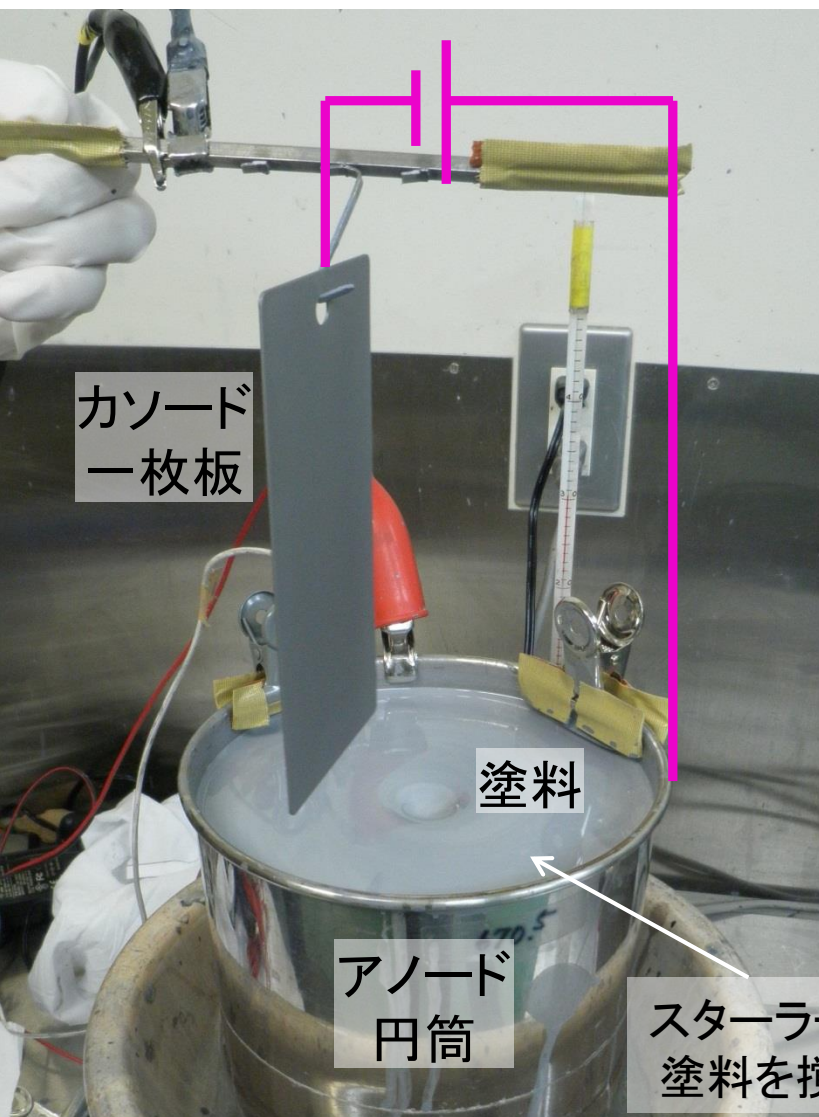
新たな塗膜析出モデル及び塗膜抵抗モデルの提案

発表の流れ

- 一枚板電着実験: 電着塗装の特性(主なもの)
- 提案モデルの説明
- 検証例題

一枚板電着実験

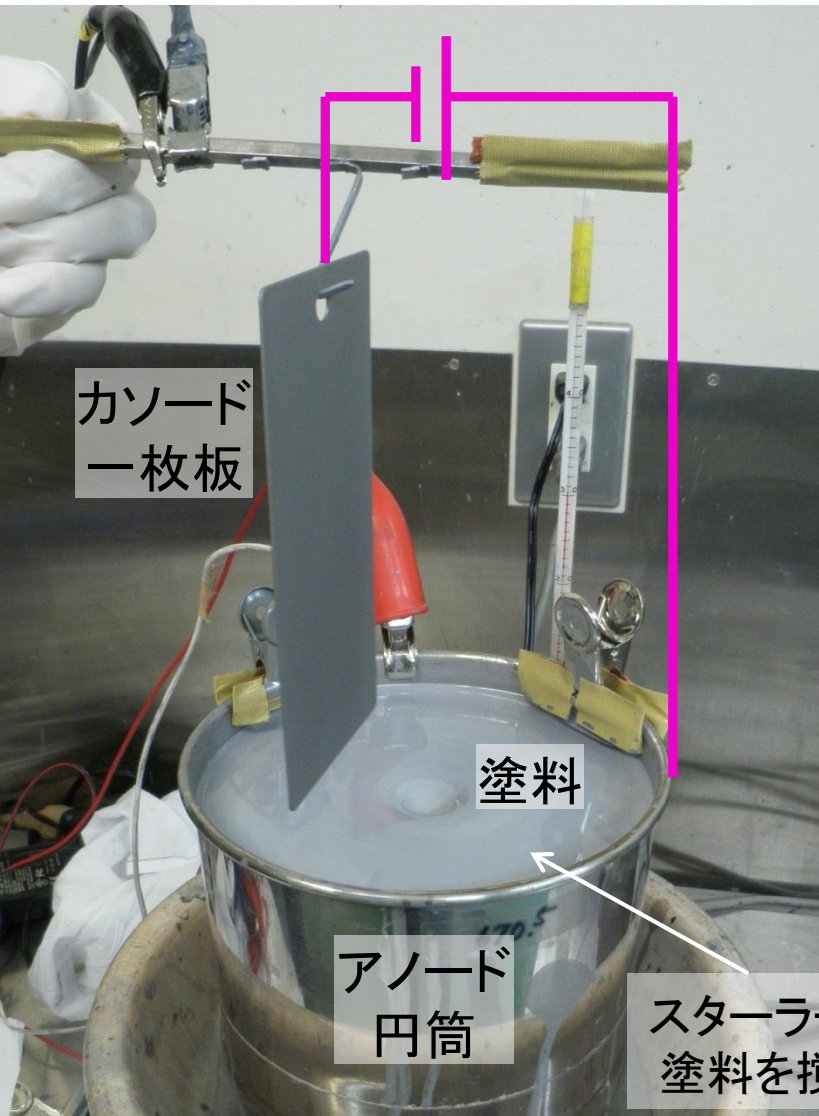
一枚板電着実験



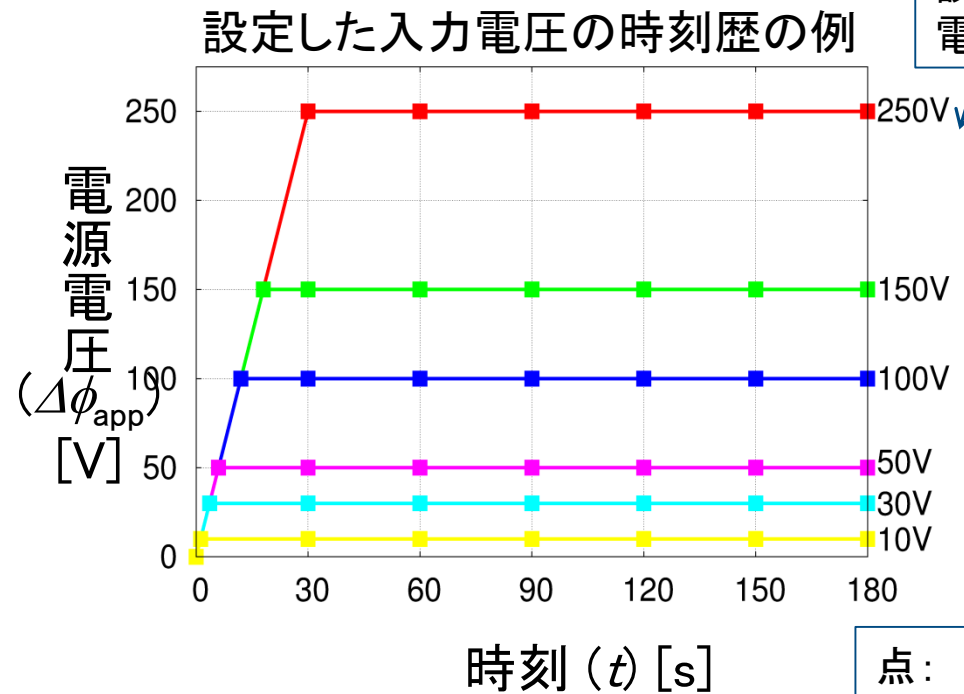
塗膜抵抗やクーロン効率等のデータを得るための基礎実験

- 鋼板を塗料に全没して電着
- 電着中の電流, 電源電圧を計測
- 実験終了時に膜厚を計測
- 温度および攪拌速度は一定に保つ

一枚板電着実験



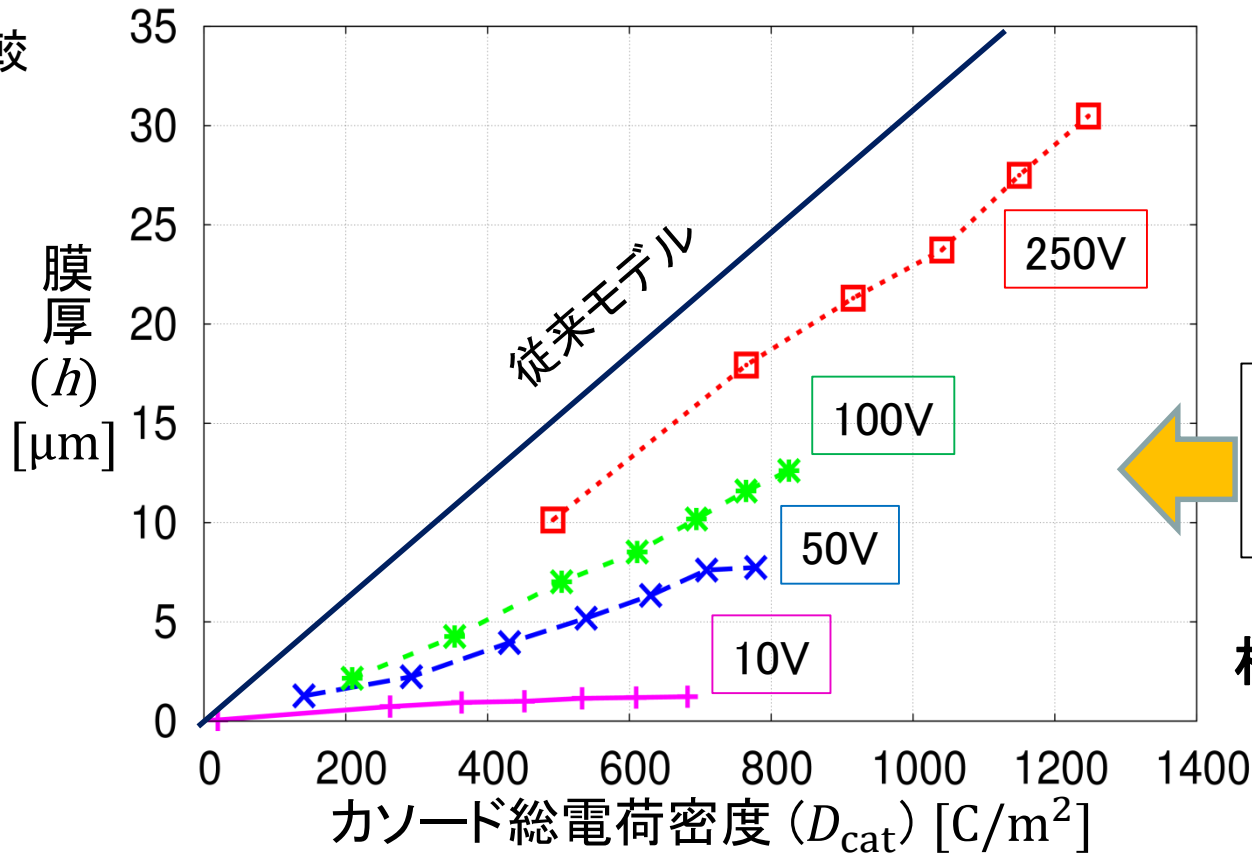
■ 設定電圧と通電時間の組み合わせを複数与える



- 昇圧速度は一定
- 設定電圧に到達したところで電圧を保持

一枚板電着実験 結果(クーロン効率)

析出効率比較

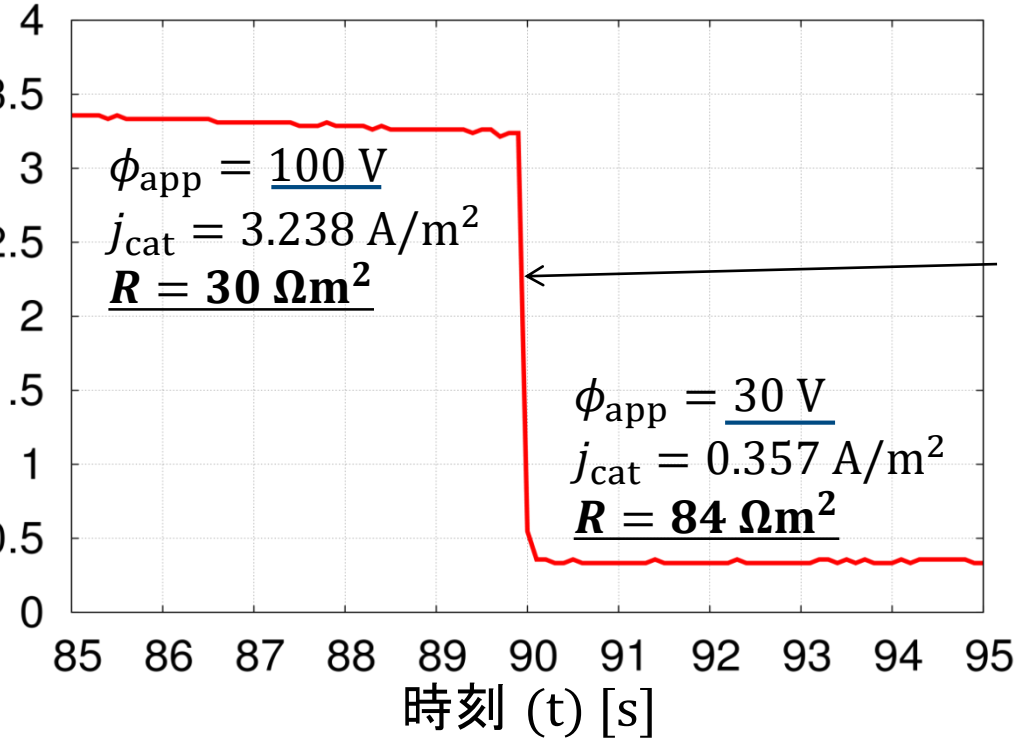


- 電源電圧が高いほどクーロン効率が高い
電圧が低いほど電流のロスが多い

一枚板電着実験 結果(電気抵抗の変化)

電流密度
時刻歴

カソード
電流密度
(j_{cat})
[A/m²]



- 100V→30V
入力電圧を急激に下げた
- 電気抵抗を概算

■ 膜厚不変にも関わらず、塗膜抵抗が急激に変化した

電気抵抗 \propto 膜厚 \rightarrow 塗膜抵抗は電圧にも依存する

実験結果まとめ

- 従来は各モデルは線形の式で表されていた

塗膜析出モデル
析出速度 \propto 電流

塗膜抵抗モデル
電気抵抗 \propto 膜厚

- 実験の結果, 以下の事が示された

析出の際に電流のロス
ロス は電流と膜厚による

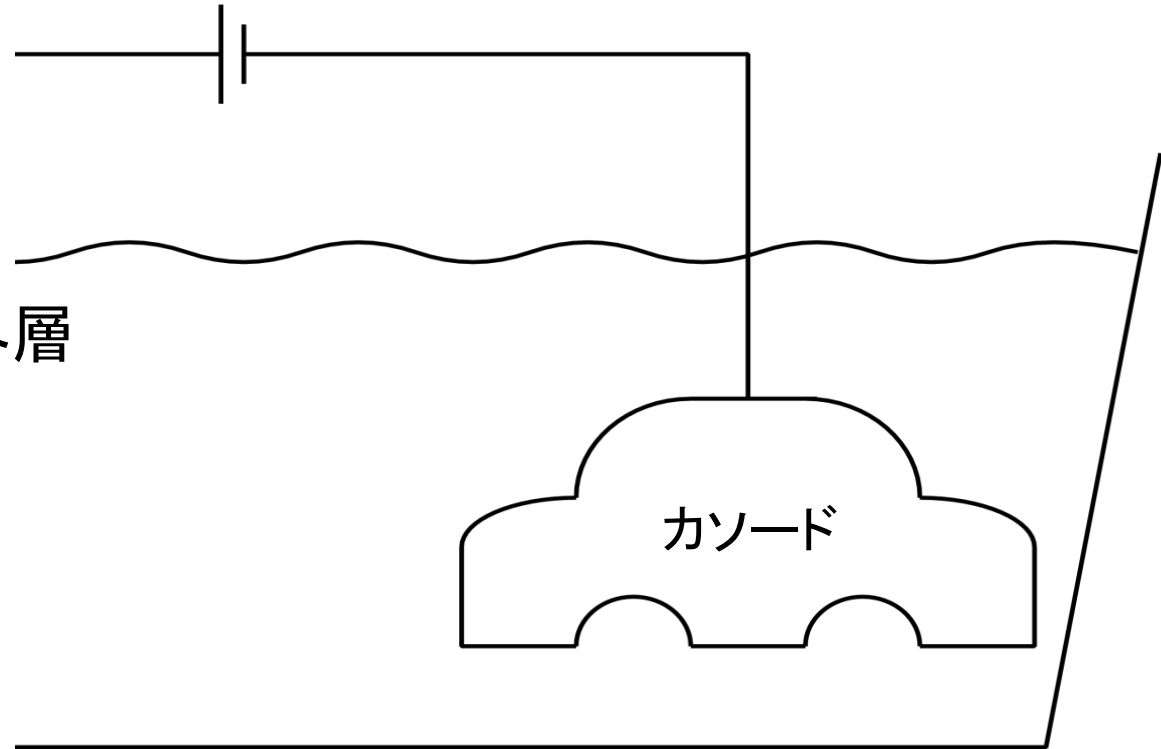
抵抗は膜厚と電圧による

提案モデルの説明

提案：析出メカニズム

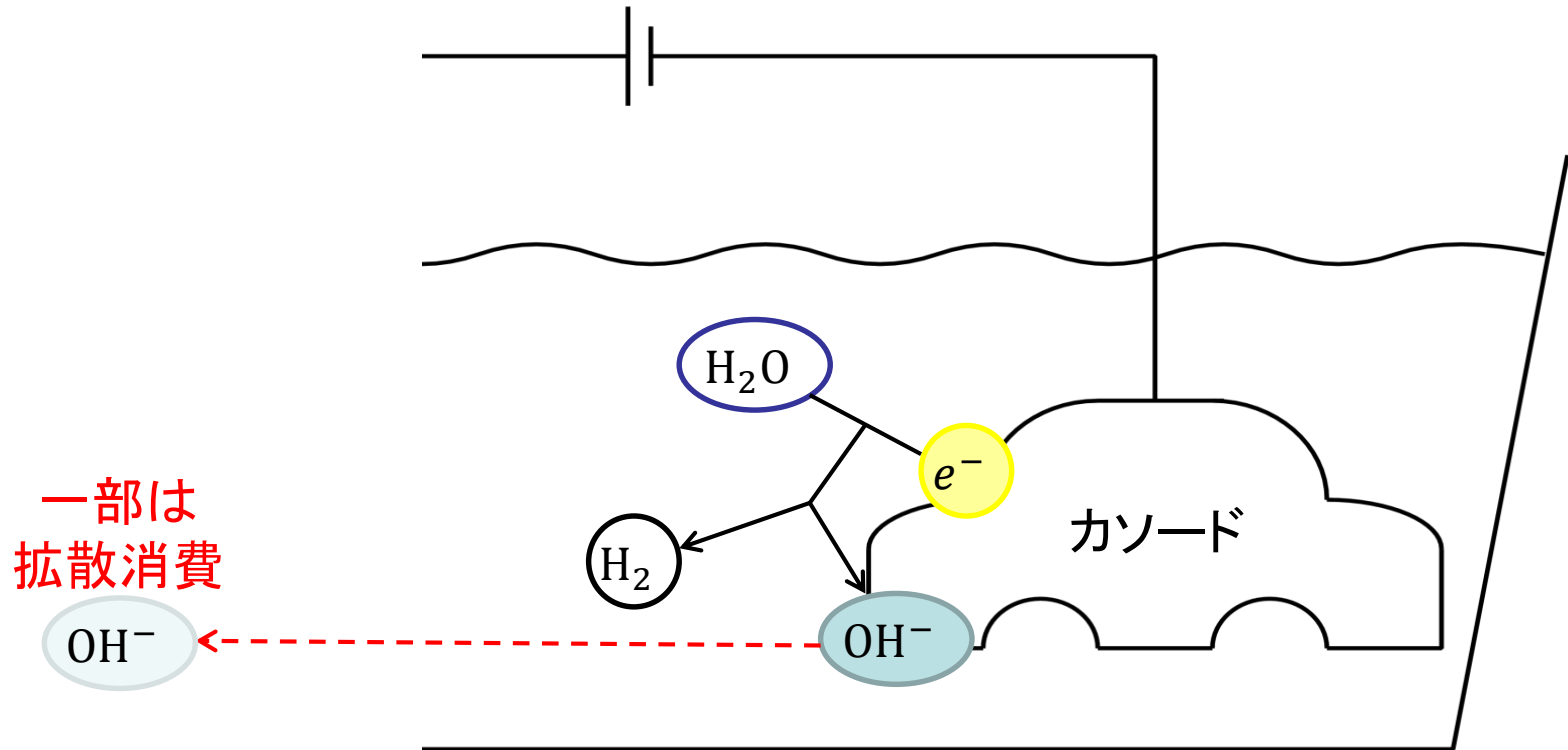
電着槽内

カソード境界層



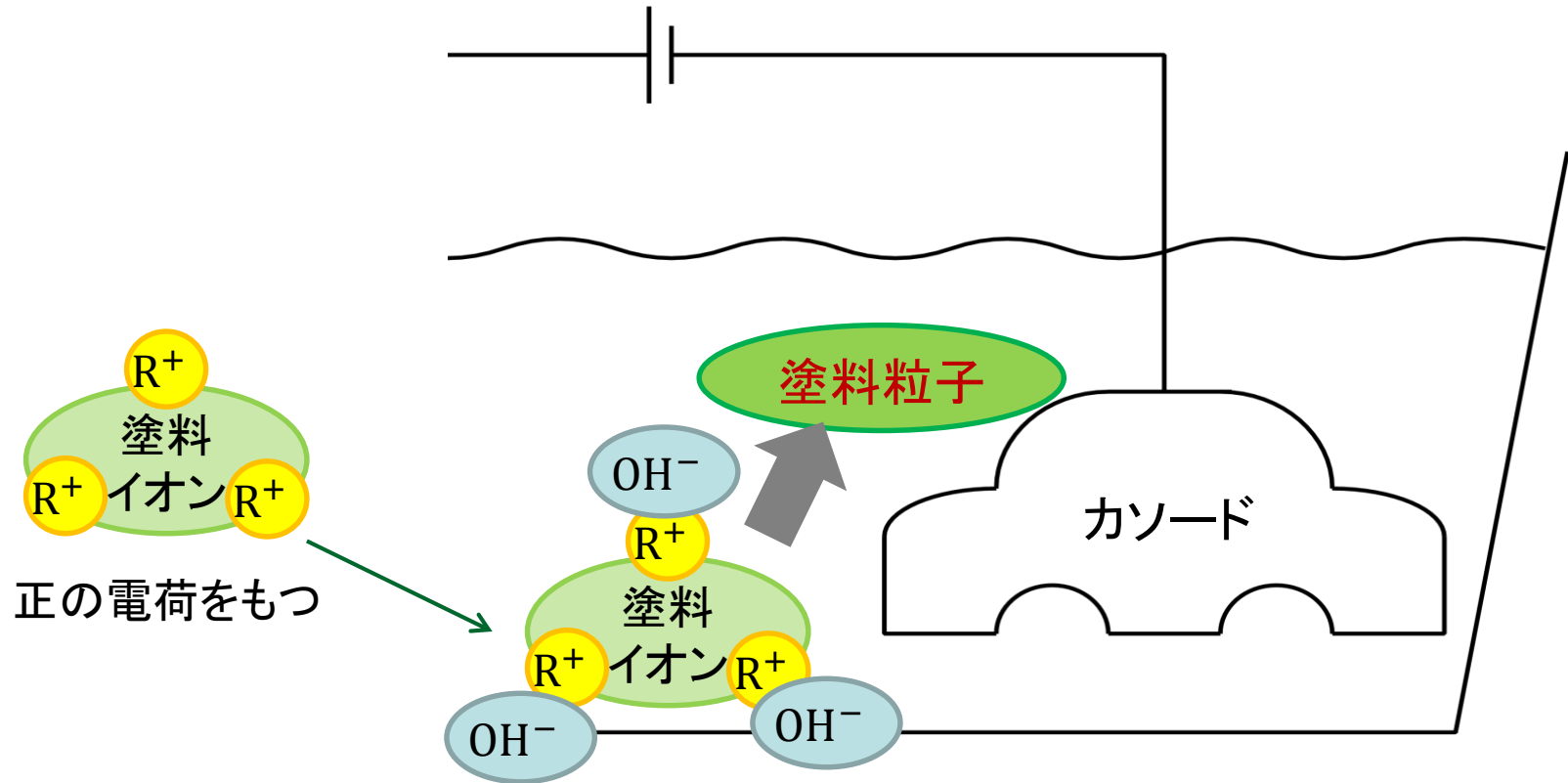
塗膜析出モデルを構築する際に考慮した
塗膜の析出メカニズムについて説明

提案：析出メカニズム



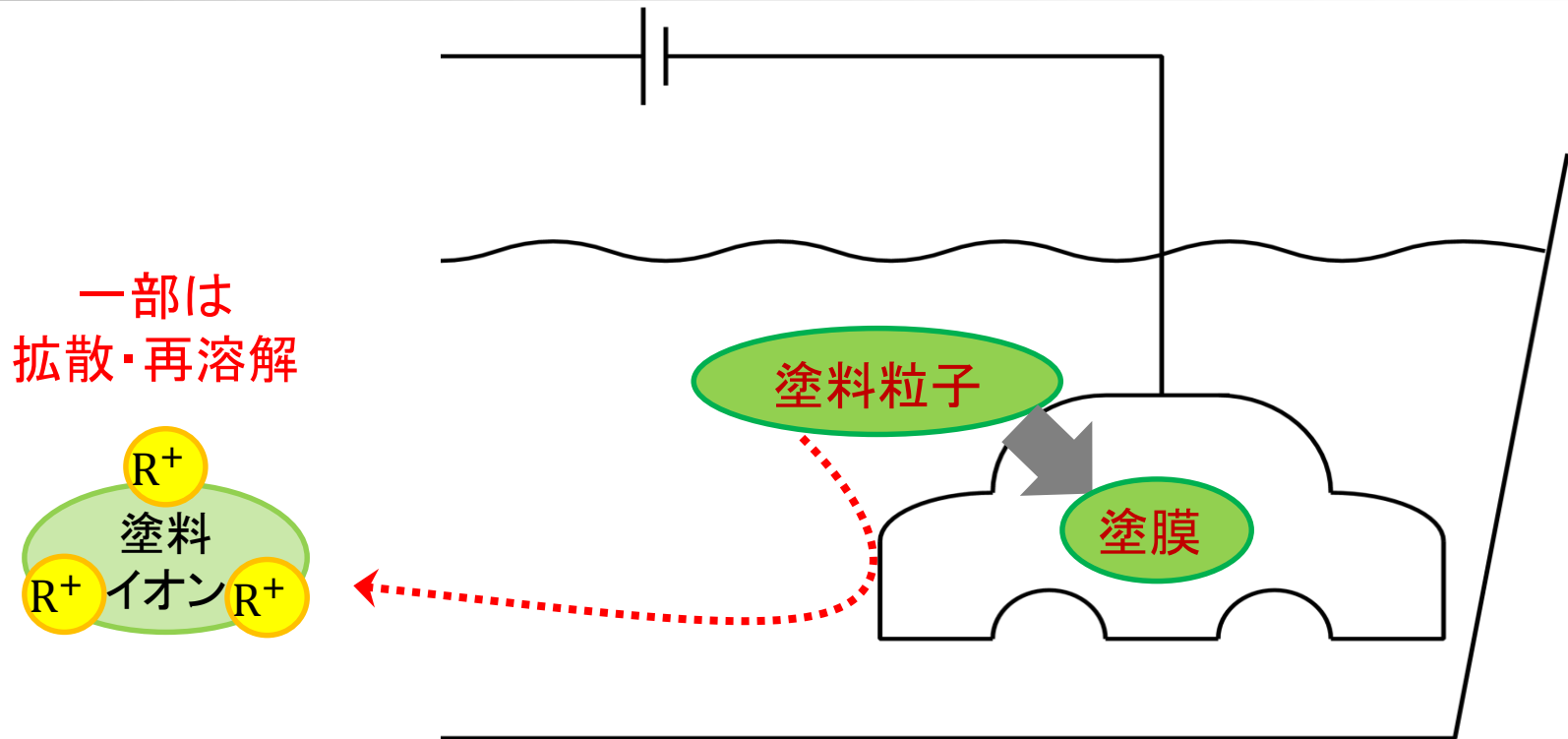
- ①水の電気分解により、カソード表面で OH^- が発生，蓄積される
- ② OH^- の一部は拡散消費

提案：析出メカニズム



- ③ OH^- が一定量たまると塗料イオンと反応
カソード近傍で**塗料粒子**が析出を開始

塗膜析出メカニズム

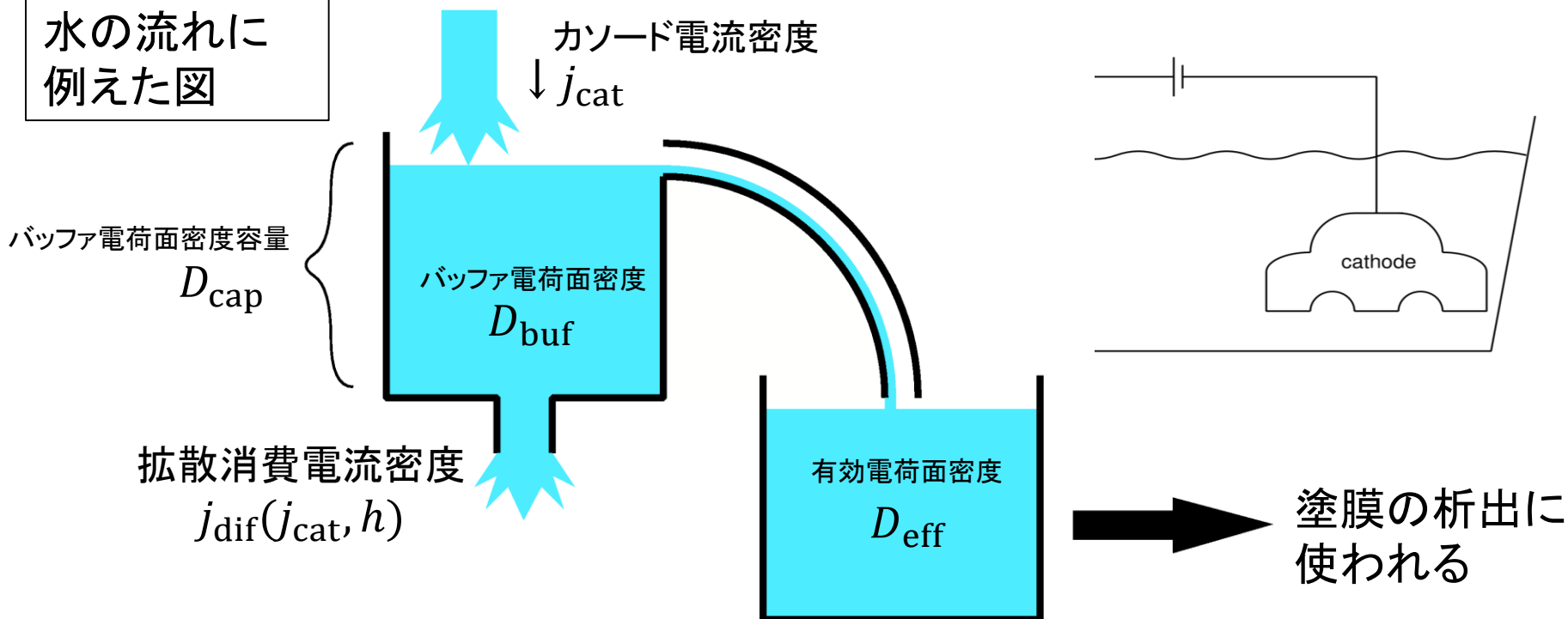


- ④ 塗料粒子の多くはカソード面に付着して塗膜となる.
- ⑤ 塗料粒子の一部は付着せずに拡散し、再溶解する.

以上を考慮して塗膜析出モデルを構築する

提案：塗膜析出モデル

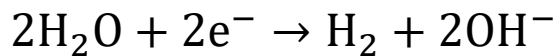
電流を
水の流りに
例えた図



提案した塗膜析出モデルにおいて
電流から塗膜の析出量を算出する手法を説明する

提案：塗膜析出モデル

電流を
水の流りに
例えた図



カソード電流密度

$\downarrow j_{\text{cat}}$

バッファ電荷面密度容量

D_{cap}

バッファ電荷面密度

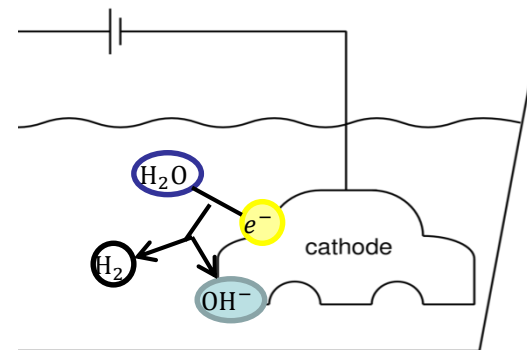
D_{buf}

拡散消費電流密度

$j_{\text{dif}}(j_{\text{cat}}, h)$

有効電荷面密度

D_{eff}



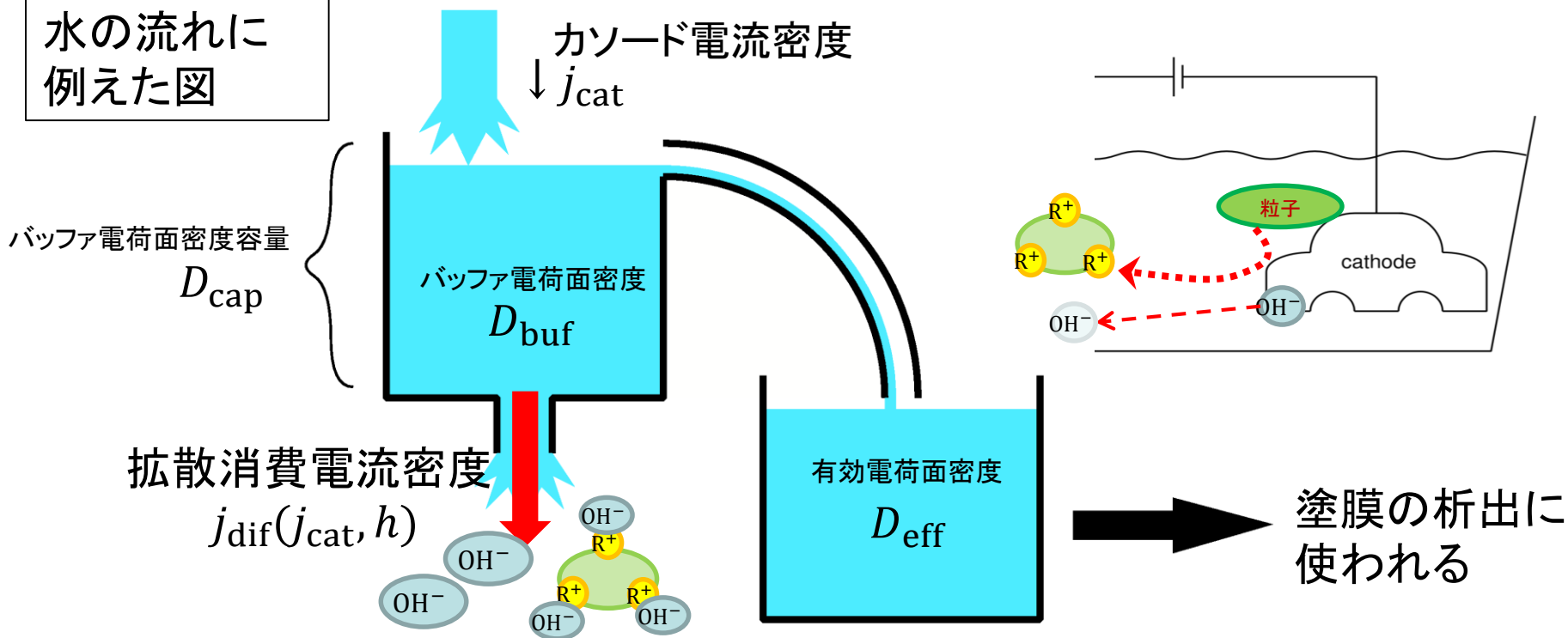
塗膜の析出に
使われる

まず電流が流れると最初のタンクに水が溜まる
タンクはカソード境界層



提案：塗膜析出モデル

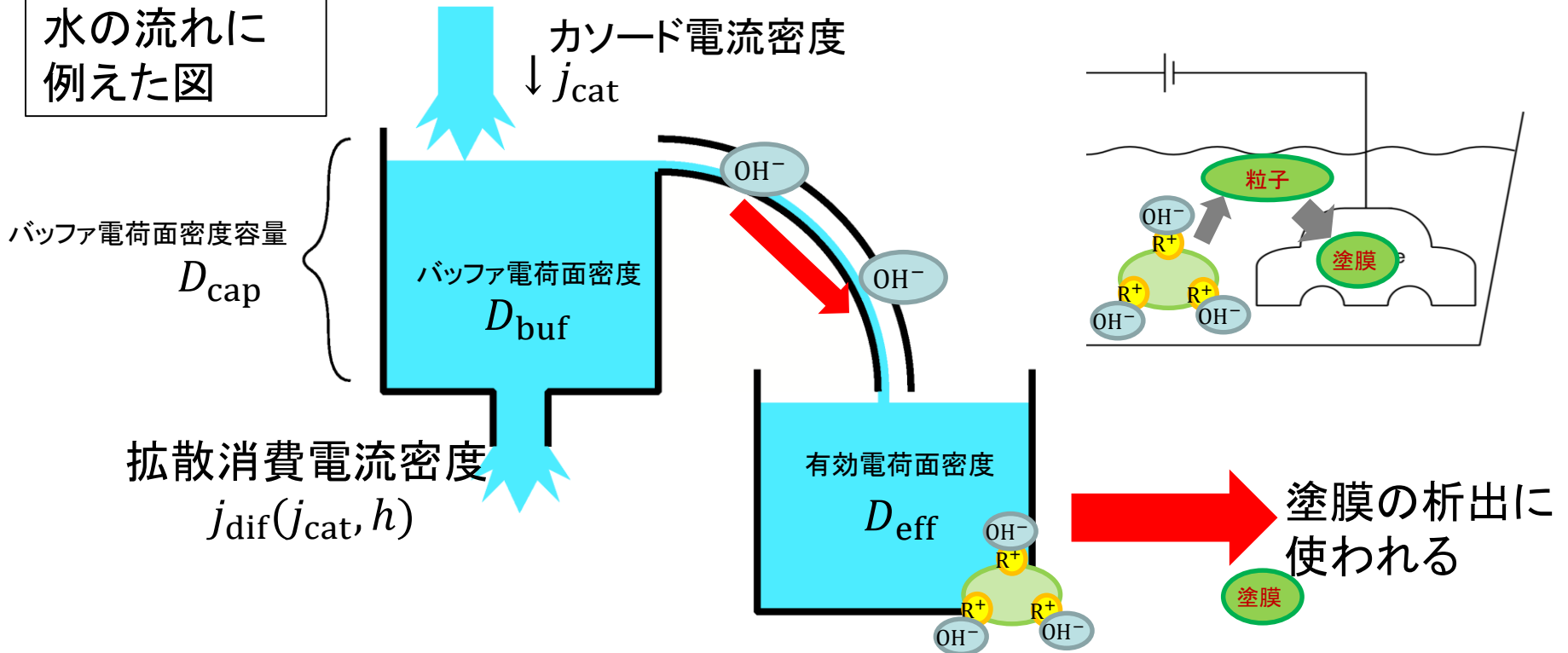
電流を
水の流りに
例えた図



タンクの底には穴が開いていて、水が漏れていく
 OH^- ・塗料粒子の拡散にあたる

提案：塗膜析出モデル

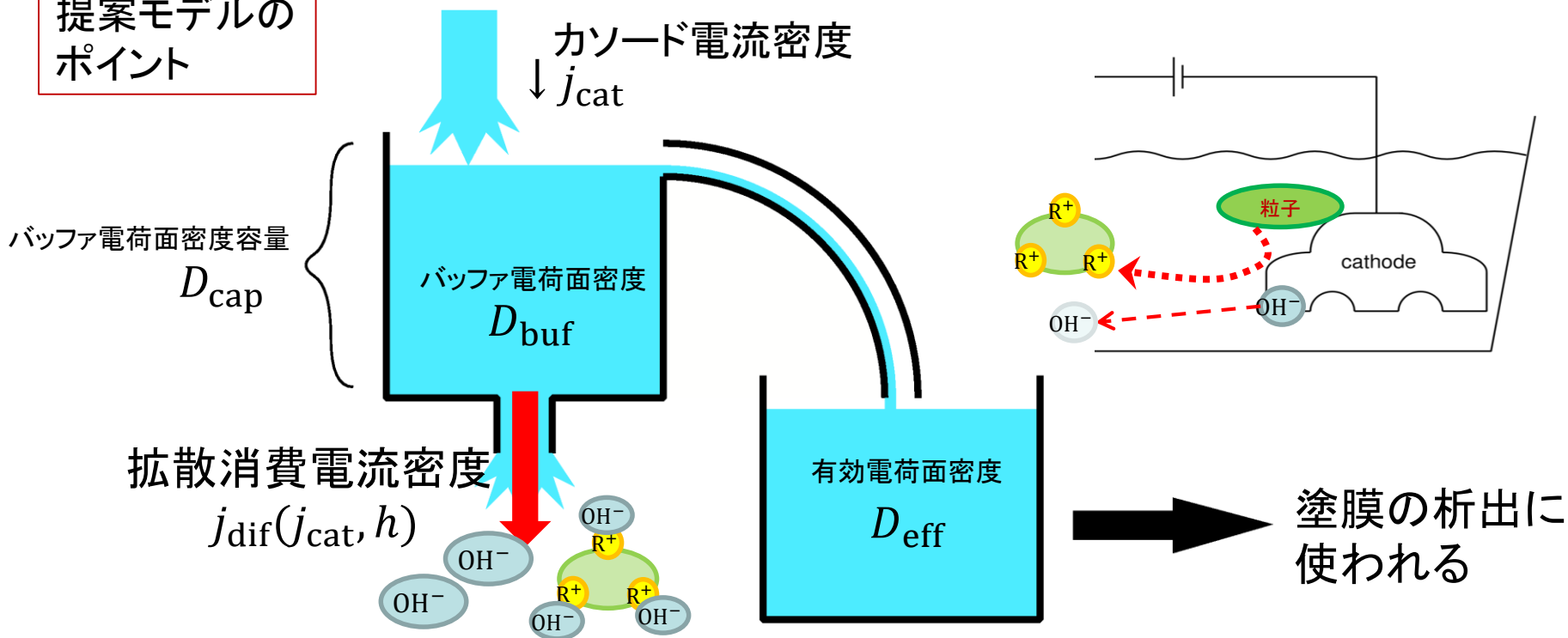
電流を
水の流りに
例えた図



タンクが満水になると水が溢れる
タンクを溢れた水は塗膜の析出に使われる

提案：塗膜析出モデル

提案モデルの
ポイント



タンクの漏れ = 塗料の析出に使われなかった電流

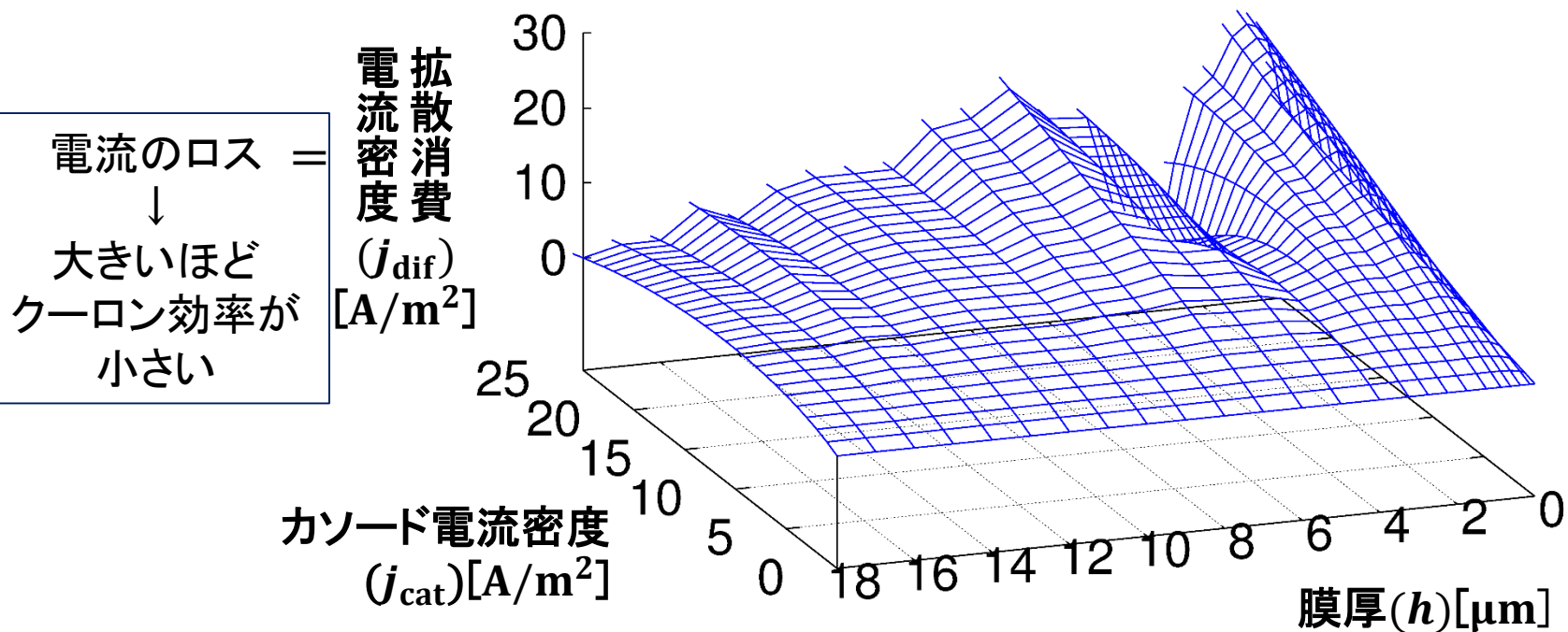
拡散消費電流密度 : $j_{dif}(j_{cat}, h) = j_{cat} - d_1(h)j_{cat}^{d_2(h)}$

膜厚 h に対応するパラメータ d_1 , d_2 を与えたカソード電流密度 j_{cat} の関数



提案：塗膜析出モデル パラメータ同定

拡散消費電流密度： $j_{dif}(j_{cat}, h) = j_{cat} - d_1(h)j_{cat}^{d_2(h)}$
一枚板電着実験のデータとフィッティングし、パラメータを同定した



- 膜厚が大きいほど拡散消費電流密度が小さい
= 膜厚が大きいほどクーロン効率が大きい

提案：塗膜抵抗モデル

カソード電流密度 j_{cat} を膜厚 h に対応する
パラメータ p_1, p_2 を与えた塗膜の電圧降下 $\Delta\phi_{\text{fil}}$ の関数で表す

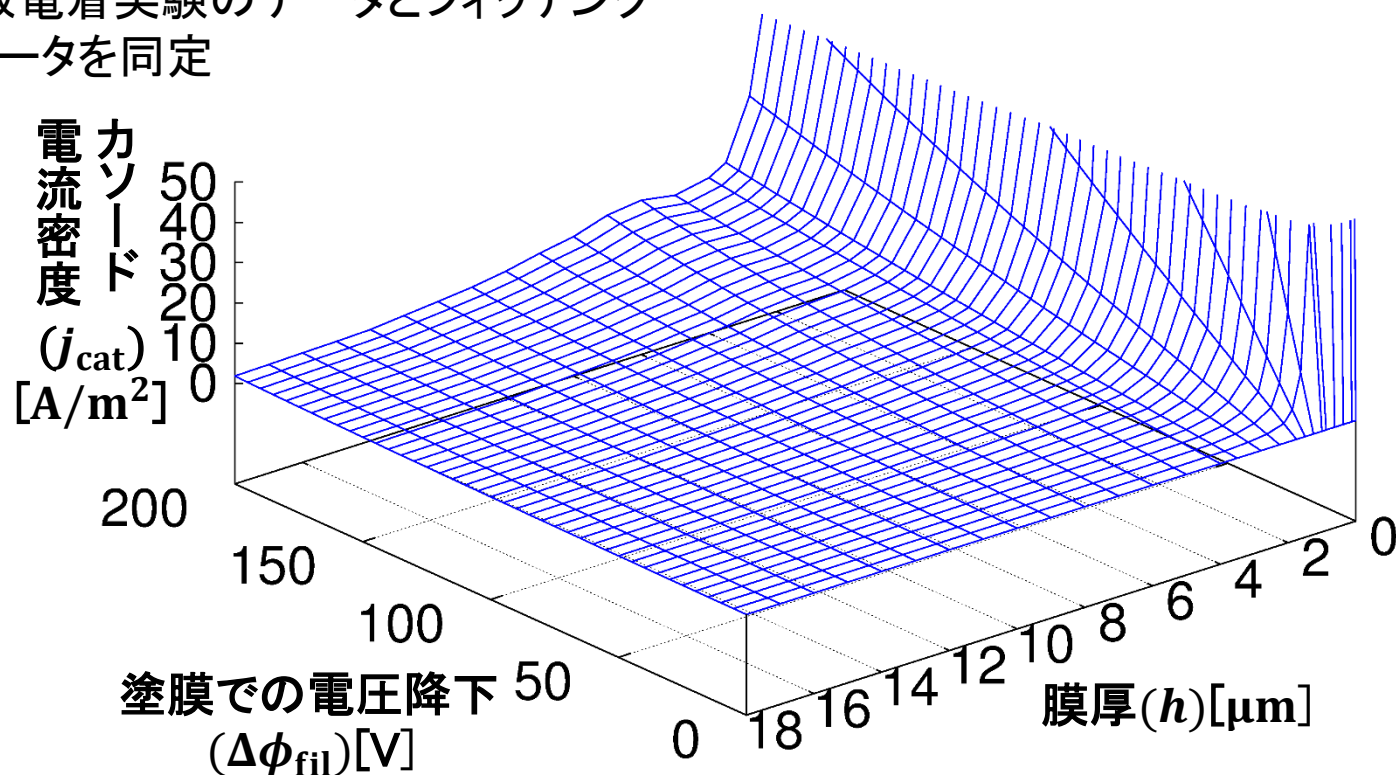
$$j_{\text{cat}}(\Delta\phi_{\text{fil}}, h) \\ = p_1(h) \{ \exp(p_2(h)\Delta\phi_{\text{fil}}) - \exp(-p_2(h)\Delta\phi_{\text{fil}}) \}.$$

- 分極曲線を表す代表的な式（バトラー・ボルマー式）
を基に提案した



提案：塗膜抵抗モデル

一枚板電着実験のデータとフィッティング
パラメータを同定

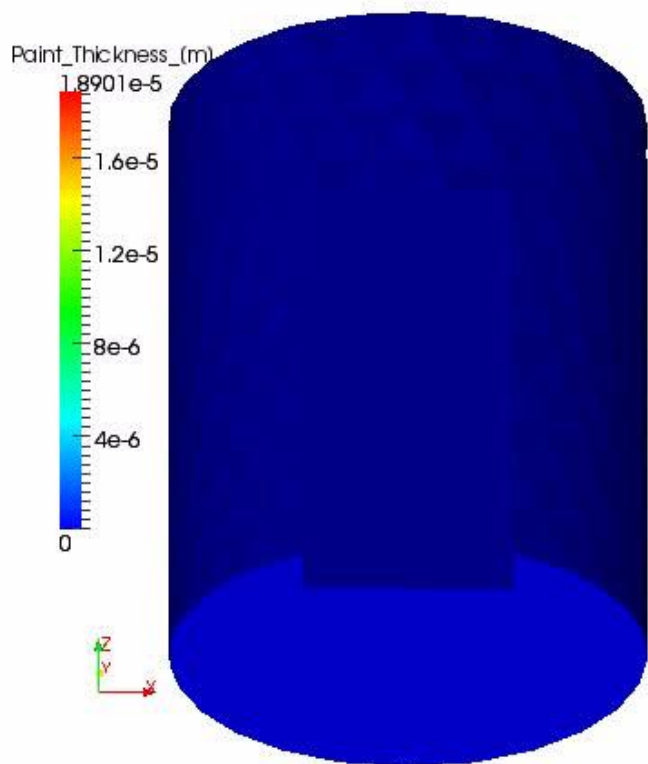


- 膜厚が小さい領域における電流の急激な変化を表現できている

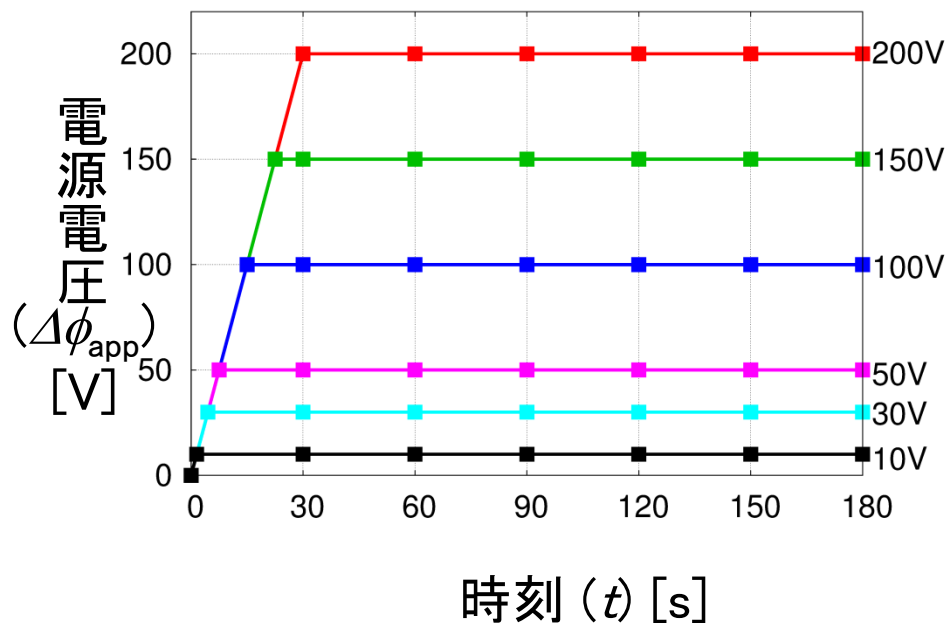
検証例題

提案モデル検証 一枚板電着解析

解析例(膜厚)

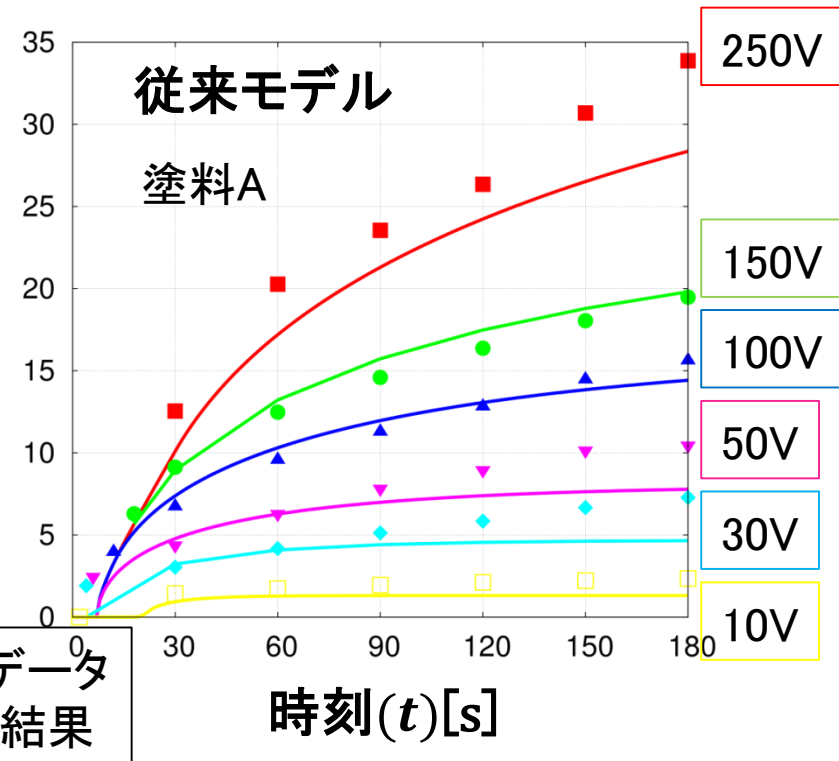
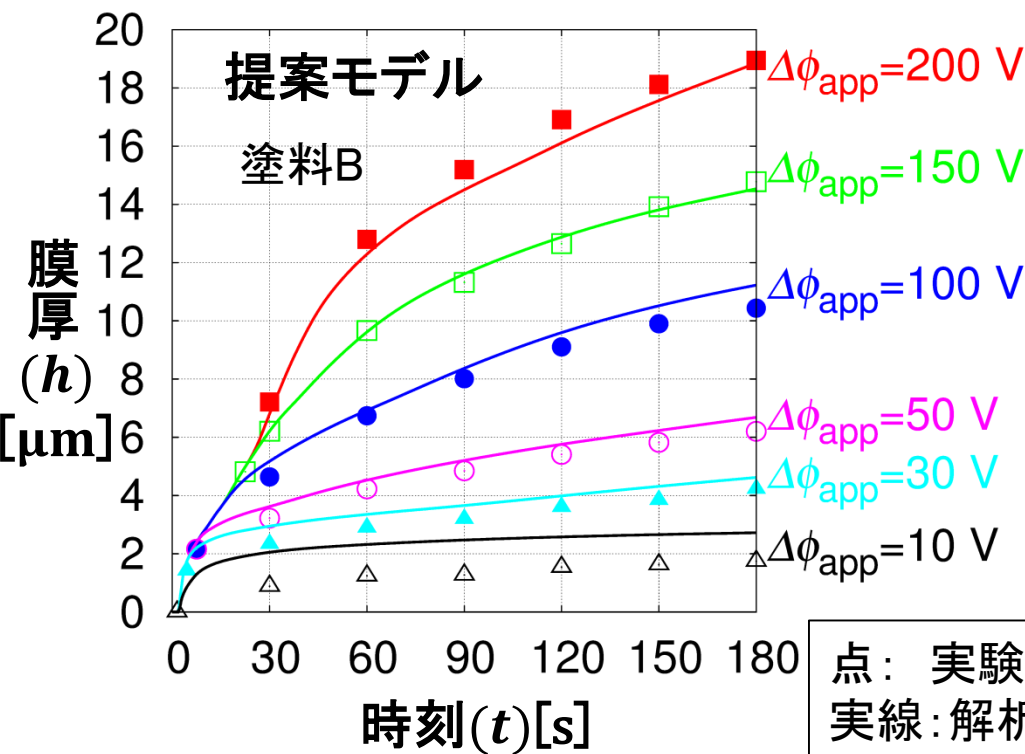


設定した入力電圧の時刻歴



提案した各モデルを有限要素法のシミュレータに組み込み
実験で行った一枚板電着を解析

一枚板電着解析結果 膜厚時刻歴



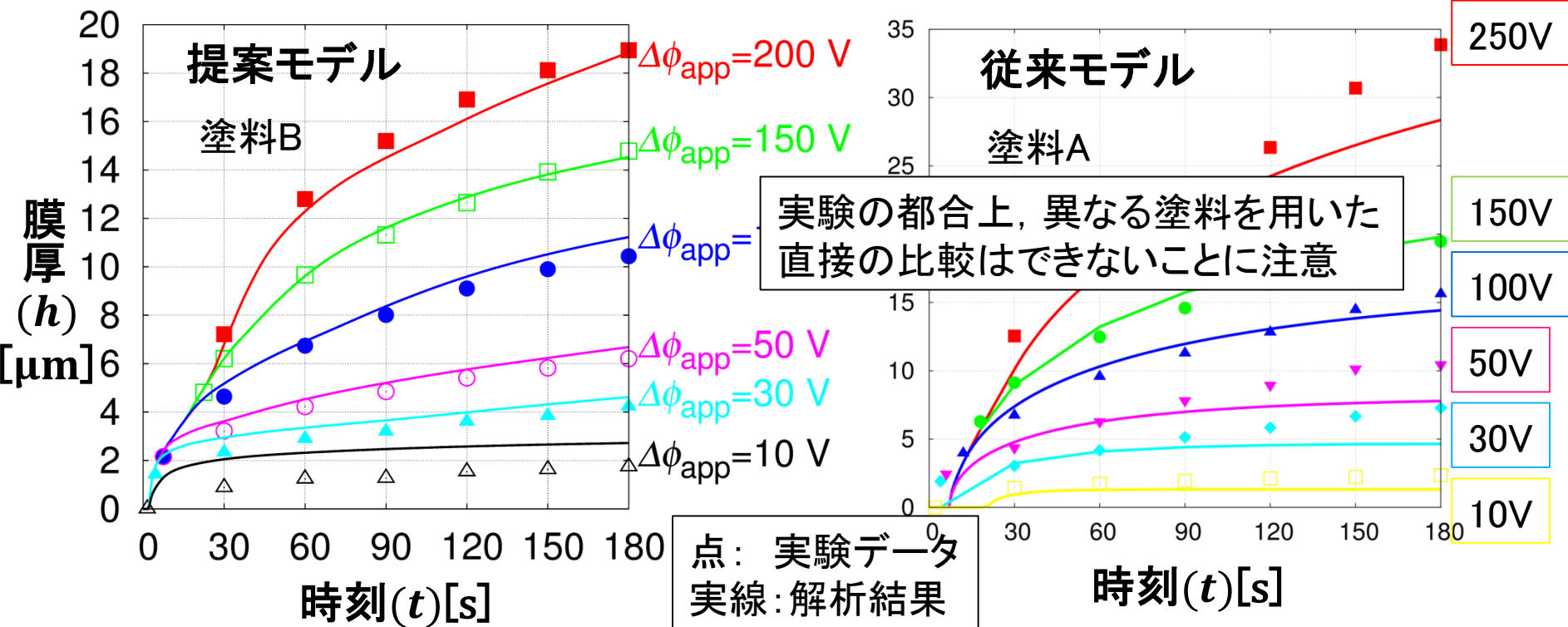
膜厚誤差のRMS=0.75μm

膜厚誤差のRMS=1.74μm

■ 全体に精度が向上していることが確認できた

- $\Delta\phi_{app} \geq 150\text{V}$ については実験結果をよく再現できた
- $\Delta\phi_{app} = 10\text{V}$ は特に初期析出量の精度が不十分

一枚板電着解析結果 膜厚時刻歴



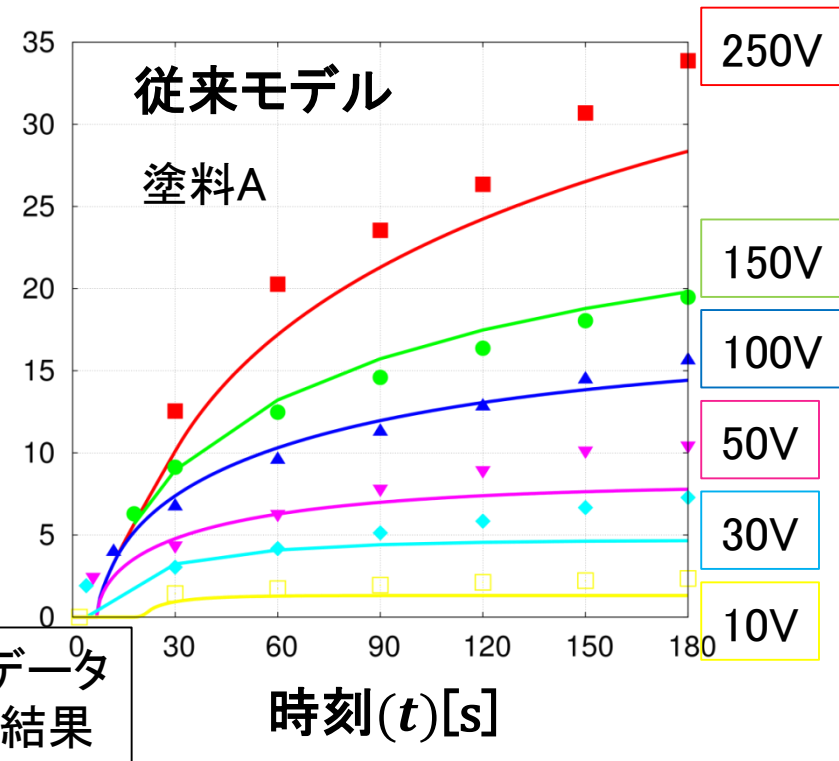
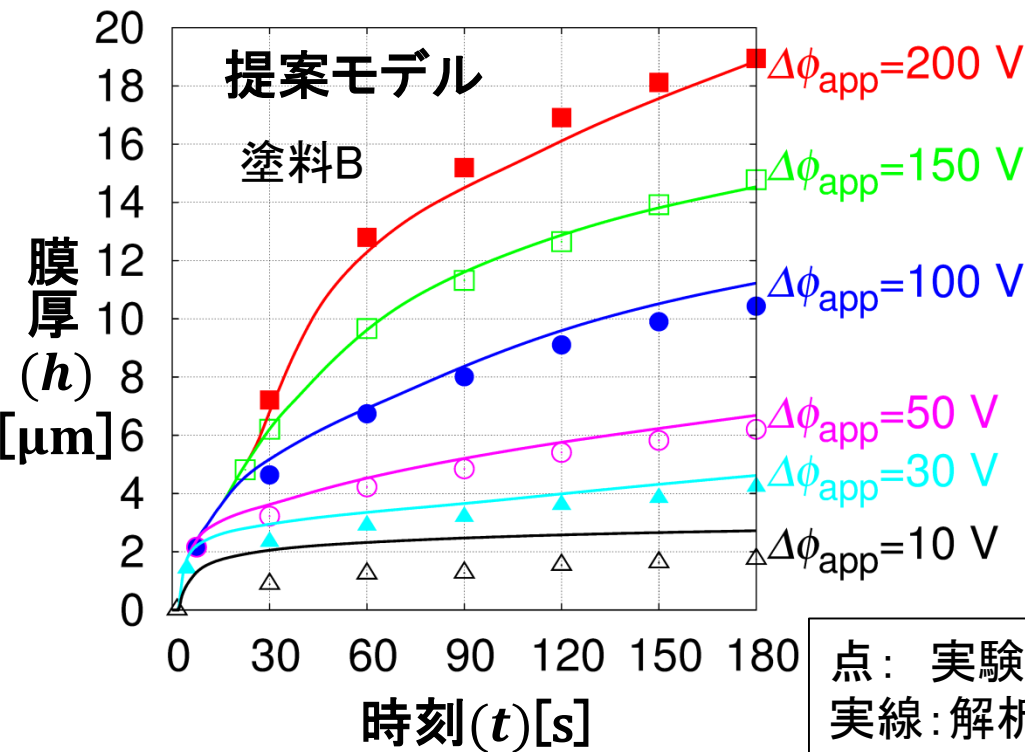
膜厚誤差のRMS=0.75 μm

膜厚誤差のRMS=1.74 μm

■ 全体に精度が向上していることが確認できた

- $\Delta\phi_{app} \geq 150\text{V}$ については実験結果をよく再現できた
- $\Delta\phi_{app} = 10\text{V}$ は特に初期析出量の精度が不十分

一枚板電着解析結果 膜厚時刻歴



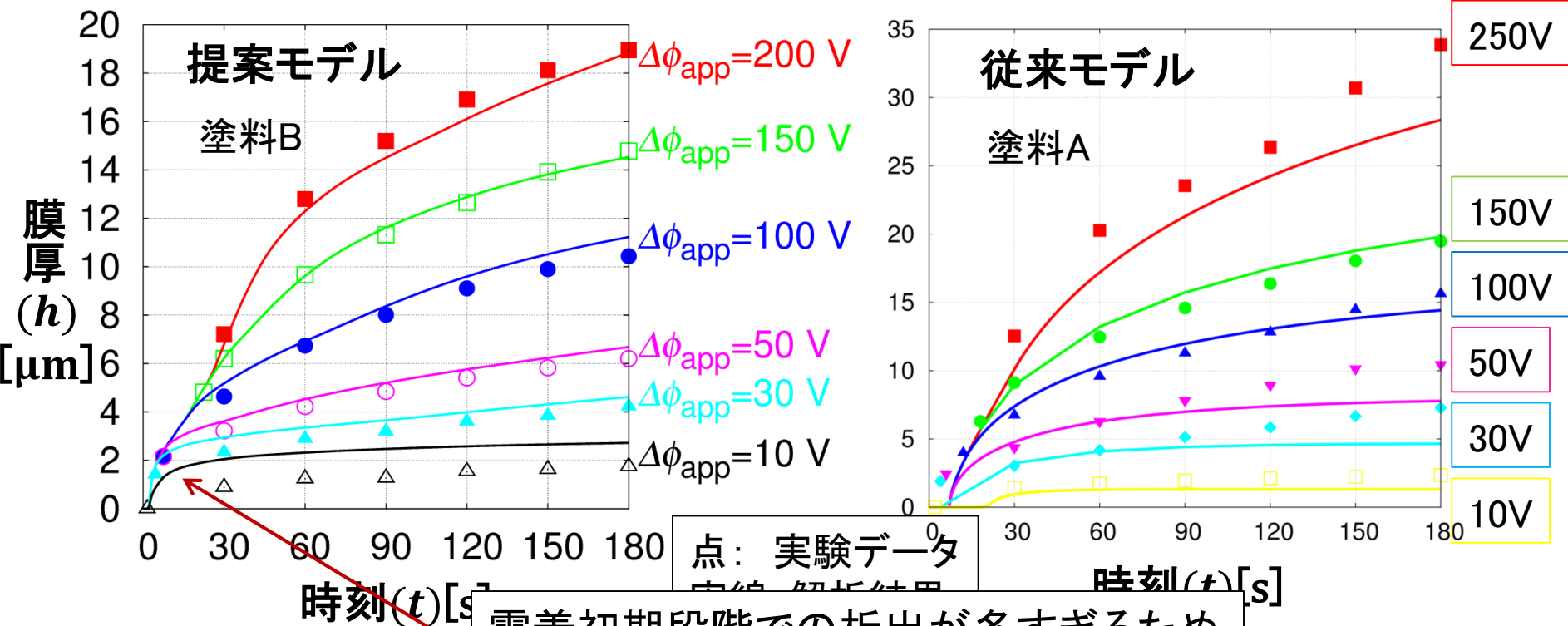
膜厚誤差のRMS=0.75 μm

膜厚誤差のRMS=1.74 μm

■ 全体に精度が向上していることが確認できた

- $\Delta\phi_{app} \geq 30\text{V}$ については実験結果をよく再現できた
- $\Delta\phi_{app} = 10\text{V}$ は特に初期析出量の精度が不十分

一枚板電着解析結果 膜厚時刻歴

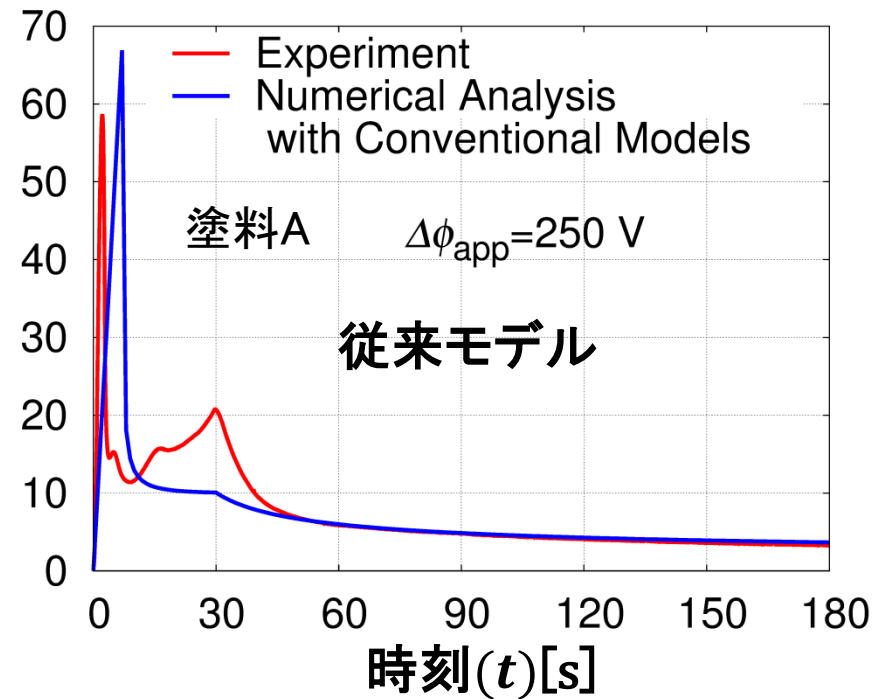
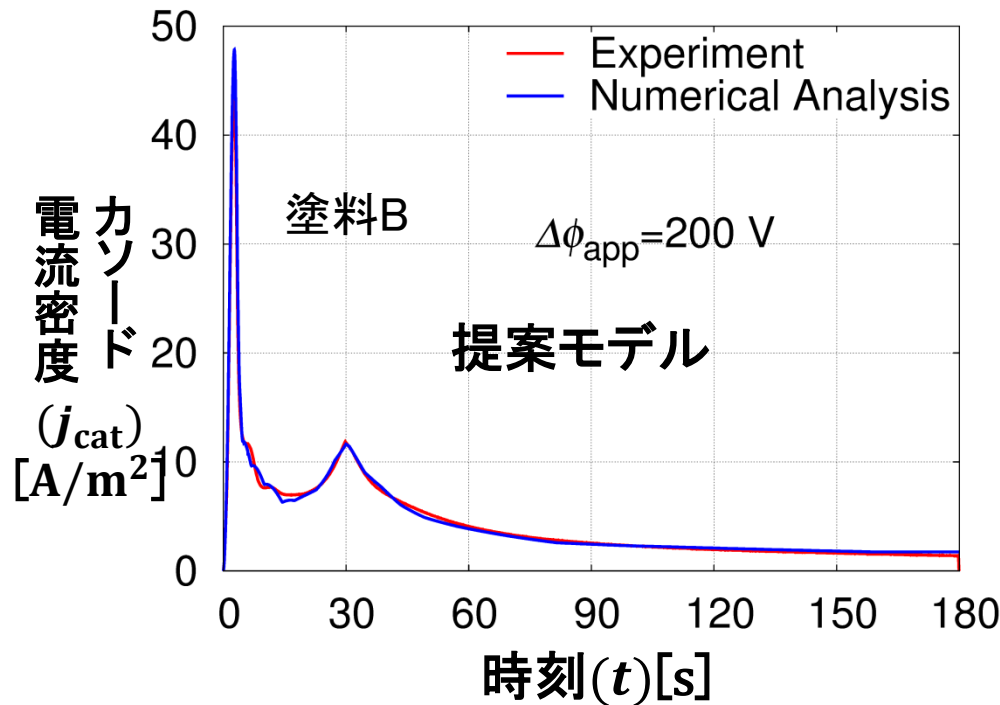


膜厚誤差のRMS = $\sigma = 1.74 \mu\text{m}$

■ 全体に精度が向上していることが確認できた

- $\Delta\phi_{app} \geq 150\text{V}$ については実験結果をよく再現できた
- $\Delta\phi_{app} = 10\text{V}$ は特に初期析出量の精度が不十分

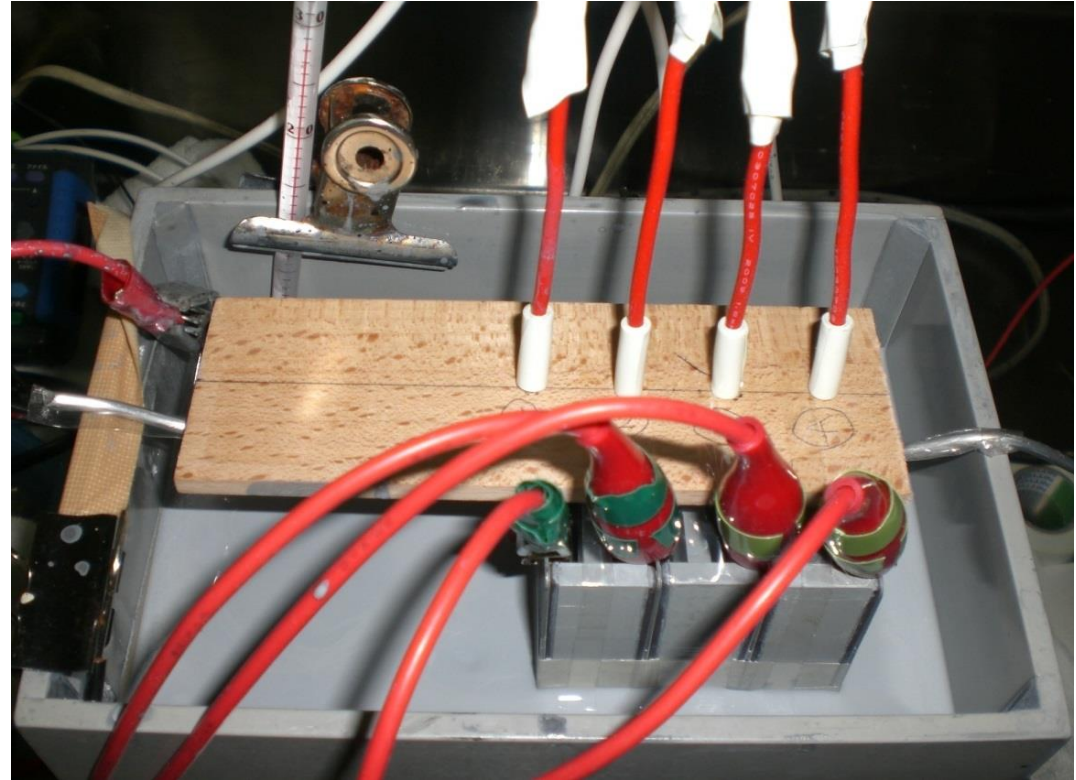
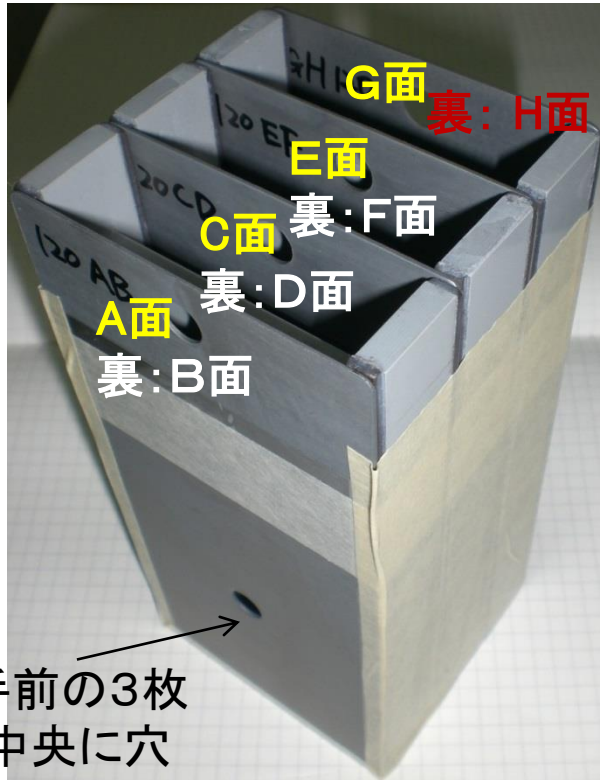
一枚板電着解析結果 電流密度



特徴が顕著に表れる高電圧での電着結果を示す

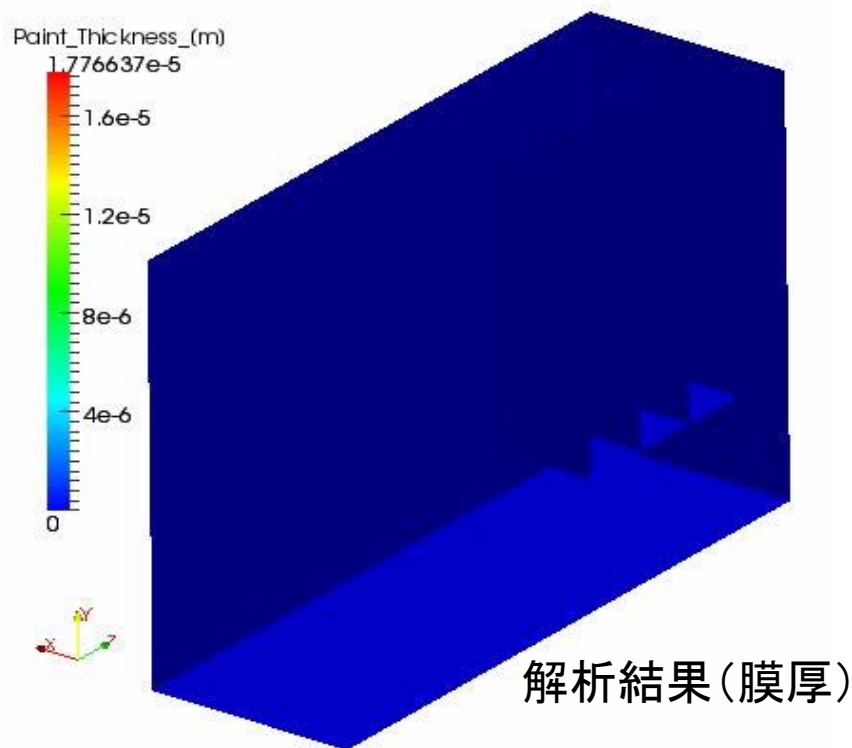
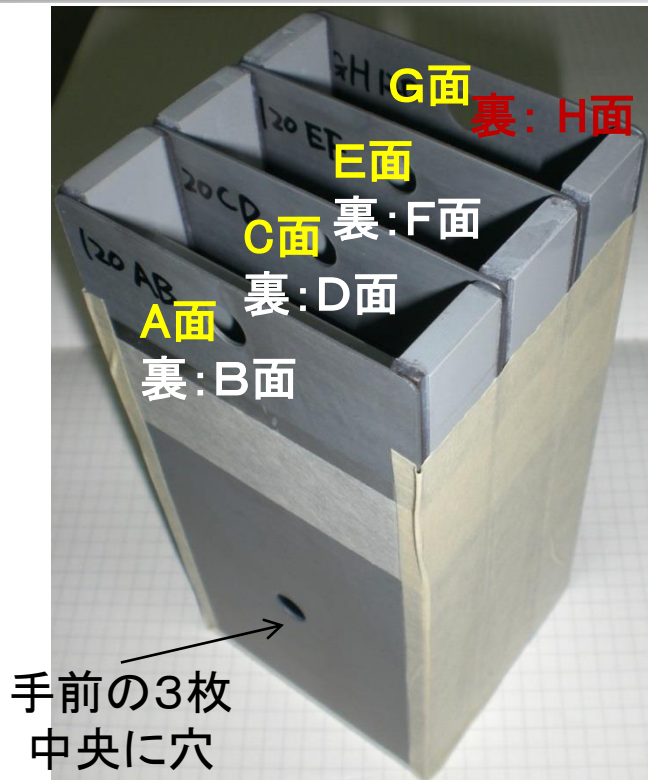
- 従来モデルでは再現できなかった2つ目のピークを再現
- 1つ目のピークの大きさ, 時刻が実験結果と一致

4枚BOX法の電着実験および解析



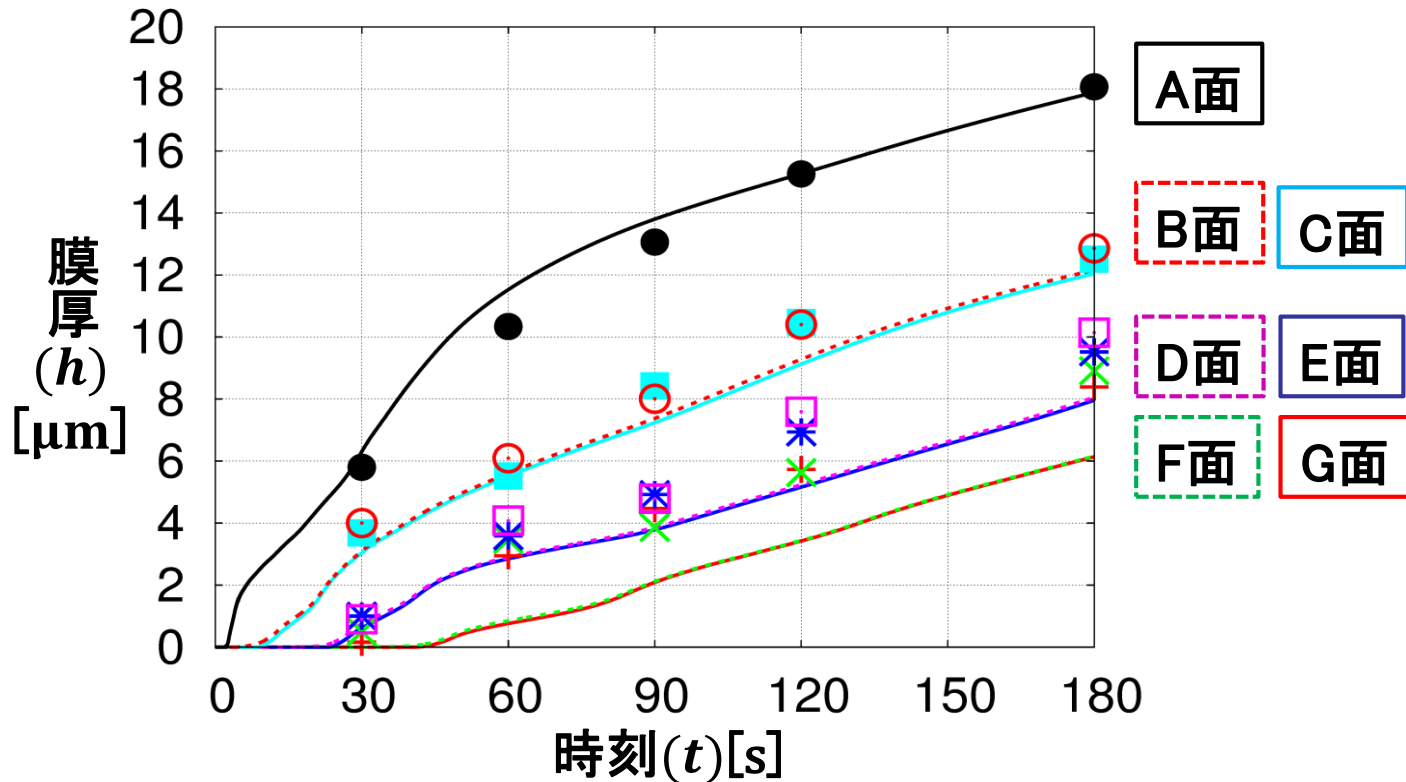
- 袋状部材を模擬した電着試験
- A面が一番析出しやすく, F,G面が最も析出しづらい
- 今回H面は絶縁
- 設定電圧200V180sの標準的な電圧時刻歴を与えた

複雑形状(4枚BOX)の実験および解析



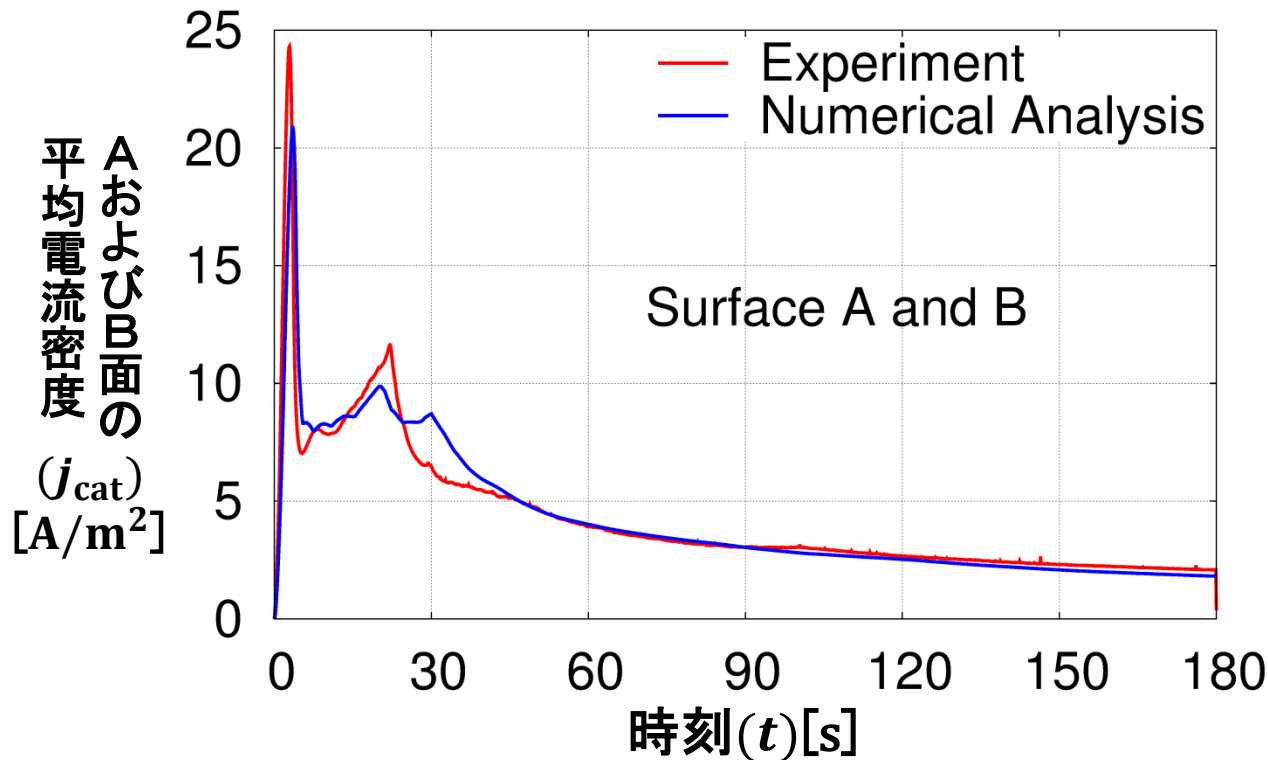
- 袋状部材を模擬した電着試験
- A面が一番析出しやすく, F,G面が最も析出しづらい
- 今回H面は絶縁
- 設定電圧200V180sの標準的な電圧時刻歴を与えた

4枚BOX電着解析結果 膜厚時刻歴



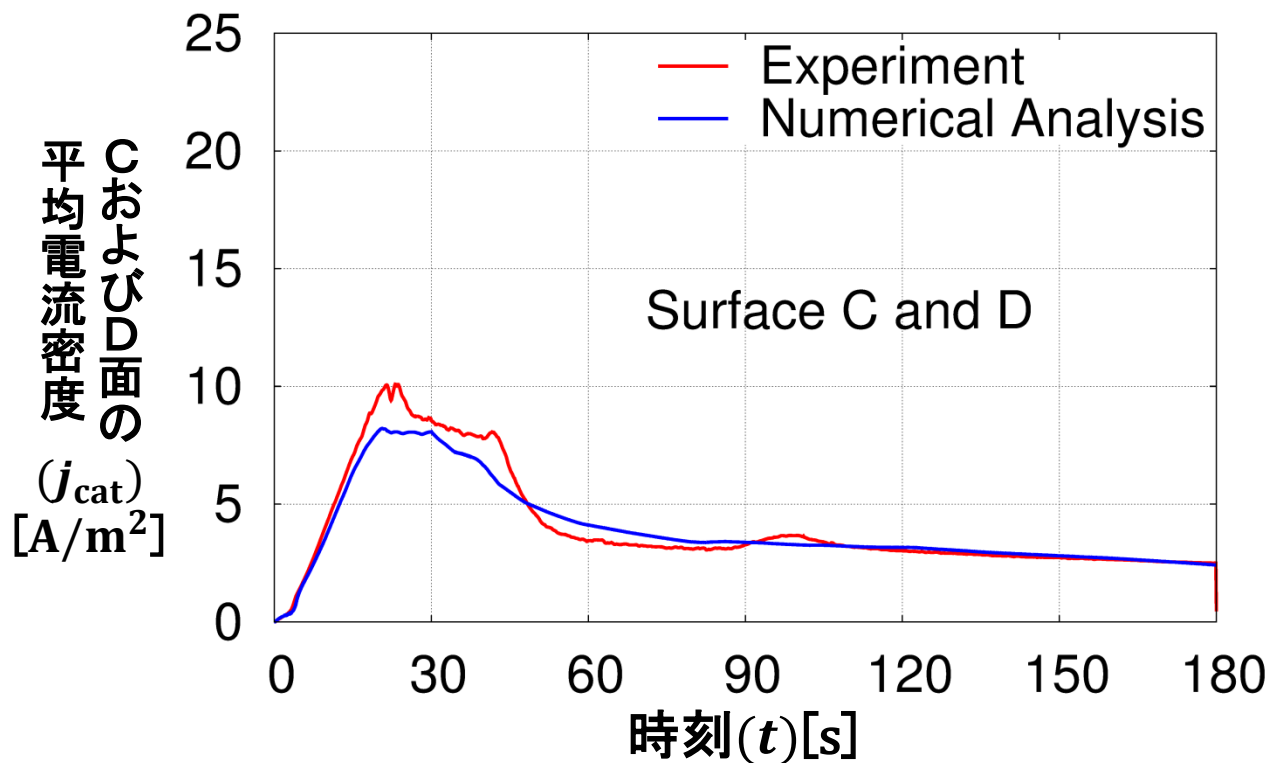
- 外側の面は実験結果とほぼ一致
- G面(一番奥)で最大3μmほどの誤差に収まった
 - 従来と比べ格段に精度が向上

4枚BOX電着解析結果 電流



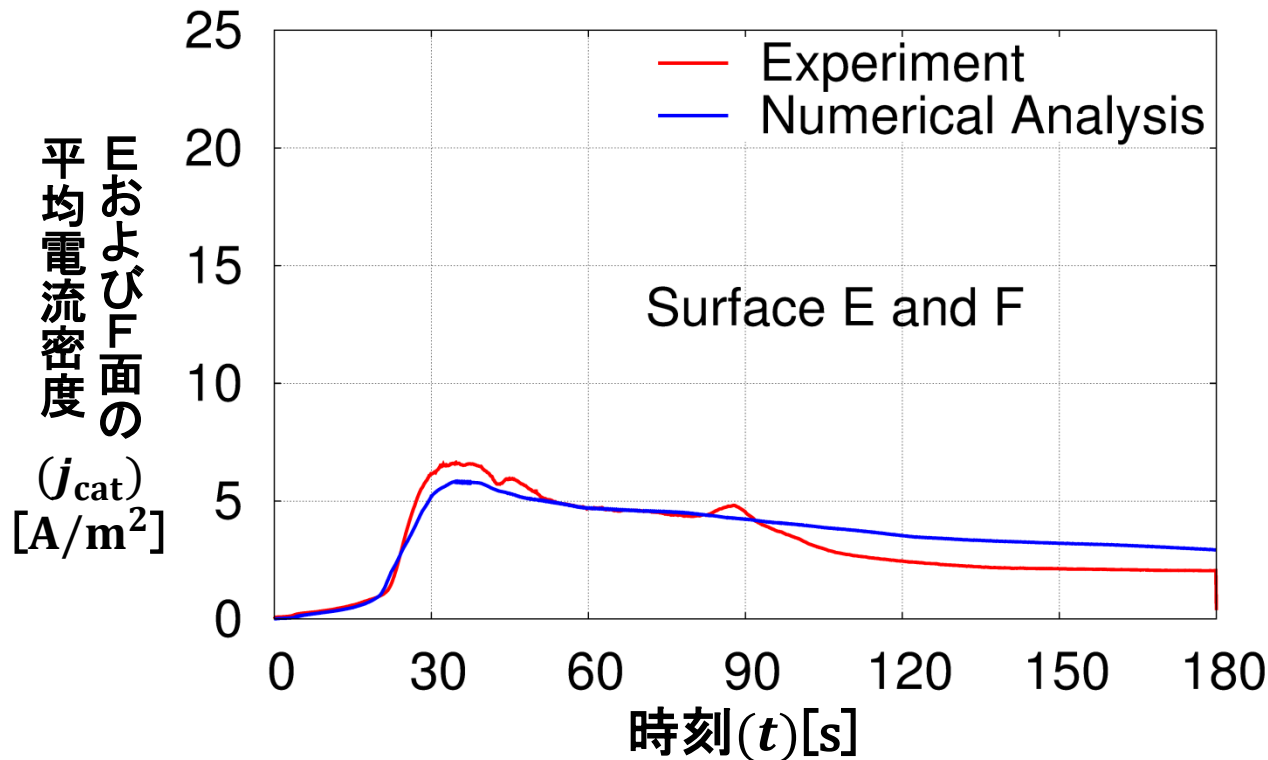
- 4枚BOXの外側の面では
電流密度時刻歴を精度よく再現できた

4枚BOX電着解析結果 電流



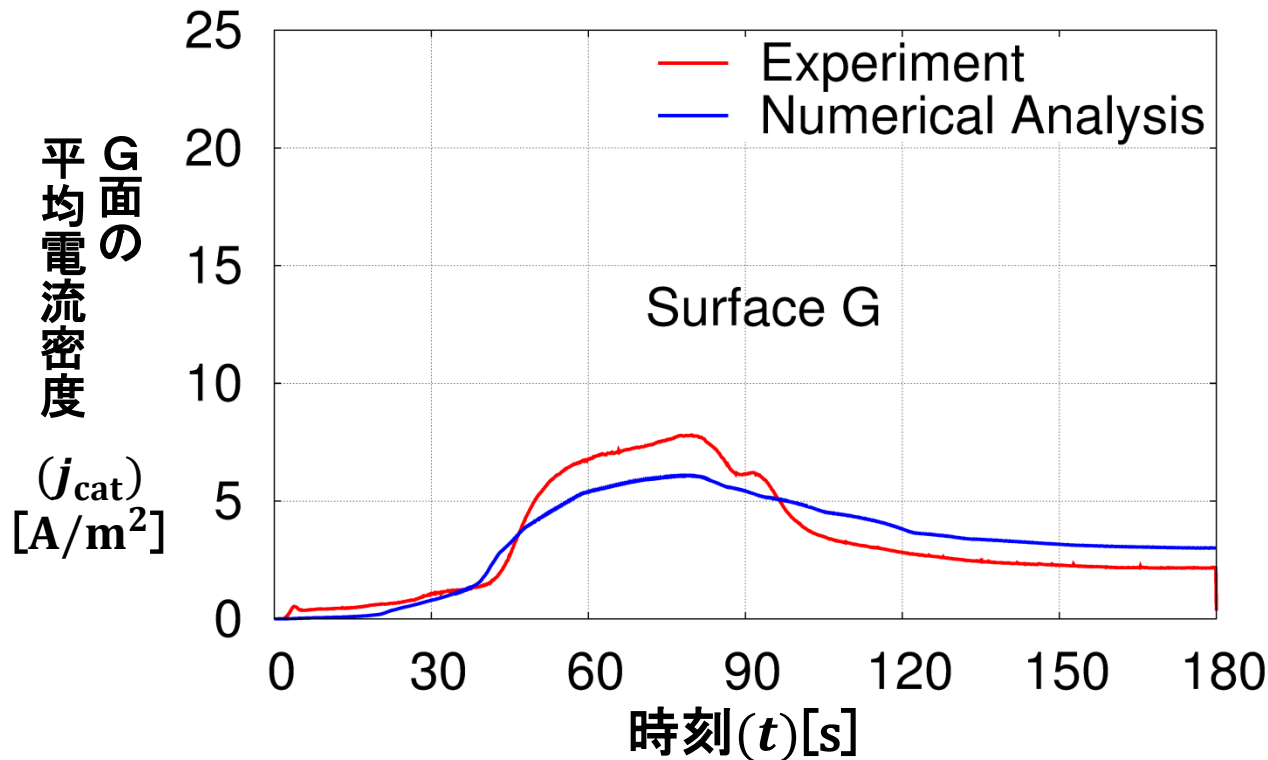
- 内側の面でも同様に
電流密度時刻歴を精度よく再現できた

4枚BOX電着解析結果 電流



- 内側の面でも同様に
電流密度時刻歴を精度よく再現できた

4枚BOX電着解析結果 電流



- 最奥の面では誤差が顕著に表れやすい
- ピークの時刻など特徴が再現できている

まとめ

- 一枚板電着実験により塗膜析出および塗膜抵抗における特性を確認
- 得られた知見を基に塗膜の析出メカニズムを考察し、新たな塗膜析出モデルおよび塗膜抵抗モデルを提案
 - 塗膜析出モデル: 拡散消費電流密度を膜厚と電流密度の関数
 - 塗膜抵抗モデル: 電流を膜厚と電圧の関数
- 各モデルパラメータを同定
- 有限要素法に提案モデルを組みこみ、提案手法の有効性を確認
 - 膜厚の予測精度の向上および、電流のピークを再現
 - 4枚BOXの内側の面の膜厚精度も改善