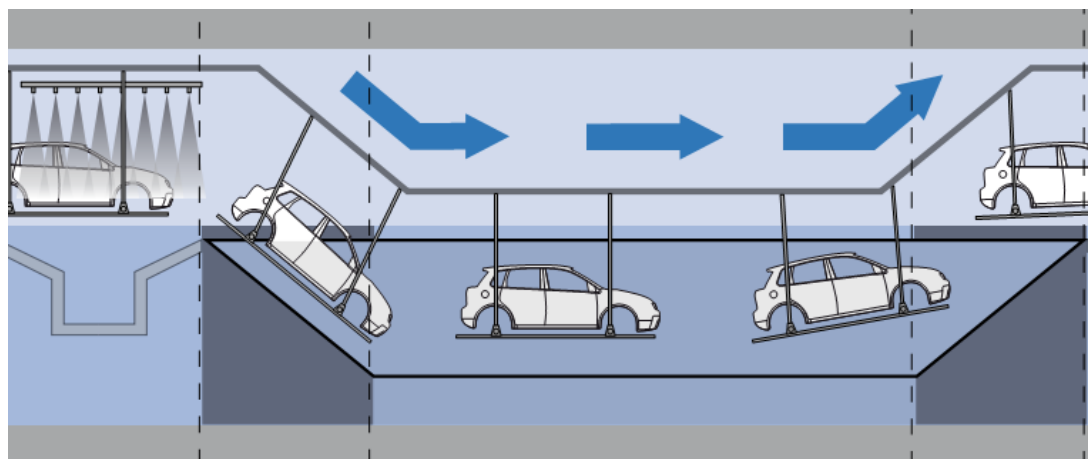
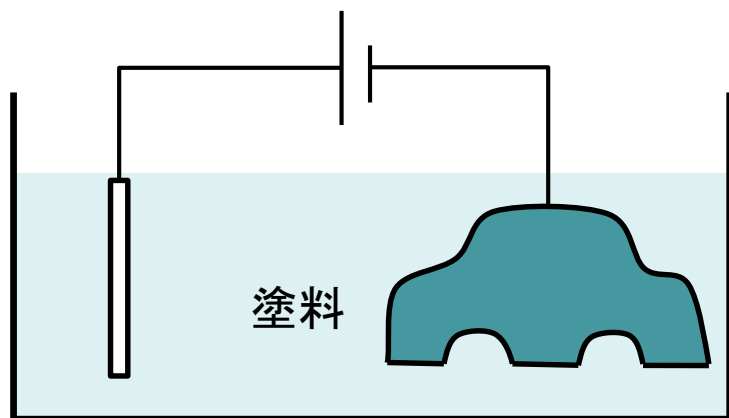


電着塗装シミュレーションにおける 濁りの電気抵抗を考慮した 塗膜抵抗モデル

志村 彩夏, 大西 有希, 天谷 賢治
東京工業大学



研究背景



(<http://www.rodip.com.br/>より)

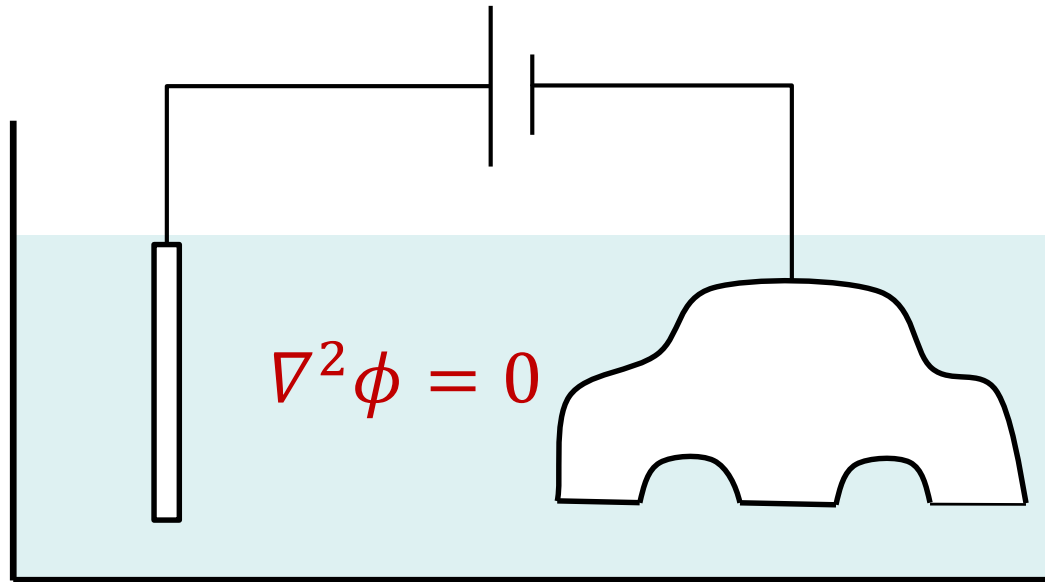
アノード
電極

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。
- 実車試験での最適化に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



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

主要な数理モデル

- 電着塗装シミュレーションにおいて、解析の主要な数理モデルは次の2つ。

塗膜抵抗モデル

塗膜の電気抵抗を決定

塗膜析出モデル

塗膜の析出速度を決定

- 従来法（本発表会にて2014年に発表）では、

電圧降下： 膜厚およびカソード電流密度の関数とモデル化していた。

析出速度： 膜厚およびカソード電流密度の関数

低い電圧・電流での予測精度が未だ不十分。

そこで、本研究では塗膜析出前の「濁り」が持つ抵抗および析出効率の「履歴依存性」に着目。（詳細は後述）

研究目的

「**濁り**」を考慮した新たな**塗膜抵抗モデル**
および

「**履歴依存性**」を考慮した新たな**塗膜析出モデル**

を提案し、**電着塗装シミュレーションの高精度化を図る。**

注) **履歴依存性**は予稿投稿後に得られた成果のため、予稿には記載されていません。

本発表の流れ

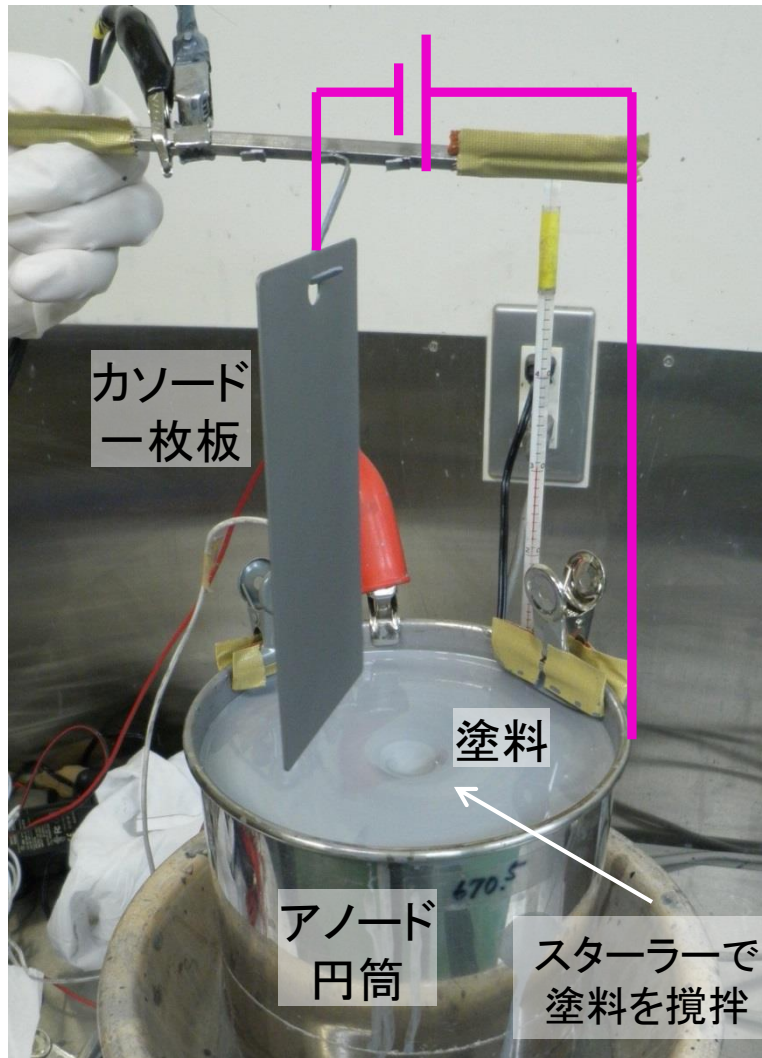
- 実験 ～濁りと履歴依存に関する調査～
- 手法 ～提案する塗膜抵抗および析出モデル～
- 検証
- まとめ



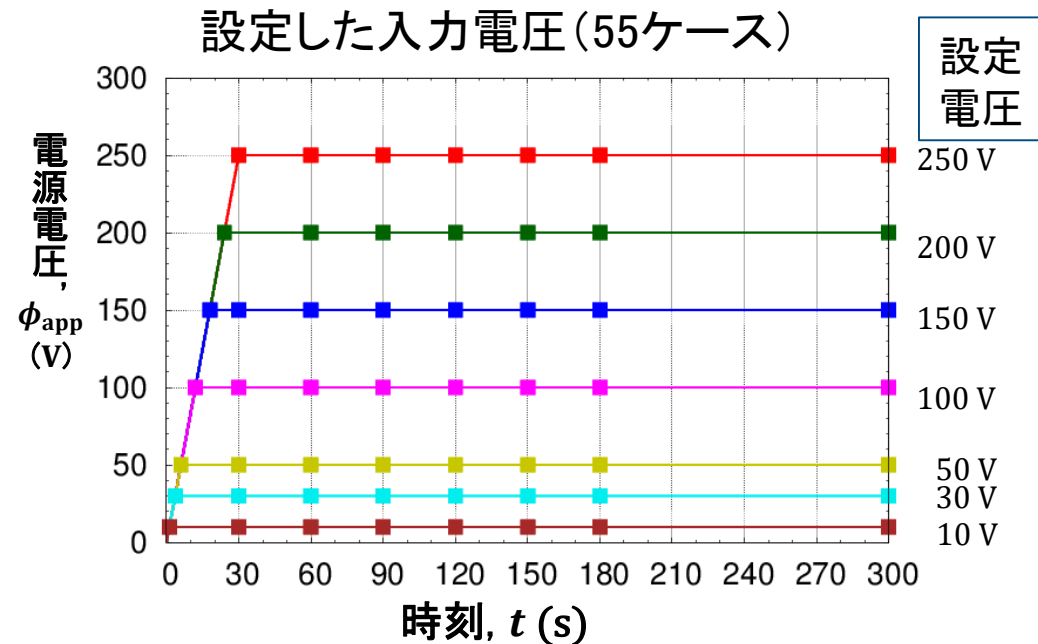
実験

～濁りと履歴依存に関する調査～

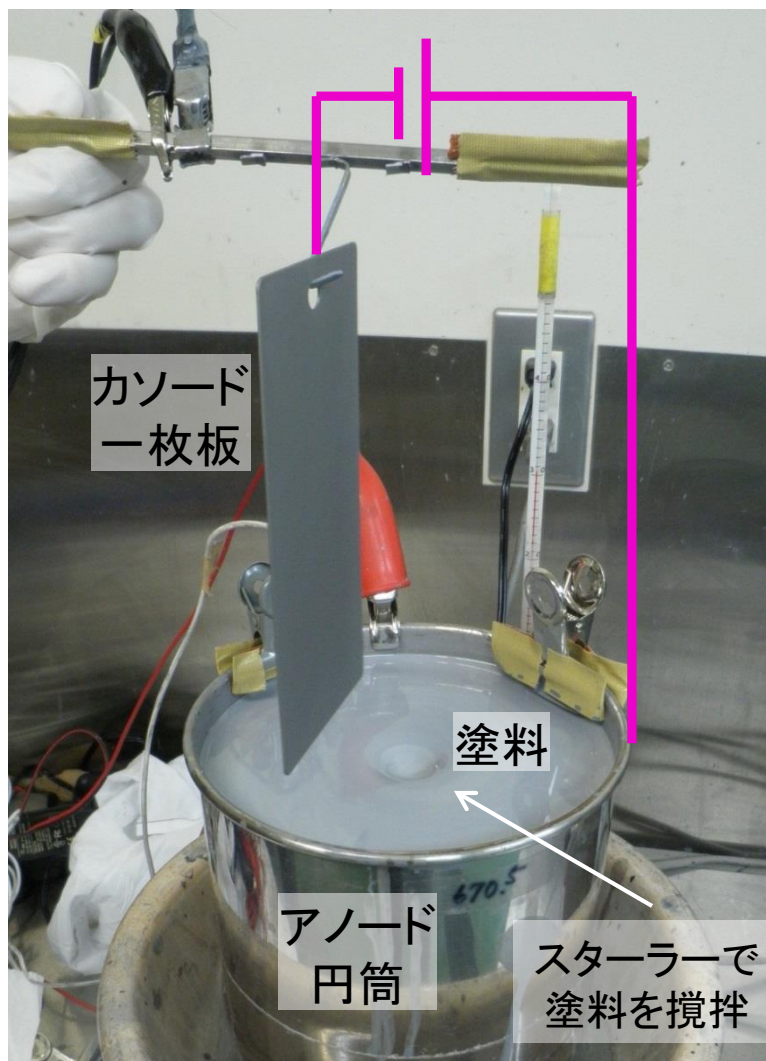
実験1: 定電圧実験



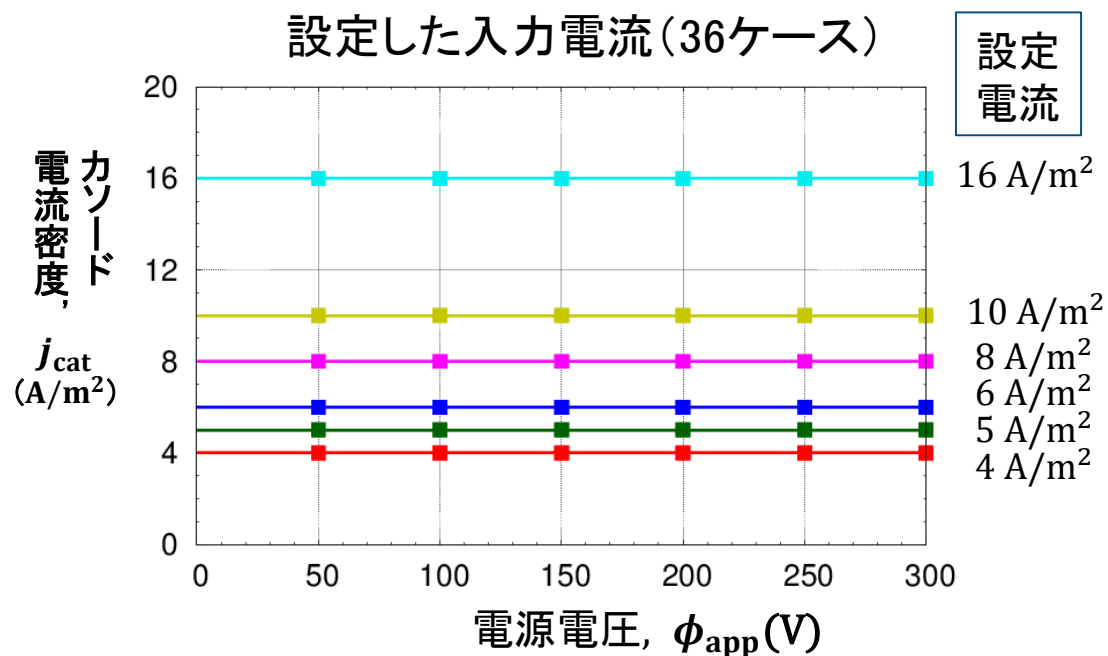
- 鋼板を塗料に全没して電着.
- 電着中の電流, 電源電圧を計測.
- 実験終了時に膜厚を計測.
- 一般的な自動車電着用塗料を使用.
- 電源の電圧が一定となるよう制御.



実験2: 定電流実験

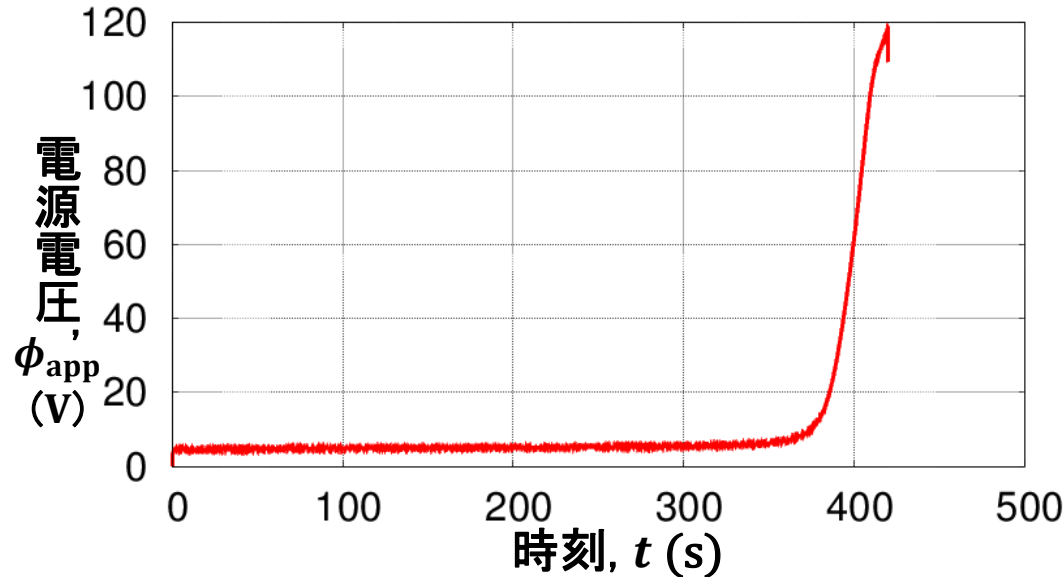


- 鋼板を塗料に全没して電着.
- 電着中の電流, 電源電圧を計測.
- 実験終了時に膜厚を計測.
- 一般的な自動車電着用塗料を使用.
- 電源の電流が一定となるよう制御.



弱い電流での定電流実験結果

カソード
電流密度
 $j_{\text{cat}} = 4 \text{ A/m}^2$



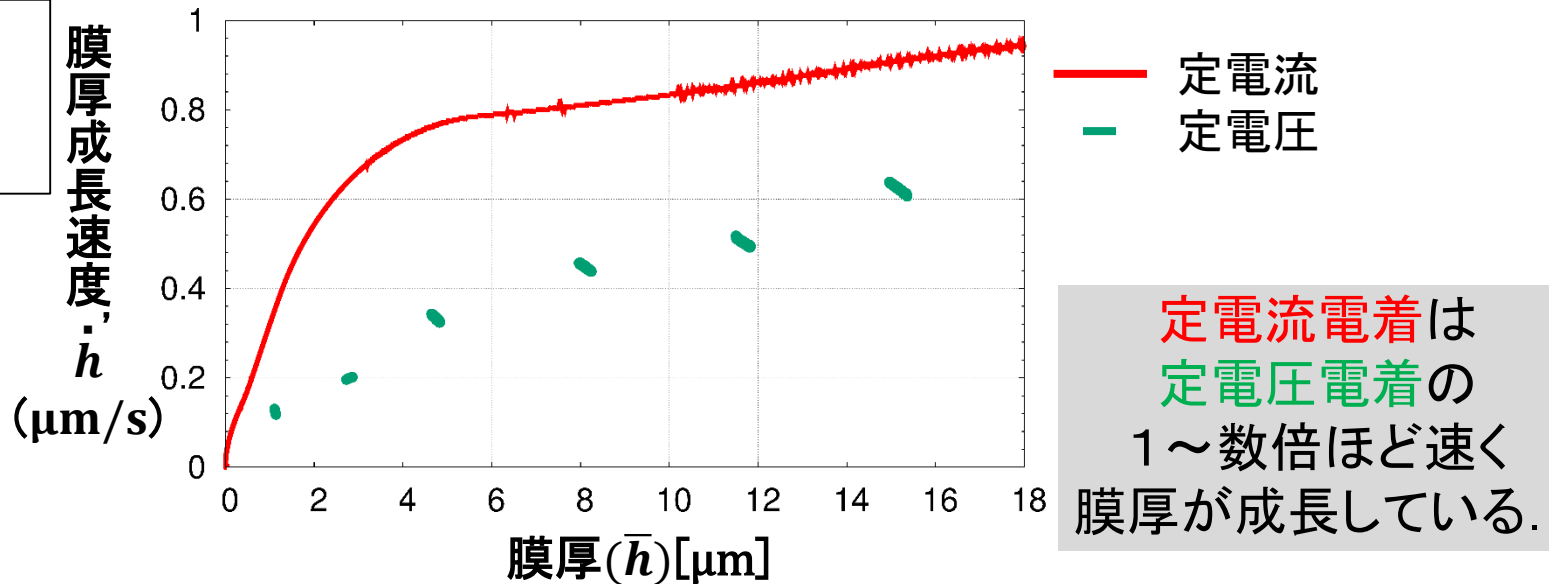
- 長時間電着を続けると電源電圧が上昇した。
∴ 電着終了時点で大きなカソード電圧降下があった。
- 電着終了後の水洗時に塗膜はすべて流れ去った。
∴ 塗料粒子は凝集しただけで鋼板には付着しておらず、「濁り」として鋼板近傍を漂っていた。

➡ 膜厚はゼロだが「濁り」が電気抵抗を持っている。 知見1

濁りを含めた膜厚として仮想膜厚 \bar{h} を導入すれば良さそう。

定電圧／定電流での膜厚成長速度の比較

定電圧および定電流の各条件において、同じ電流密度 j_{cat} の時の膜厚成長速度 \dot{h} を比べる。



同じ電流密度かつ同じ膜厚でも、膜厚成長速度が異なる。
しかし、電流密度と膜厚以外にカソードの状態量は見当たらない。

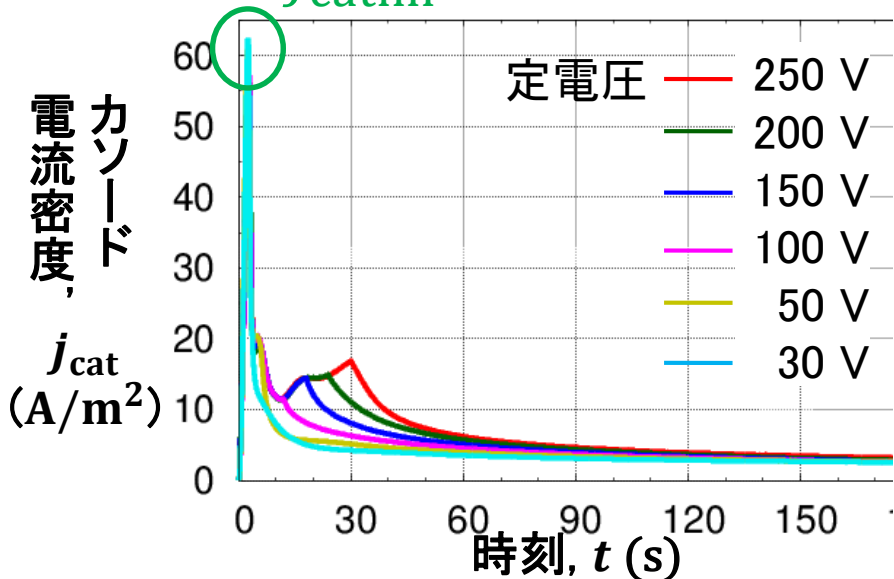
析出効率が何らかの「履歴依存性」を持っている。

知見2

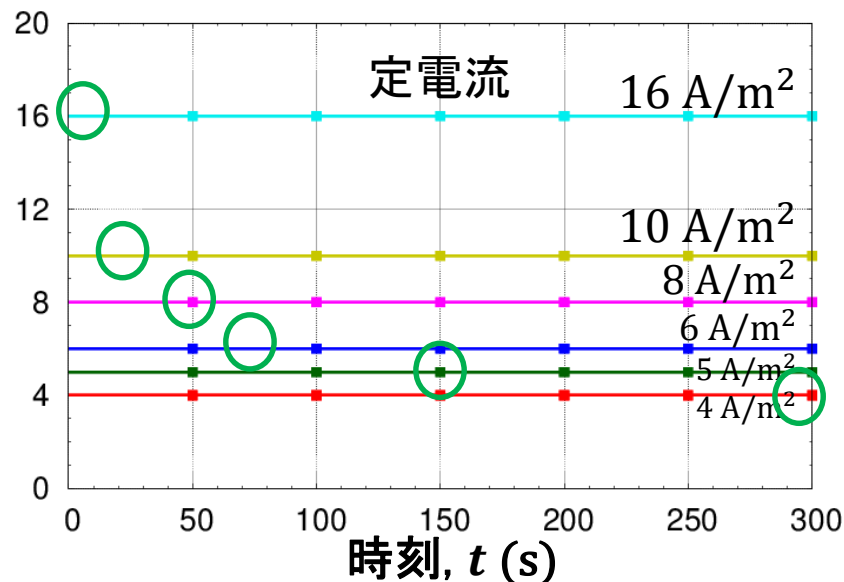
履歴依存性が生じる要因

本研究では析出開始時のカソード電流密度 (j_{catini}) に着目.

($\because j_{catini}$ は塗膜の表面状態 (肌質) を決定づけるから.)



定電圧実験は $j_{catini} =$ 約 $60 A/m^2$ で常に一定. (10 Vを除く)



定電流実験の j_{catini} は各実験の設定値で全て異なる.

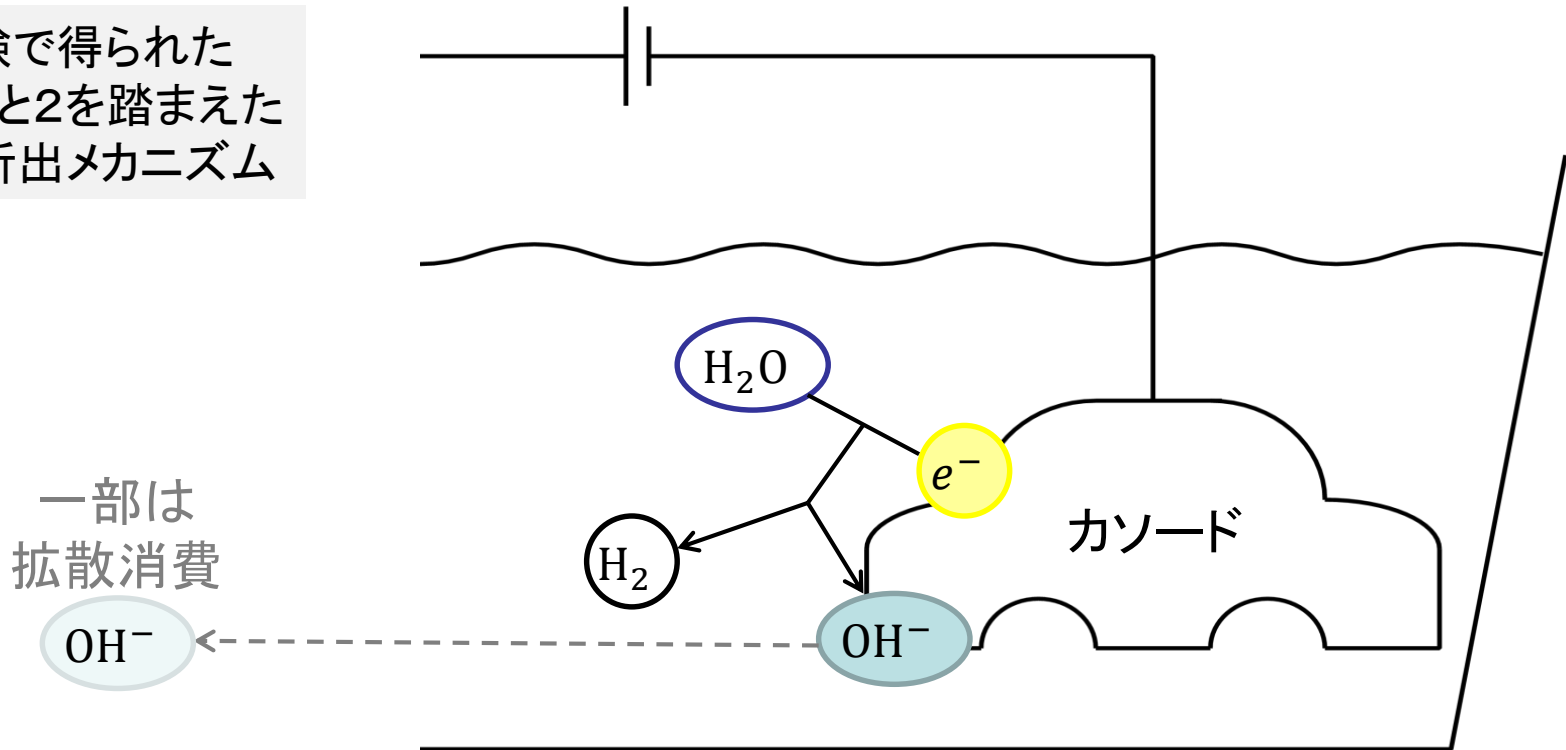
析出開始時の j_{catini} が塗膜の肌質を決定し, その後の析出効率に履歴依存性を与えていると考えれば良さそう.

実際, 塗膜の成長は塗膜の表面ではなく奥で起こるため肌質は塗膜成長により変化しないという実験的事実があり, このモデル化はこの事実と符合している.



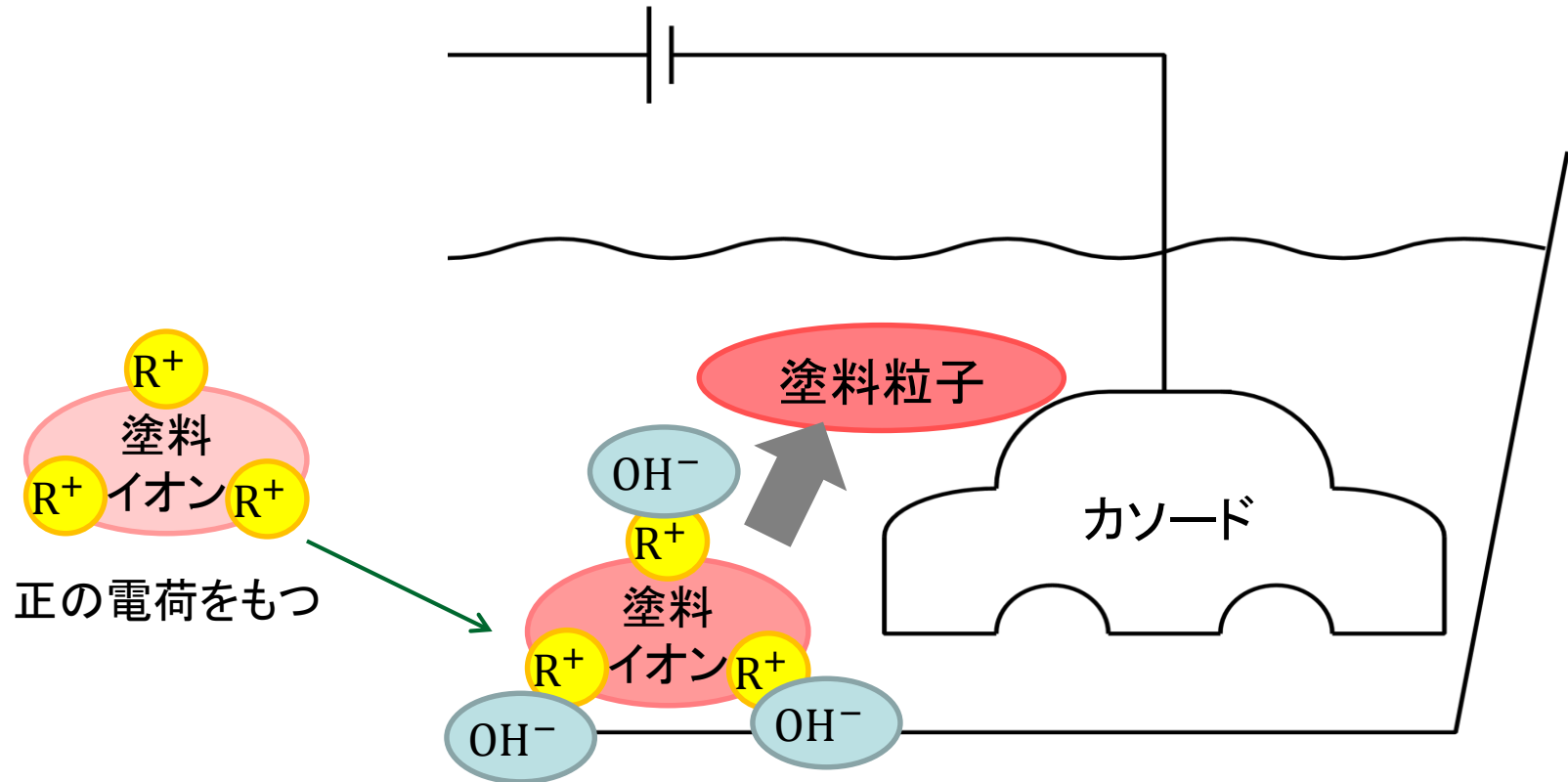
本研究の塗膜析出メカニズム概略

実験で得られた
知見1と2を踏まえた
塗膜析出メカニズム



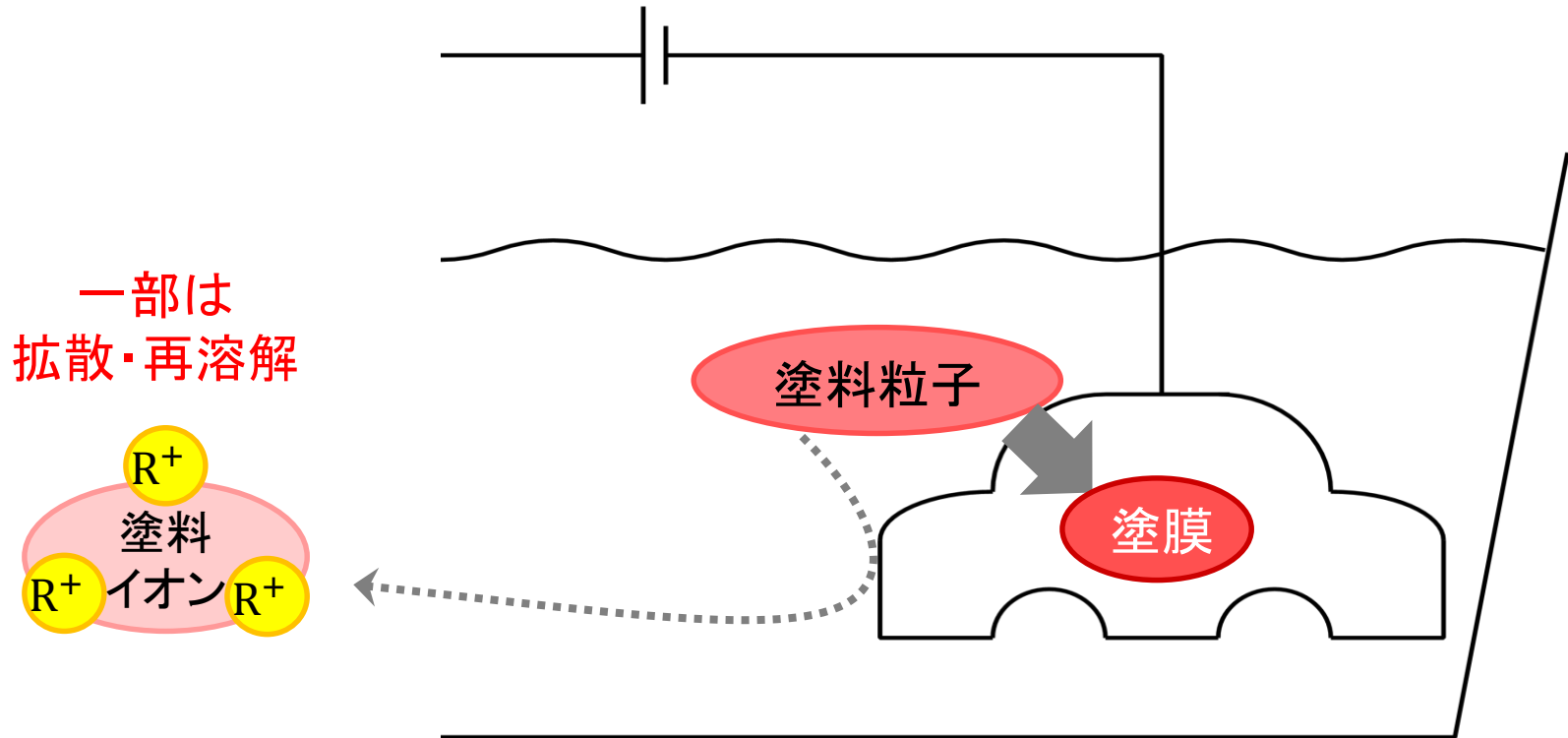
- ①水の電気分解により、カソード表面で OH^- が発生し蓄積される。
- ② OH^- の一部は拡散消費される。

本研究の塗膜析出メカニズム概略



③ OH^- が一定量たまと塗料イオンと反応してカソード近傍で塗料粒子が凝集を開始し、それが「濁り」となって電気抵抗を持ち始める。この時、仮想膜厚 \bar{h} がゼロから正の値となる。

本研究の塗膜析出メカニズム概略



- ④濁りが一定量凝集するとカソード面に付着して塗膜となる。この時の電流密度 j_{catini} によって塗膜の肌質が決まるため、その後の析出効率に履歴依存性が生じる。
- ⑤濁りの一部は付着せずに拡散し、再溶解する。

手法

～提案する塗膜抵抗および析出モデル～

提案する塗膜抵抗モデル

モデル式

カソード電流密度 j_{cat} を下記2変数の関数で表す.

◆ 塗膜の電圧降下 $\Delta\phi_{\text{cat}}$,

◆ 仮想膜厚 \bar{h} .

$$j_{\text{cat}}(\Delta\phi_{\text{cat}}, \bar{h}) = c_1 \{ \exp(c_2 \Delta\phi_{\text{cat}}) - \exp(-c_2 \Delta\phi_{\text{cat}}) \}$$

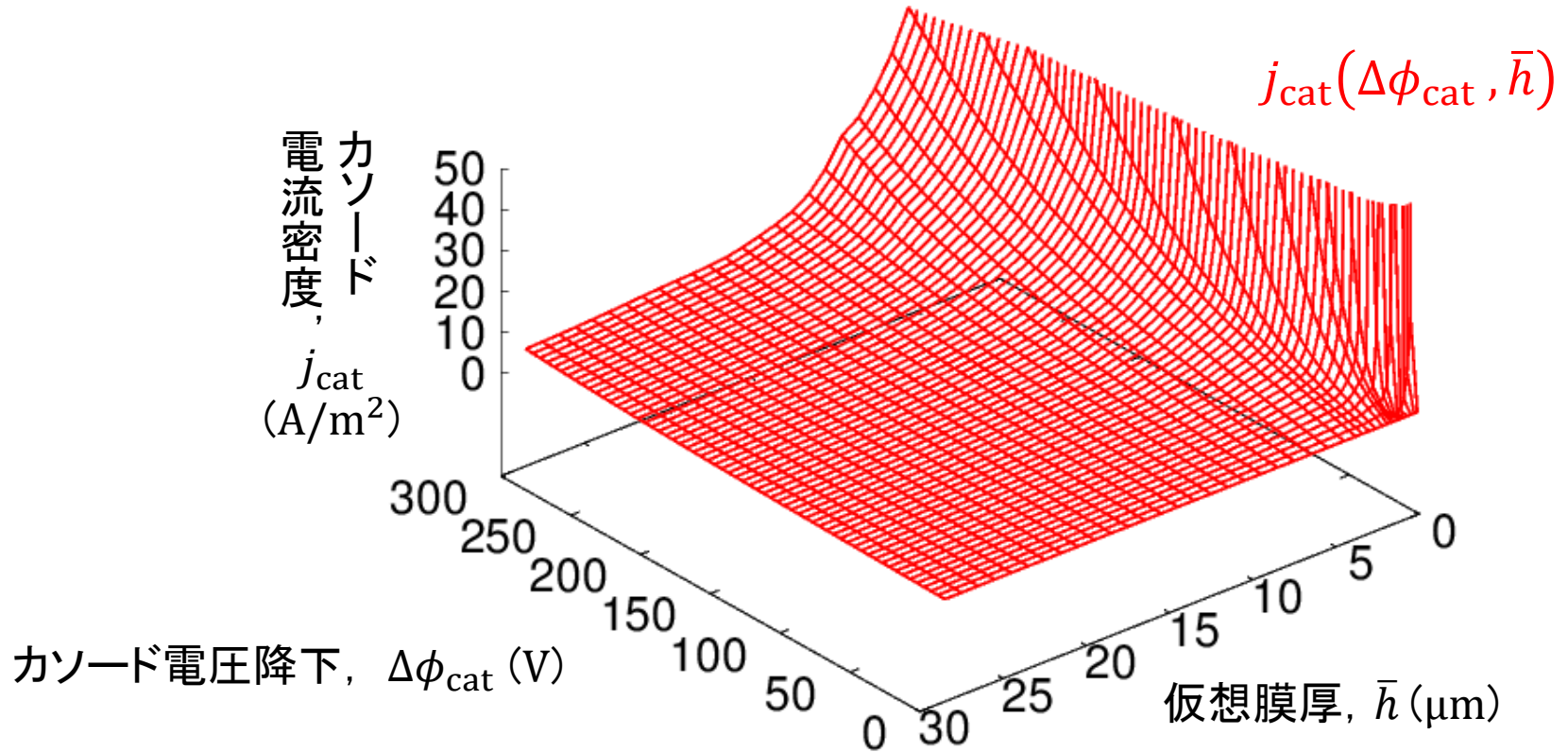
ただし, パラメータ c_1, c_2 は \bar{h} の関数.

- 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.
- 従来モデルの水洗・焼付後の膜厚 h を濁りを含めた仮想膜厚 \bar{h} に変更しただけ. (仮想膜厚 \bar{h} の詳細な定義は後述.)

提案する塗膜抵抗モデル

パラメータ同定結果

一枚板電着実験のデータよりフィッティングし、パラメータを同定した。



膜厚が小さい範囲における電流の急激な変化を表現できている。

提案する塗膜析出モデル

電流を水の流りに例えたモデル図

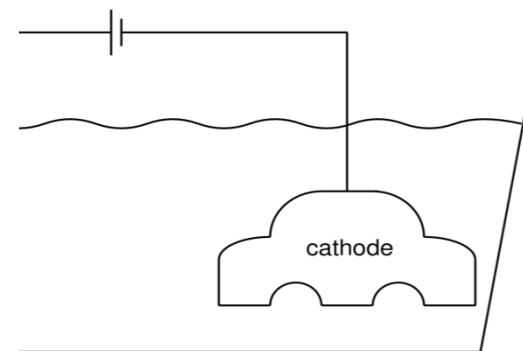
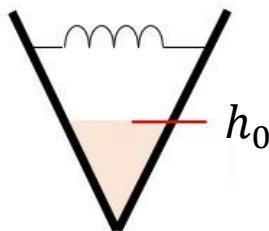
塗膜析出メカニズムを水の流りの収支で説明.

カソード電流密度

j_{cat}



j_{dif}



- カソードに流れる電流を水の流りに見立てている.
- コップはカソード境界層を表す.
- 水が溜まるとコップの口が開き, 水の漏れが少なくなる.
∴ 塗膜が厚いと電流の漏れが少ないことを表現している.
- コップのバネは析出開始時のカソード電流密度 (j_{catini}) ごとに異なる.

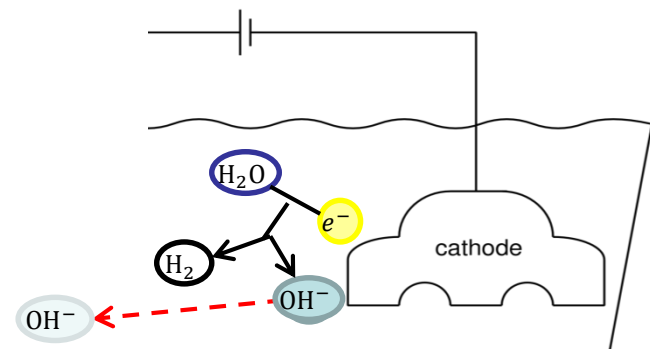
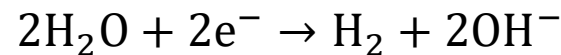
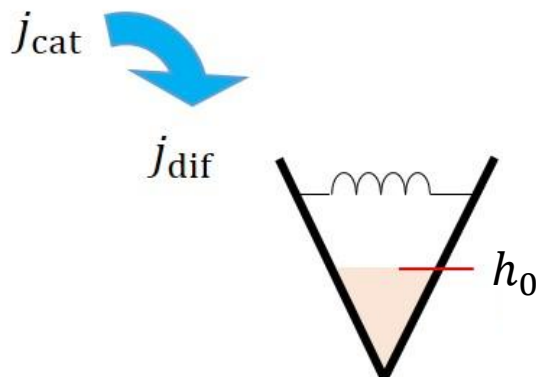


提案する塗膜析出モデル

電流を水の流に例えたモデル図

i j_{cat} が析出最低電流密度 j_0 以下の場合

カソード電流密度



電流が小さいうちは塗膜析出に使われず、
拡散消費電流密度 j_{dif} としてすべて捨てられる。

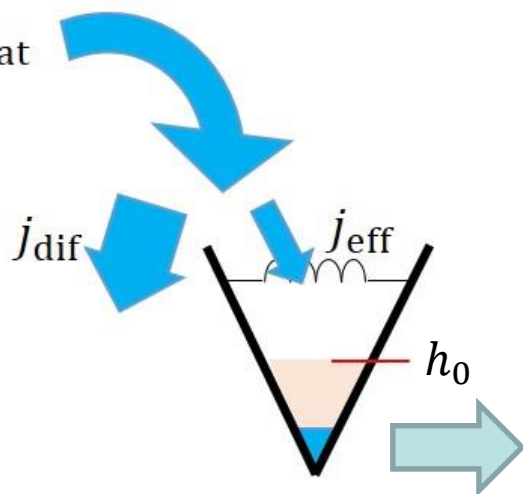
j_{cat} のうち OH^- や塗料粒子の拡散のため
塗膜の析出に寄与しないもの。

提案する塗膜析出モデル

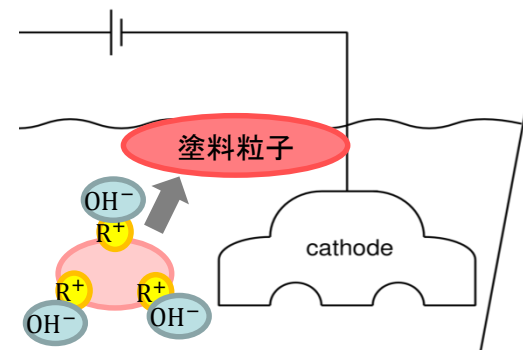
電流を水の流りに例えたモデル図

ii j_{cat} が析出最低電流密度 j_0 を超えた場合

カソード電流密度 j_{cat}



仮想膜厚 \bar{h} として析出

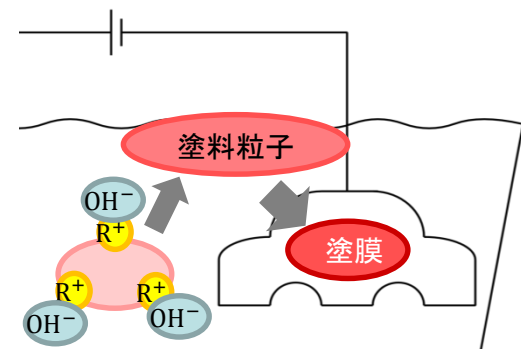
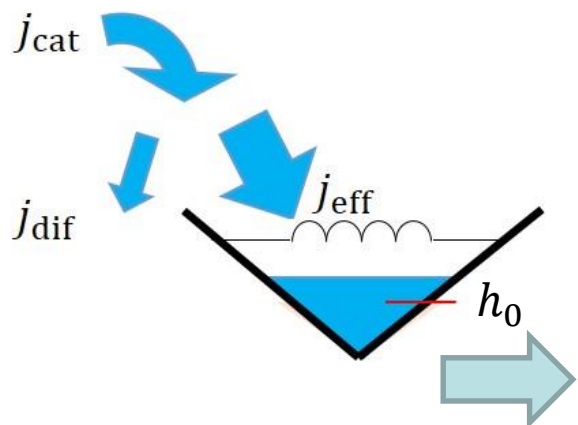


- ある程度電流が大きくなると、一部はコップに入り溜まる。
- コップに入った水が濁りとしてカソード近傍に析出。
- その水かさを水洗前の濁りを含んだ仮想膜厚 \bar{h} として計算。

提案する塗膜析出モデル

電流を水の流りに例えたモデル図

iii \bar{h} が塗膜析出基準 h_0 を超えた場合



- 膜厚 h が $h = \bar{h}$ として析出.
- コップに入った水の量に応じてコップの口が開く.
∴ 析出が進むほど析出しやすくなる.
- 以降は j_{cat} が析出最低電流密度 j_0 を下回っても析出可能.

提案する塗膜析出モデル

モデル式

拡散消費電流密度 j_{dif} を下記3変数の関数で表す.

- ◆カソード電流密度 j_{cat} ,
- ◆仮想膜厚 \bar{h} ,
- ◆析出開始時のカソード電流密度 j_{catini} .

$$j_{\text{dif}}(j_{\text{cat}}, \bar{h}; j_{\text{catini}}) = j_{\text{cat}} - \left\{ (j_{\text{cat}}^{d_2} + d_1)^{\frac{1}{d_2}} - d_1^{\frac{1}{d_2}} \right\}$$

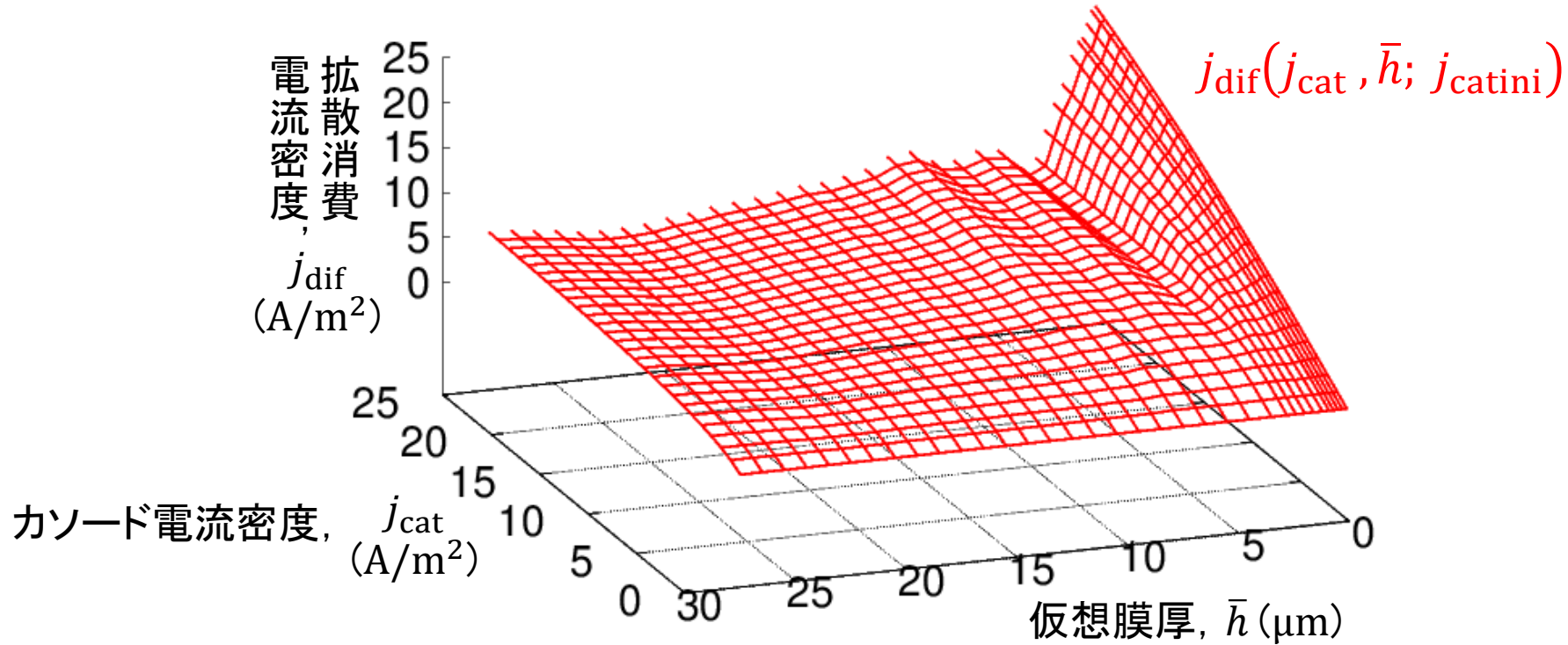
ただし, パラメータ d_1, d_2 は \bar{h} と j_{catini} の関数.

- 実験より求めた実験式.
- 従来モデルを少々改良.
 - 膜厚 h を仮想膜厚 \bar{h} に変更
 - パラメータ d_1, d_2 の引数に j_{catini} を追加

提案する塗膜析出モデル

パラメータ同定結果

一枚板電着実験のデータよりフィッティングし、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こと
- カソード電流密度が大きいほど拡散消費電流密度が大きいことを表現できている。

検証

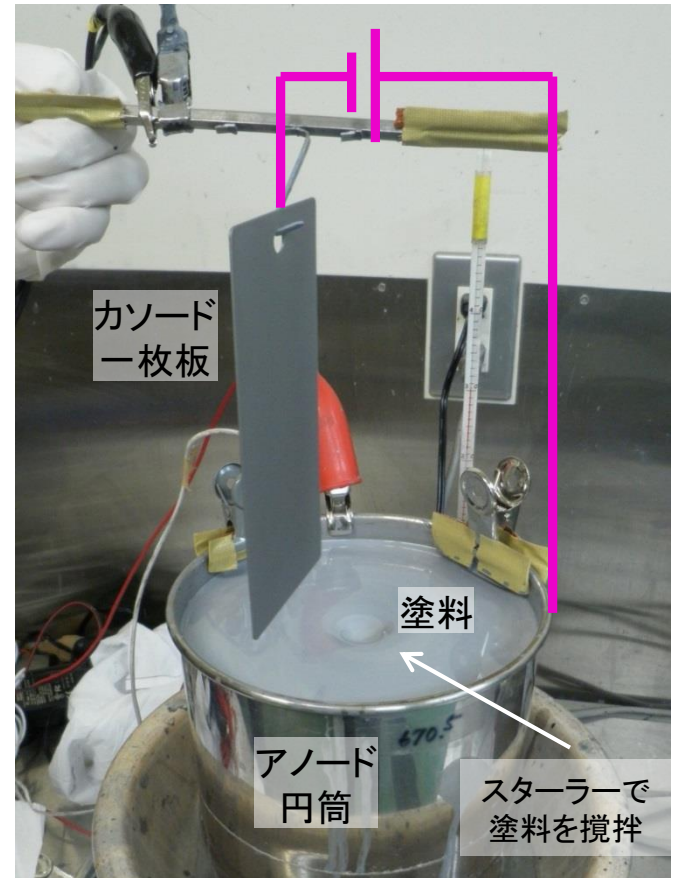
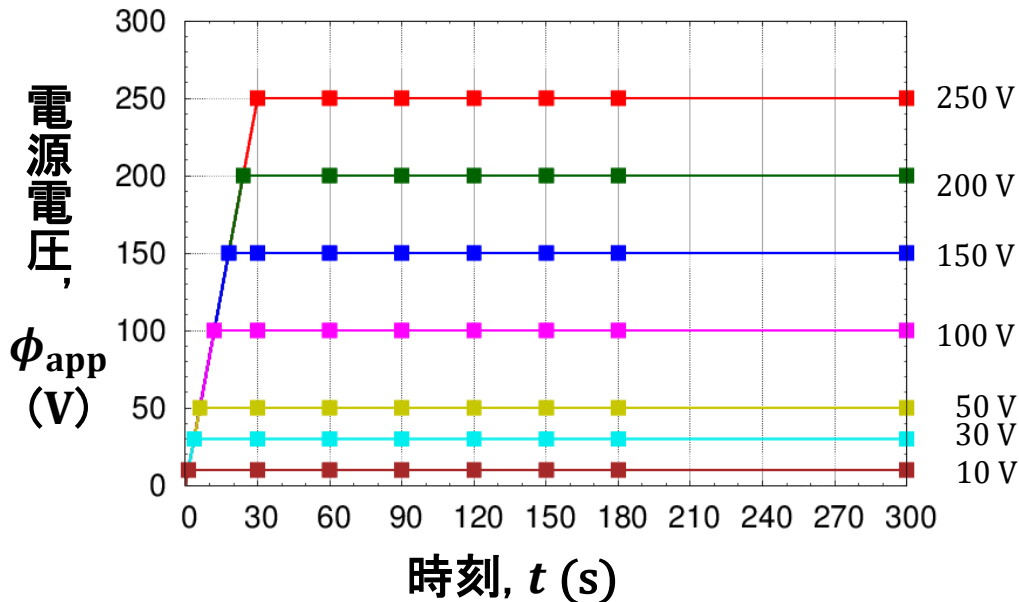
実験の都合上、前回と異なる塗料を用いたため、
従来法と直接の比較はできないことに注意。

検証(概要)

- 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.
- 実験結果と解析結果を比較検証する.

定電圧実験

設定した入力電圧

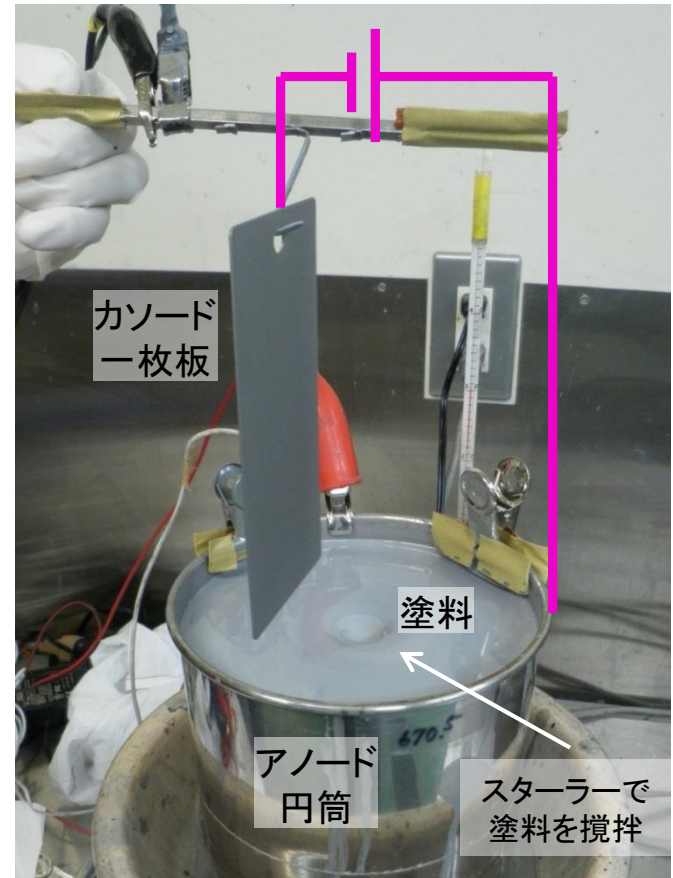
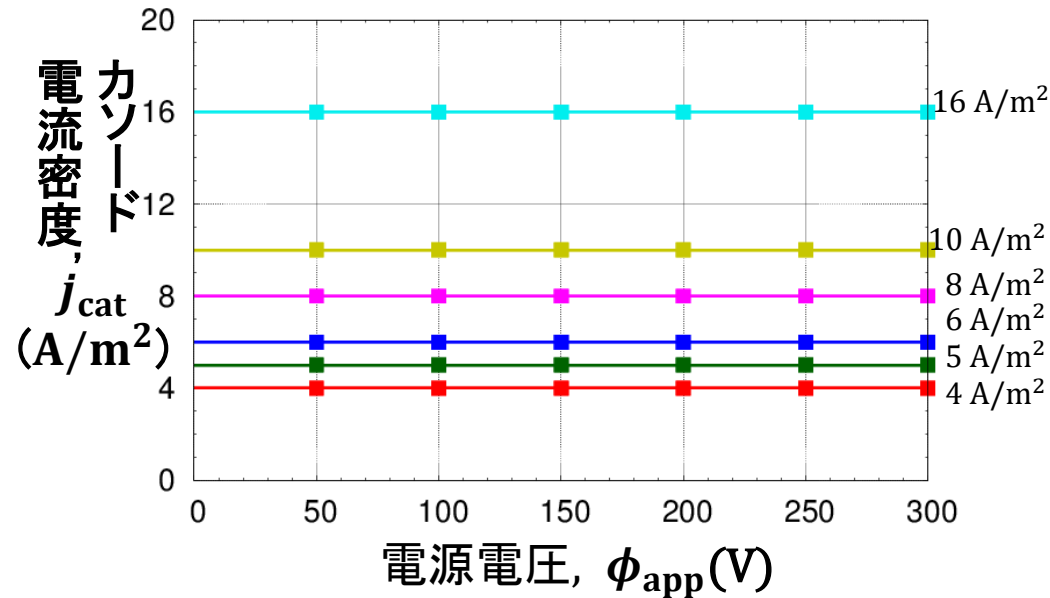


検証(概要)

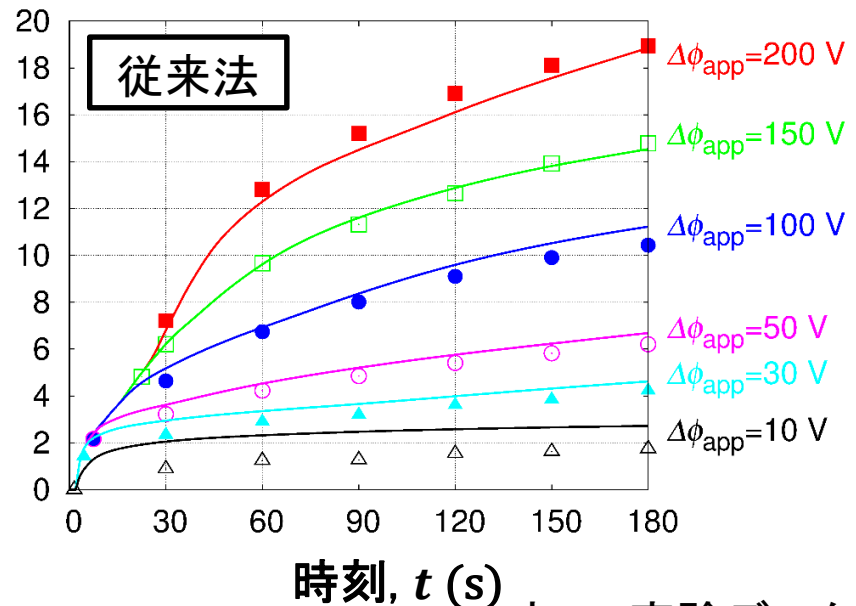
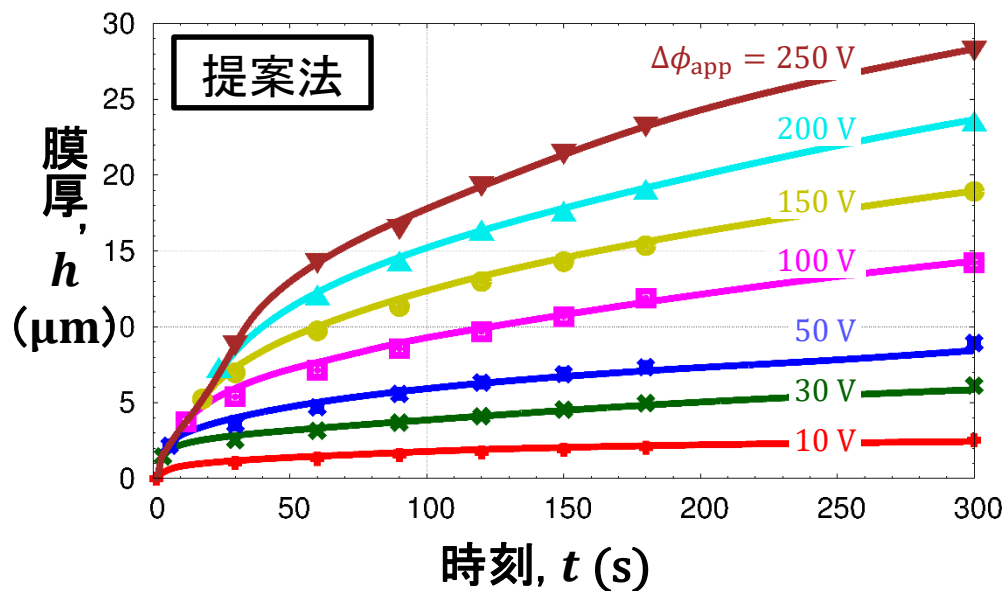
- 提案した各モデルを有限要素法のシミュレータに組み込み, 実験で行った一枚板電着を解析.
- 実験結果と解析結果を比較検証する.

定電流実験

設定した入力電流



定電圧実験の膜厚時刻暦



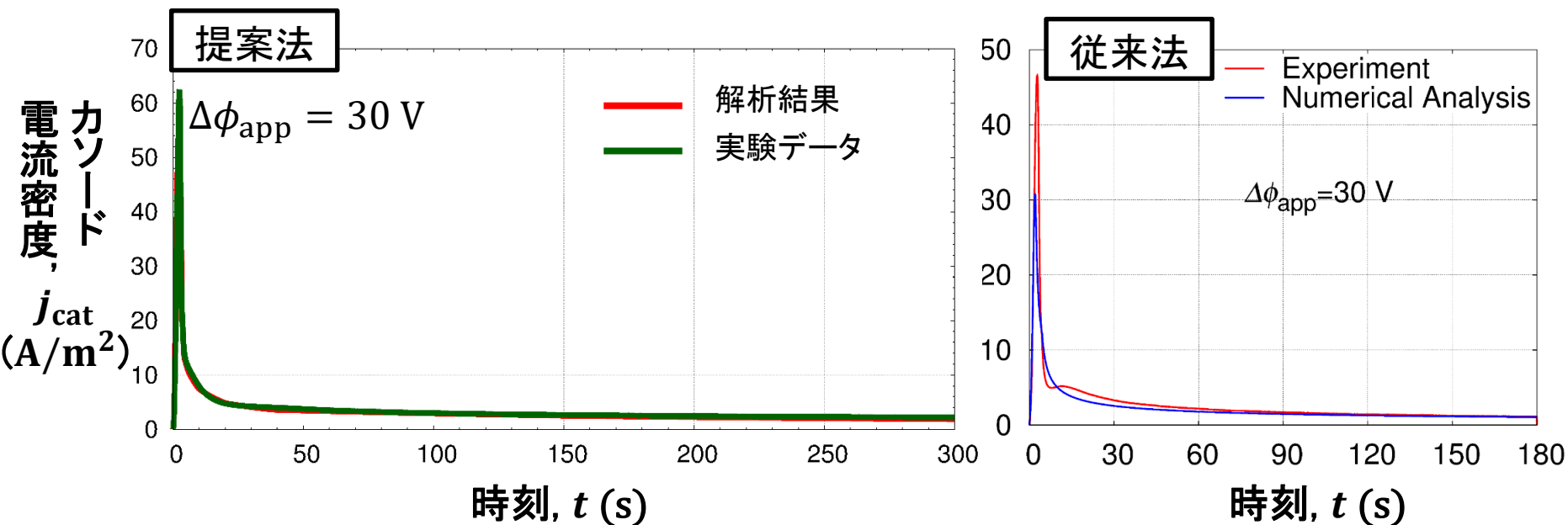
点 : 実験データ
実線 : 解析結果

■ 膜厚時刻暦:

- 低い電圧においても解析結果と実験が一致した。
- 従来法よりも高精度に予測できている。



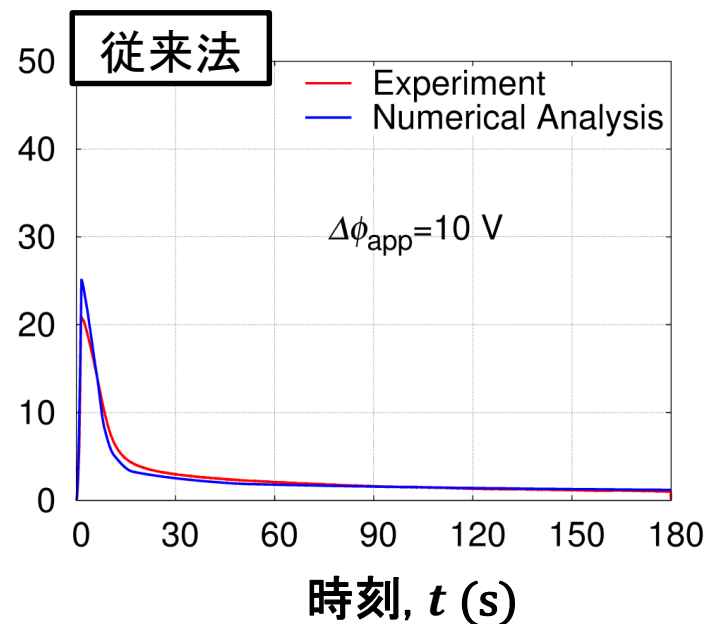
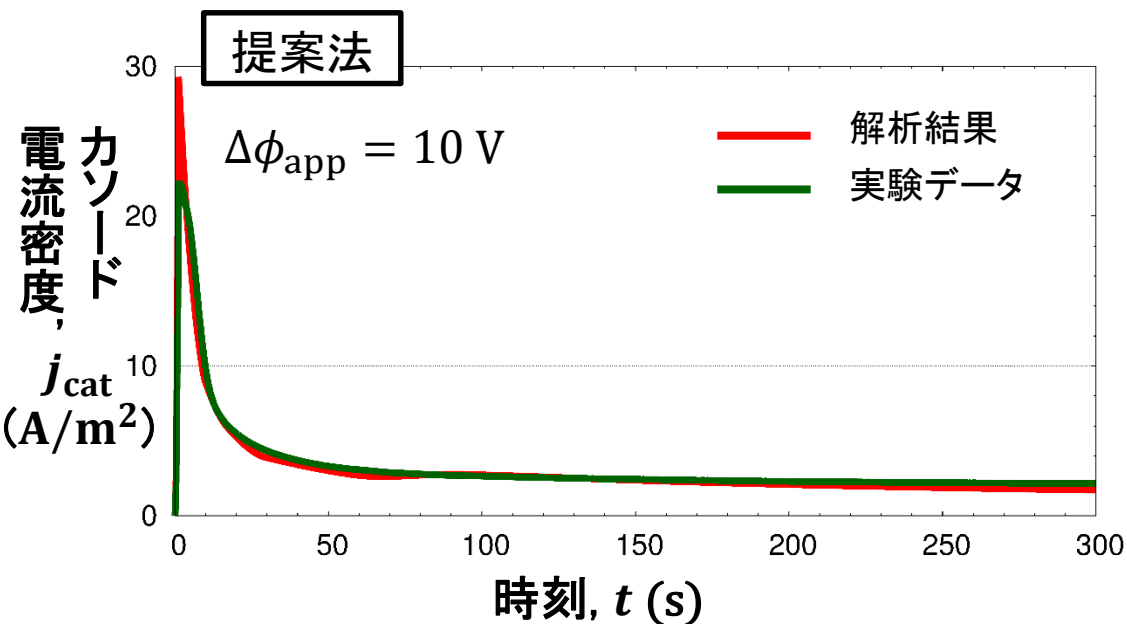
定電圧実験のカソード電流密度時刻暦



■ カソード電流密度時刻暦:

- $\Delta\phi_{\text{app}} = 30 \text{ V}$ 以上は解析と実験のグラフがほぼ一致した.

定電圧実験のカソード電流密度時刻暦

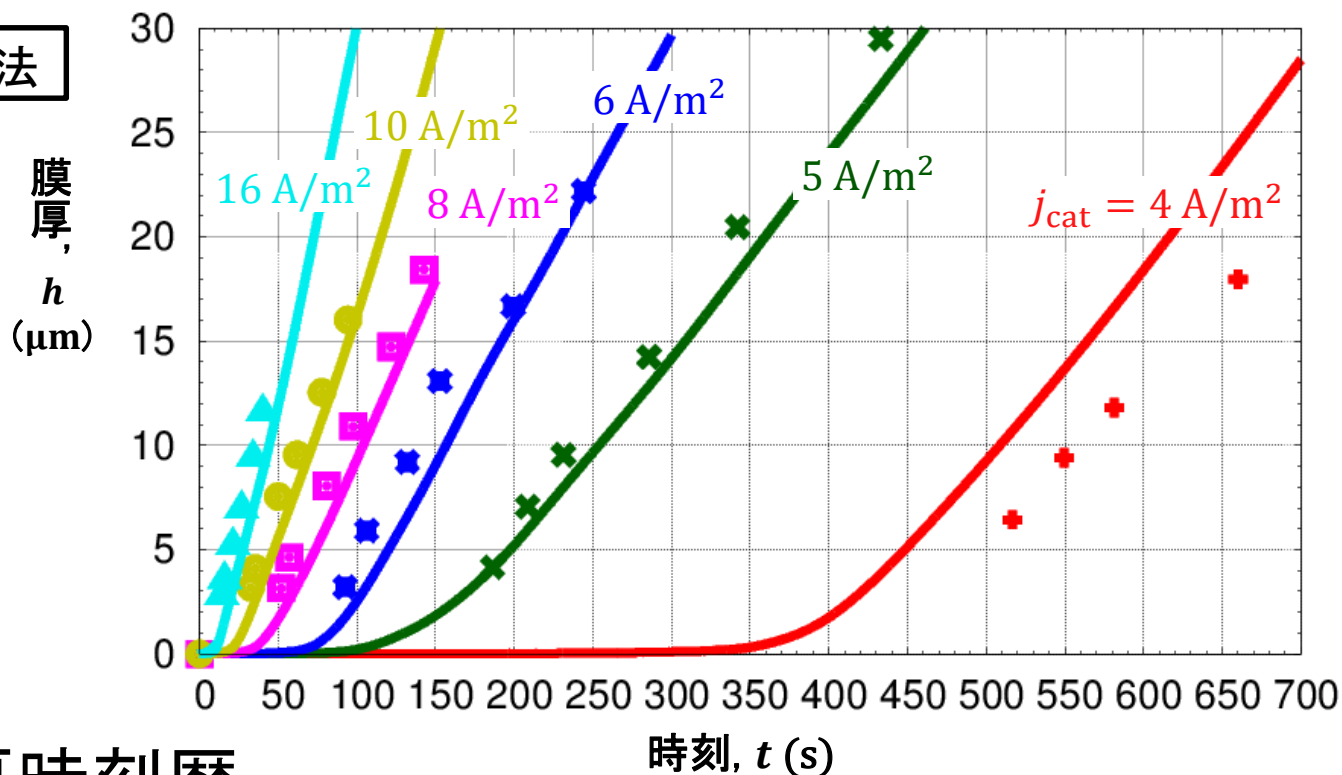


■ カソード電流密度時刻暦:

- $\Delta\phi_{\text{app}} = 30 \text{ V}$ 以上は解析と実験のグラフがほぼ一致した.
- $\Delta\phi_{\text{app}} = 10 \text{ V}$ においてピーク値に多少の差はあるものの、ほとんど再現できている.

定電流実験の膜厚時刻暦

提案法



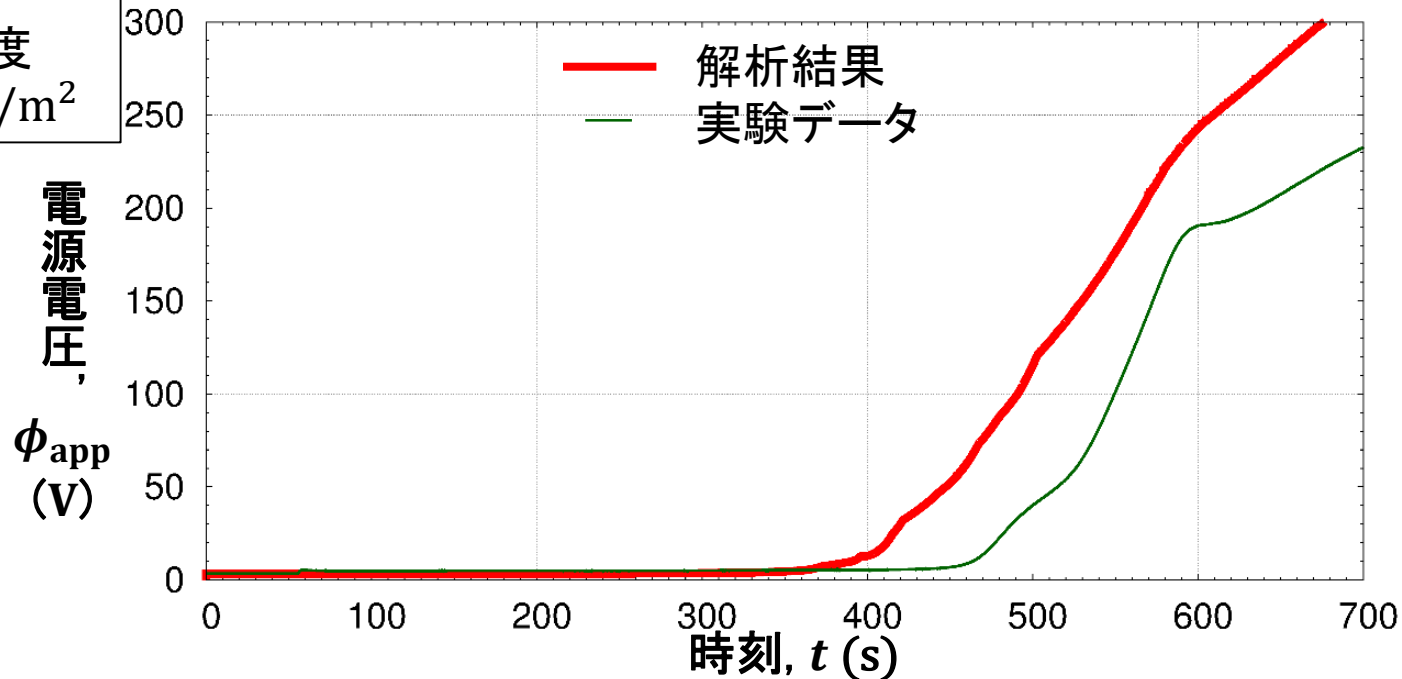
■ 膜厚時刻暦

- 析出の開始のタイミングが実験とほぼ一致.
- 析出後の傾きもほぼ一致した.



定電流実験の電源電圧時刻歴

カソード
電流密度
 $j_{\text{cat}} = 4 \text{ A/m}^2$



■ 電源電圧時刻歴 (弱い電流密度の時)

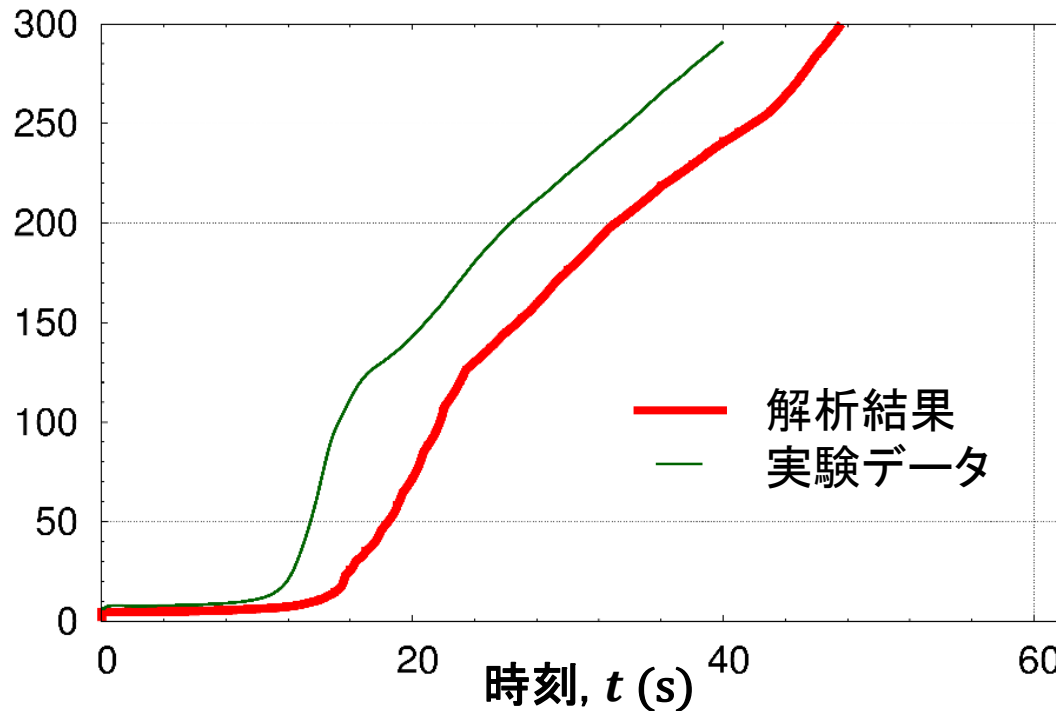
- 電源電圧の立ち上がり時刻がほぼ一致.
- 立ち上がり後の昇圧速度 (グラフの勾配) もほぼ一致.

定電流実験の電源電圧時刻暦

カソード
電流密度

$$j_{\text{cat}} = 16 \text{ A/m}^2$$

電源電圧,
 ϕ_{app}
(V)



■ 電源電圧時刻歴 (強い電流密度の時)

- 電源電圧の立ち上がり時刻がほぼ一致.
- 立ち上がり後の昇圧速度 (グラフの勾配) もほぼ一致.



まとめ

まとめ

- 析出開始前に現れる濁りが電気抵抗をもつことを考慮した新たな塗膜抵抗モデルを提案した.
- 析出開始時のカソード電流密度が析出効率に履歴依存性を与えることを考慮した新たな塗膜析出モデルも提案した(予稿集には未掲載).
- 上記の提案モデルにより,
 - ・定電圧実験の低い電圧での膜厚とカソード電流密度, および
 - ・定電流実験の膜厚と電源電圧の時刻歴が従来法より高精度に予測できることを示した.

今後の予定

- 4枚BOX等で実験と解析を比較する.