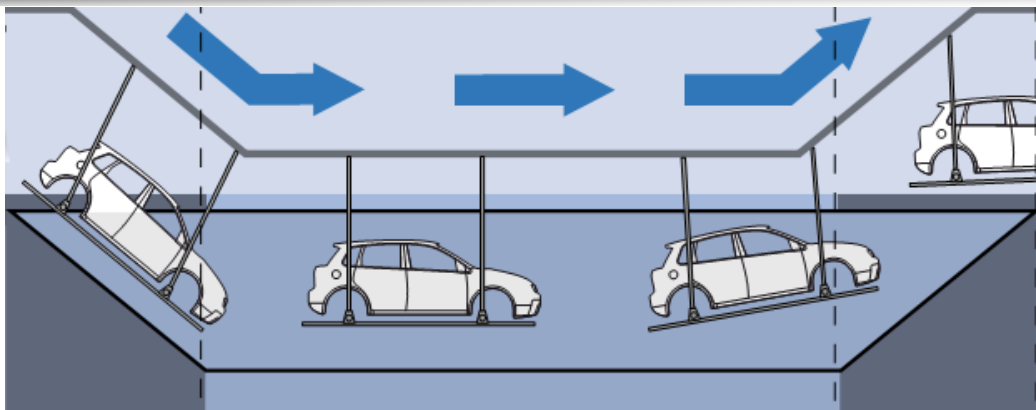


流速依存性を考慮した 電着塗装シミュレーションのための 塗膜析出モデル

長井 悠, 大西 有希, 天谷 賢治
東京工業大学



研究背景



画像出典：
<http://www.rodip.com.br/>

電着塗装は比較的均一な塗膜を生成出来る。
ただし、袋状の部位では均一性が保たれない。
⇒ 最低膜厚を保証する**プロセス最適化**が必要

<設計パラメータ>

- 電極の数, 位置, 昇圧パターン
- 電着穴の数, 位置, 大きさ など

経験と勘頼みの最適化は困難
数値解析による最適化に期待



従来研究

- 数種の電着塗装シミュレータが開発されている
- 精度が未だ不十分な為、シミュレータはほとんど利用されていない
 - ◆ 膜厚を計算するために重要なモデルは以下の二つ

塗膜抵抗モデル
電気抵抗 \propto 膜厚

塗膜析出モデル
膜厚 \propto クーロン量

↓
ロスを考慮したモデル

↑
線形モデルでは精度がよくない



我々のアプローチ(概要)

■ 2つのモデルを非線形の式で表した

塗膜抵抗モデル

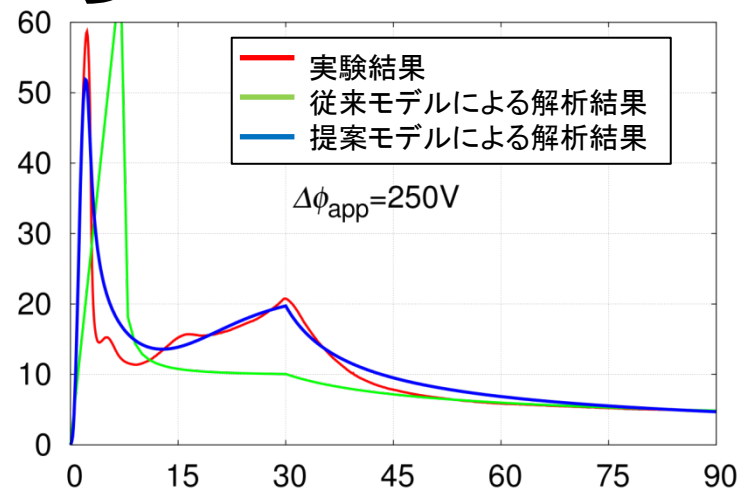
抵抗 = $f(\text{膜厚})$

塗膜析出モデル

膜厚 = $g(\text{クーロン量})$

■ 解析を行って検証してみたところ...

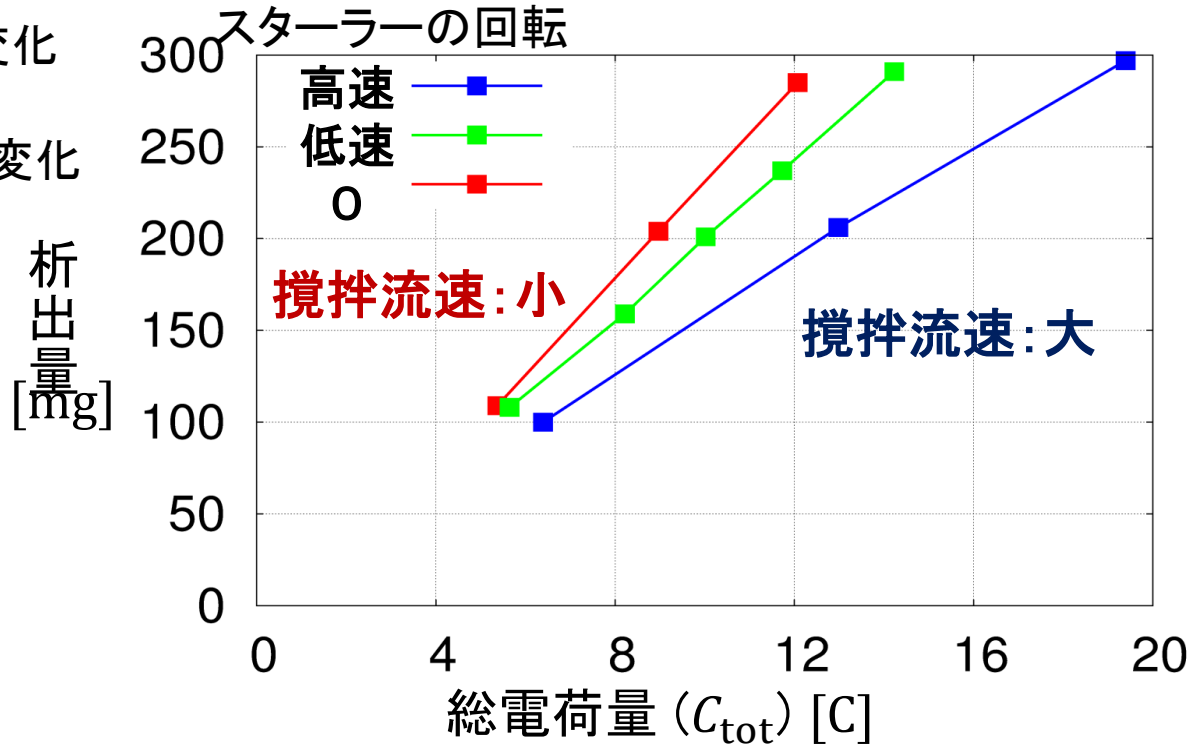
- 一枚板電着(単純形状)
→ 電流・膜厚ともに一致！！
- 4枚BOX(袋形状)
→ BOXの奥の面で
電流・膜厚が不一致



我々のアプローチ(問題点)

原因: 4枚BOXの外側のみで攪拌
そのため内側は攪拌されていない

塗料の流速変化
に対する
クーロン効率変化



攪拌流速が小 ⇒ クーロン効率が
大
クーロン効率に流速依存性がある！



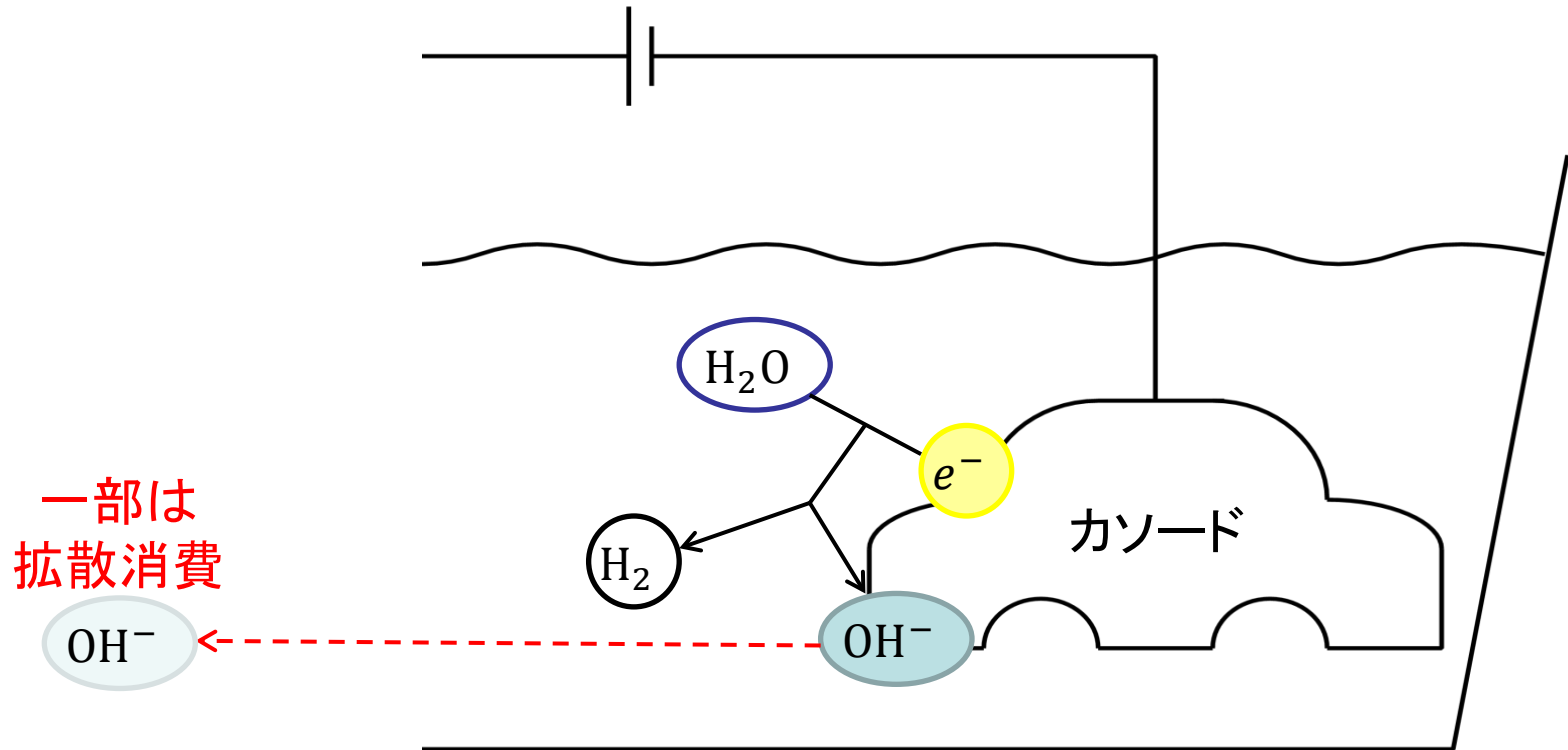
研究目的

塗膜析出の**流速依存性**に着目し、
袋状部材における膜厚の予測精度向上を目指す

1. 我々の想定する塗膜析出メカニズム
2. 一枚板電着実験による流速依存性の測定
3. 解析による本手法の検証
 - i. 一枚板電着
 - ii. 4枚BOX
4. まとめ

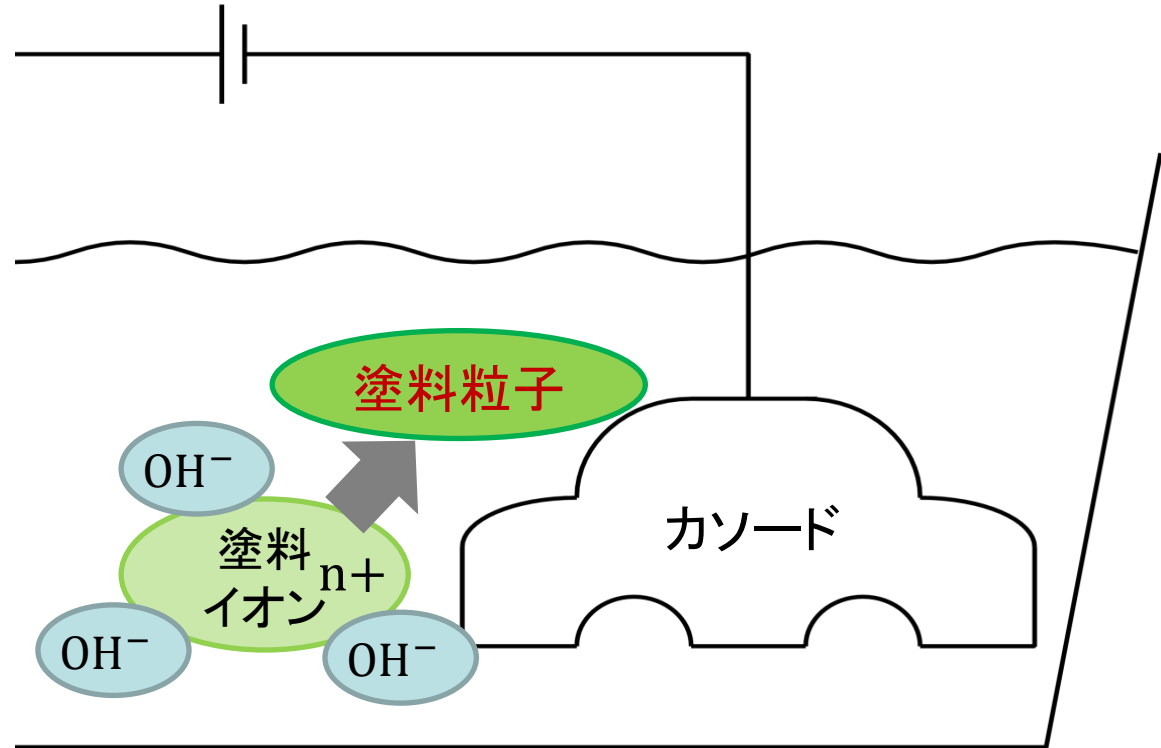
1.我々の想定する塗膜析出メカニズム

塗膜析出メカニズム



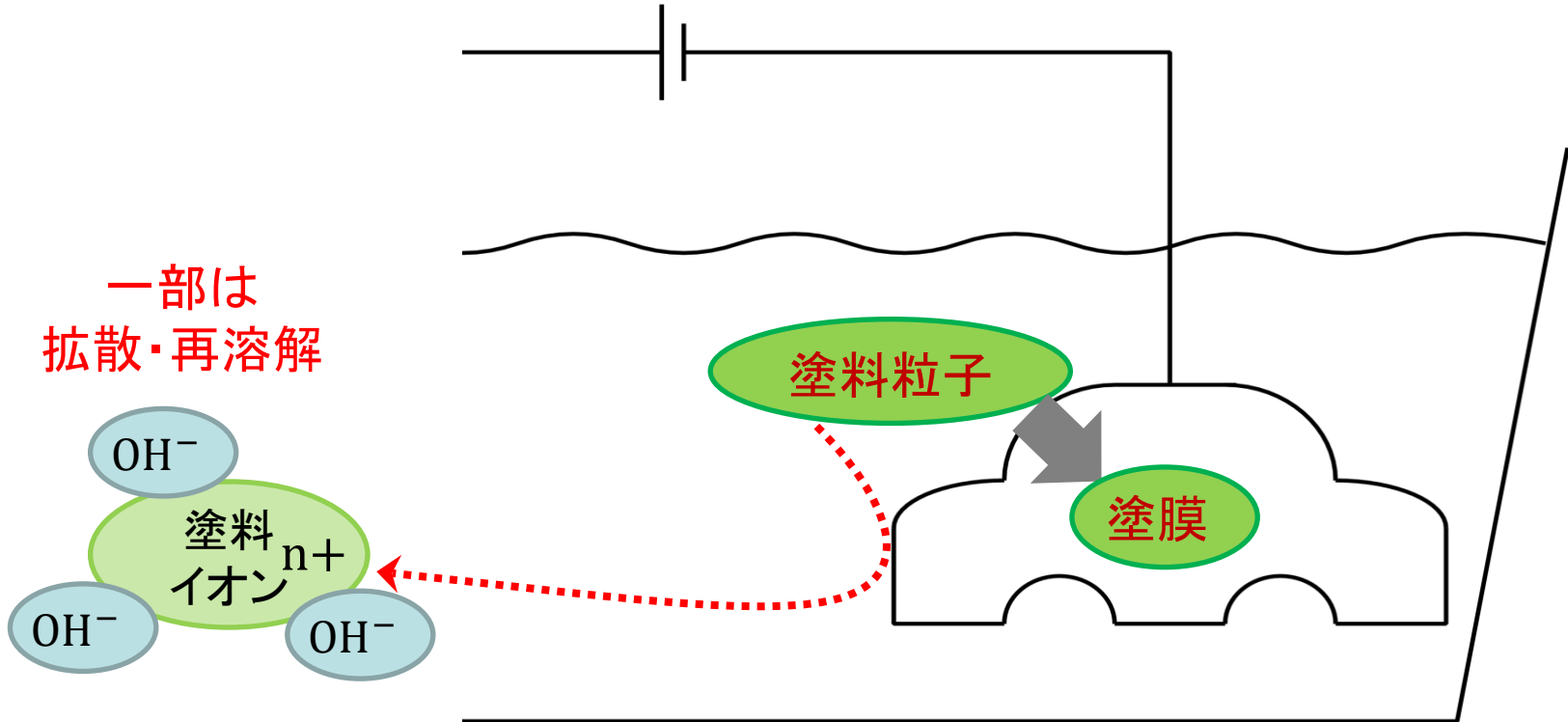
- ①水の電気分解により、カソード表面で OH^- が発生、蓄積される
- ② OH^- の一部は拡散消費

塗膜析出メカニズム



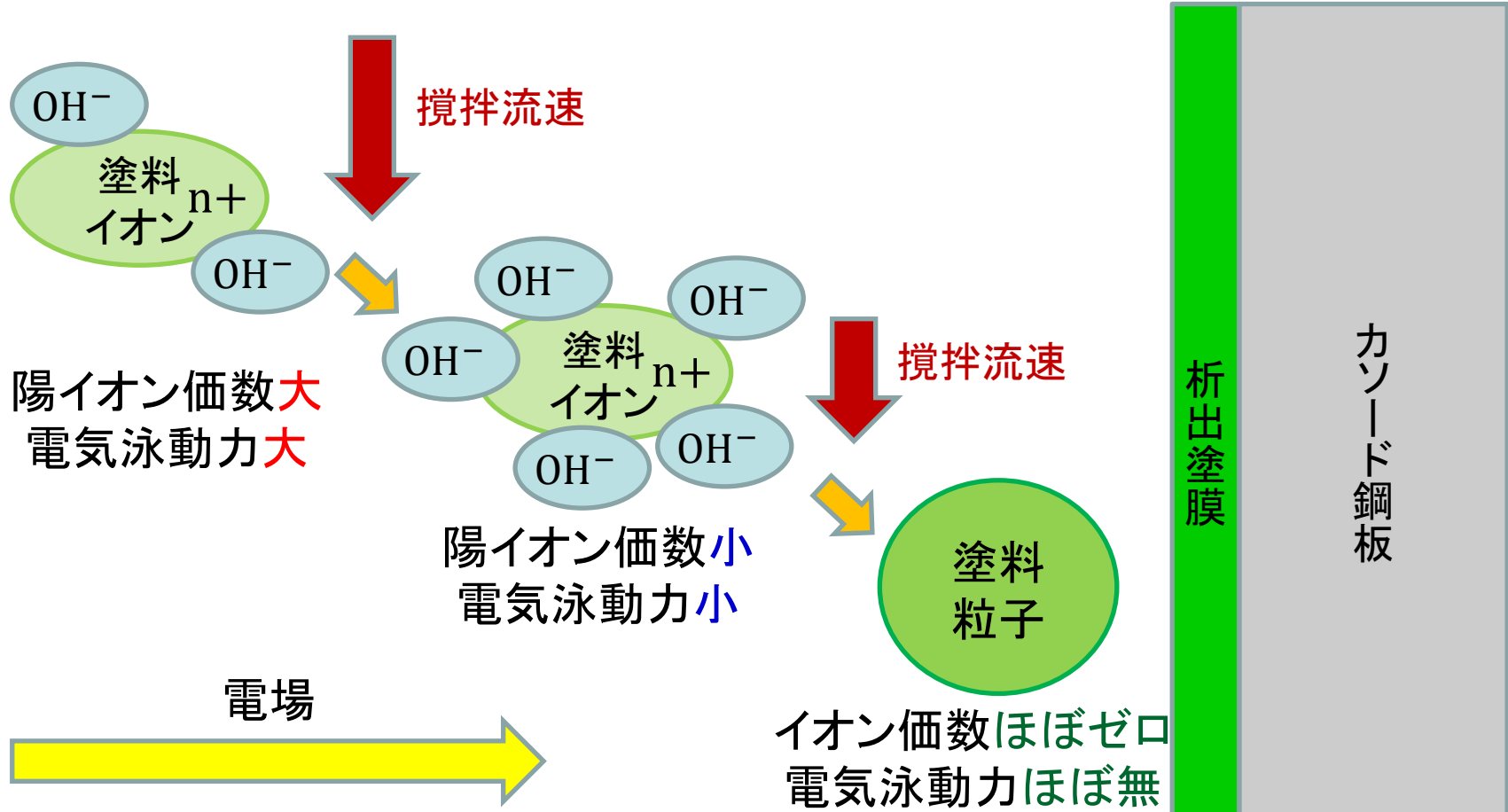
③ OH^- が一定量たまると塗料粒子がカソード表面の近傍で析出を開始

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。
- ④と⑤の比率が塗膜の電流密度・電圧降下に加え、
攪拌流速にも依存

流速依存性の原因



攪拌流速が大きいと電気泳動よりも対流が卓越し、塗料粒子が流されて拡散・再溶解してしまう。

塗膜析出モデル

$$h = \frac{\sigma}{\rho} = \frac{gD_{\text{eff}}}{\rho},$$

$$D_{\text{eff}}|_{t=0} = 0, \quad \dot{D}_{\text{eff}} = \begin{cases} 0 & (D_{\text{buf}} < D_0) \\ \beta(j_{\text{cat}}, \Delta\phi_{\text{pai}}) \max(j_{\text{cat}} - j_0, 0) & (D_{\text{buf}} = D_0) \end{cases},$$

$$D_{\text{buf}}|_{t=0} = 0, \quad \dot{D}_{\text{buf}} = \begin{cases} 0 & (D_{\text{buf}} = D_0 \cap j_{\text{cat}} > j_0) \\ 0 & (D_{\text{buf}} = 0 \cap j_{\text{cat}} < j_0) \\ j_{\text{cat}} - j_0 & (\text{otherwise}) \end{cases},$$

有効電流比 β

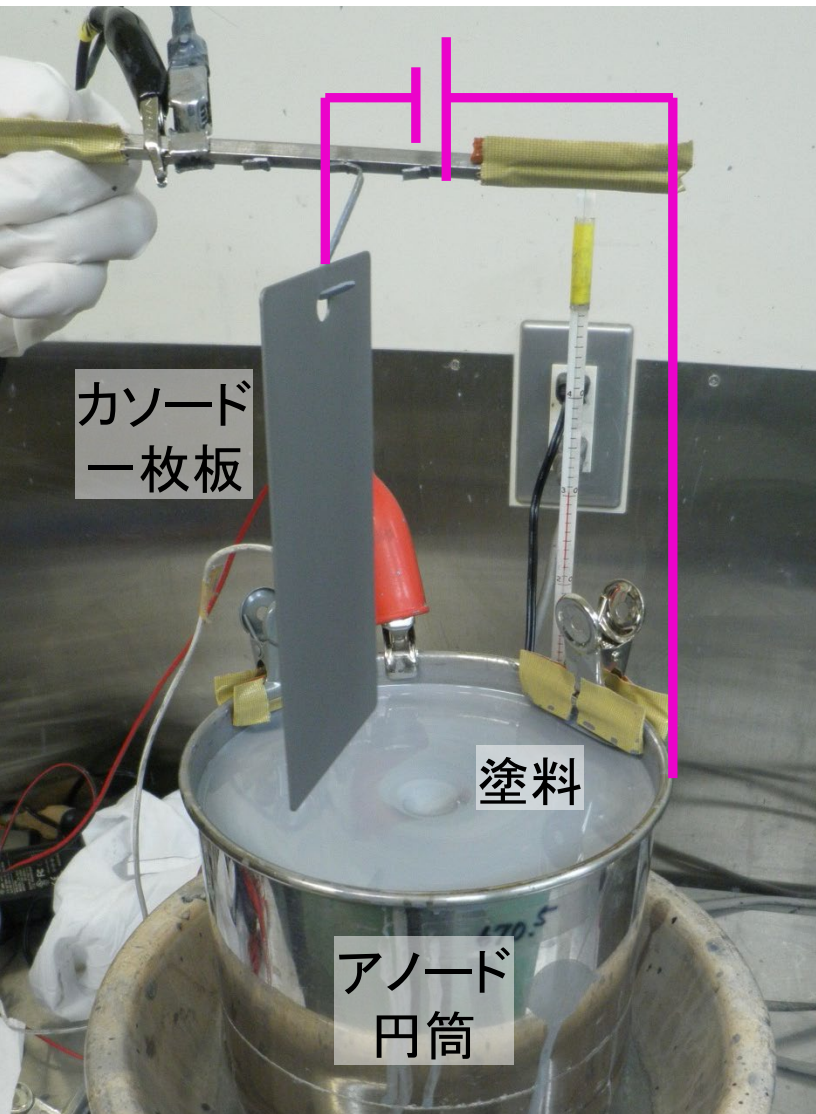
$\beta(j_{\text{cat}}, \Delta\phi_{\text{pai}}) = 1 - \beta_1 \exp(\beta_2 j_{\text{cat}} \Delta\phi_{\text{pai}})$ j_{cat} : カソード電流密度
 $\Delta\phi_{\text{pai}}$: 塗膜での電圧降下

この β_1, β_2 の値を流速に依存するパラメータとし、
 攪拌流速ごとの実験により同定する

2.一枚板電着実験による 流速依存性の測定



一枚板電着実験(概要)



- スターラーで攪拌流速を変化させ塗料の析出に与える影響を調べる
- つきまわり性能の良い自動車用電着塗料(日本ペイント社製)
- リン酸亜鉛被膜処理済みSPCC鋼板を電着
- アノードはSUS304の円筒
- 温度一定(30°C)
- 実験中にアノード表面電位と電流を計測
- 実験終了時に塗膜重量と膜厚を計測
- 電源電圧と通電時間を様々に変える

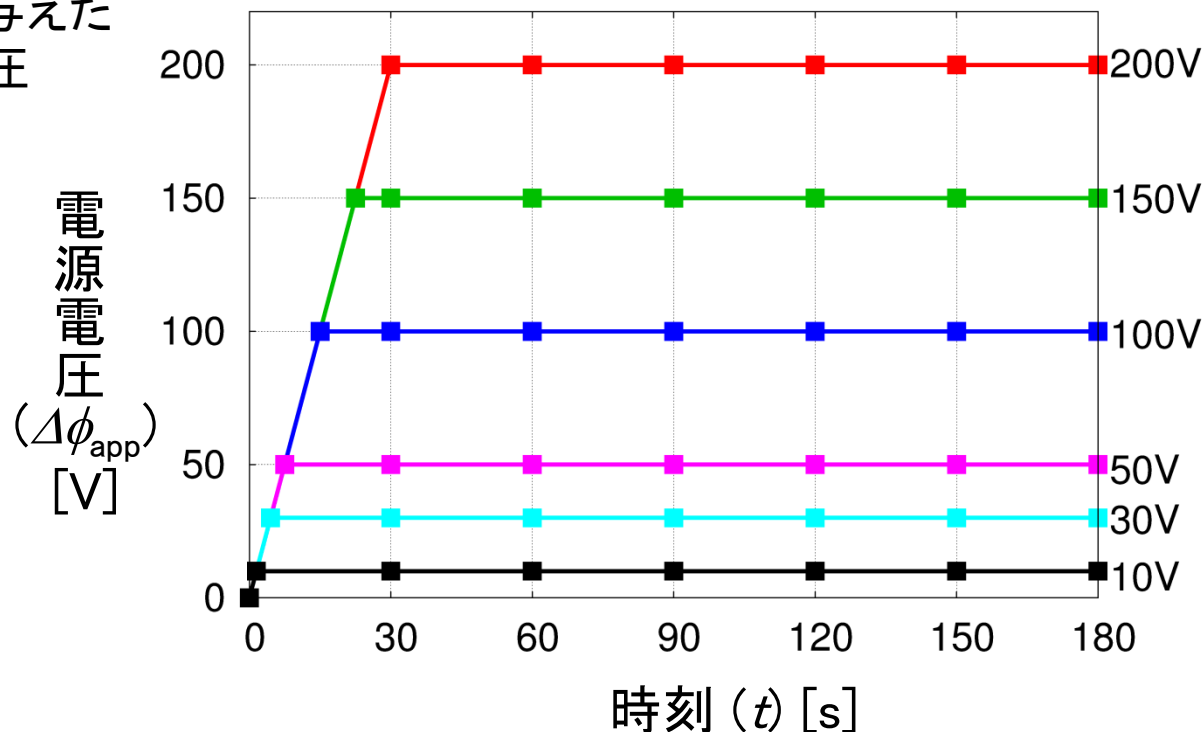
一枚板電着実験（実験条件）

■ スターラーで攪拌流速を変化

■ 電圧条件

- 昇圧速度は6.66V/sで一定
- 200, 150, 100, 50, 30, 10Vに達したら保持
- 昇圧終了時刻と30, 60, 90, 120, 150, 180秒で電着終了

実験で与えた
電源電圧
時刻歴

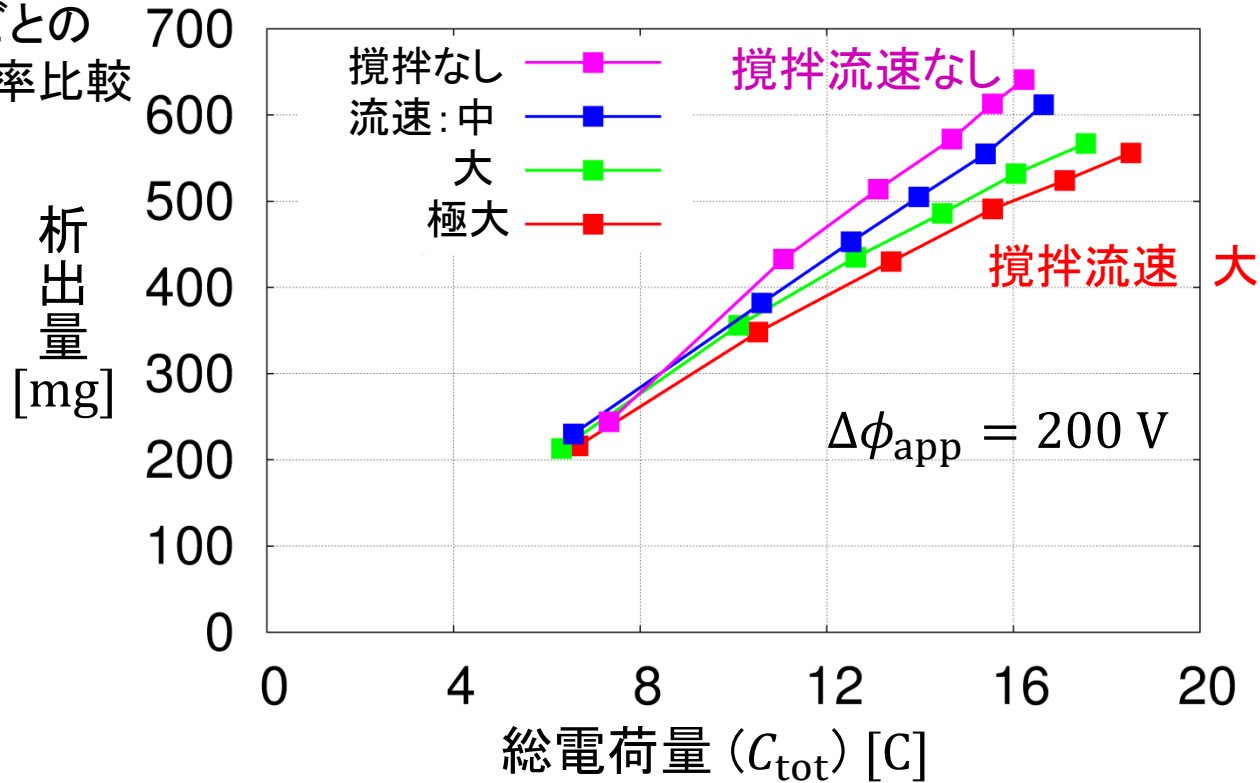


各流速に
41ケースの
電圧条件



実験結果(析出効率の流速依存性)

攪拌流速ごとの
クーロン効率比較



■ クーロン効率に流速依存性が確認された

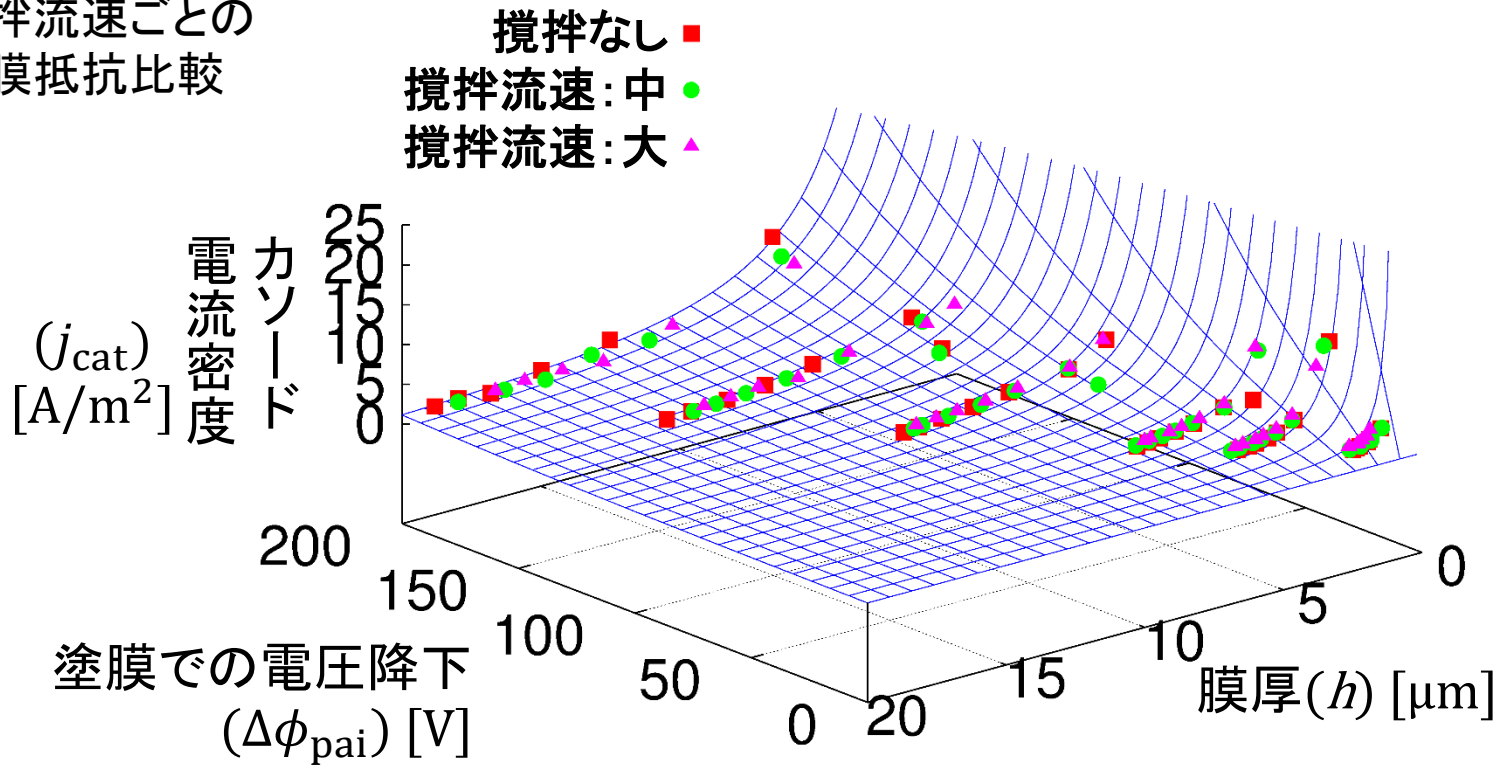
■ 攪拌流速: 大 \Rightarrow 析出効率: 小,

→ 攪拌流速を考慮した塗膜析出モデルが必要



実験結果(塗膜抵抗)

攪拌流速ごとの
塗膜抵抗比較



- 攪拌流速を変えても塗膜抵抗に変化なし
→ 塗膜抵抗モデルは流速依存性を持たない

一枚板電着実験のまとめ

■ 塗膜析出モデルに流速依存性を与える

塗膜析出モデルは有効電流比の式を以下で表す

$$\beta(j_{\text{cat}}, \Delta\phi_{\text{pai}}) = 1 - \beta_1 \exp(\beta_2 j_{\text{cat}} \Delta\phi_{\text{pai}})$$

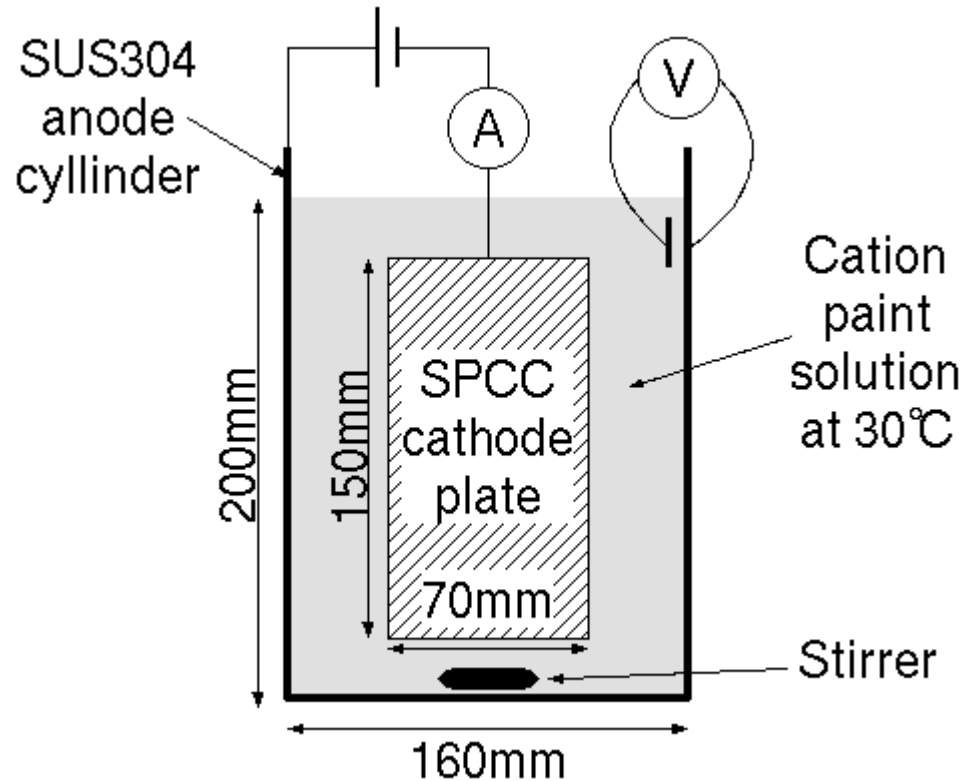
β_1 β_2 を攪拌流速ごとに変化させる

■ 塗膜抵抗モデルに流速依存性はない

3.解析による本手法の検証

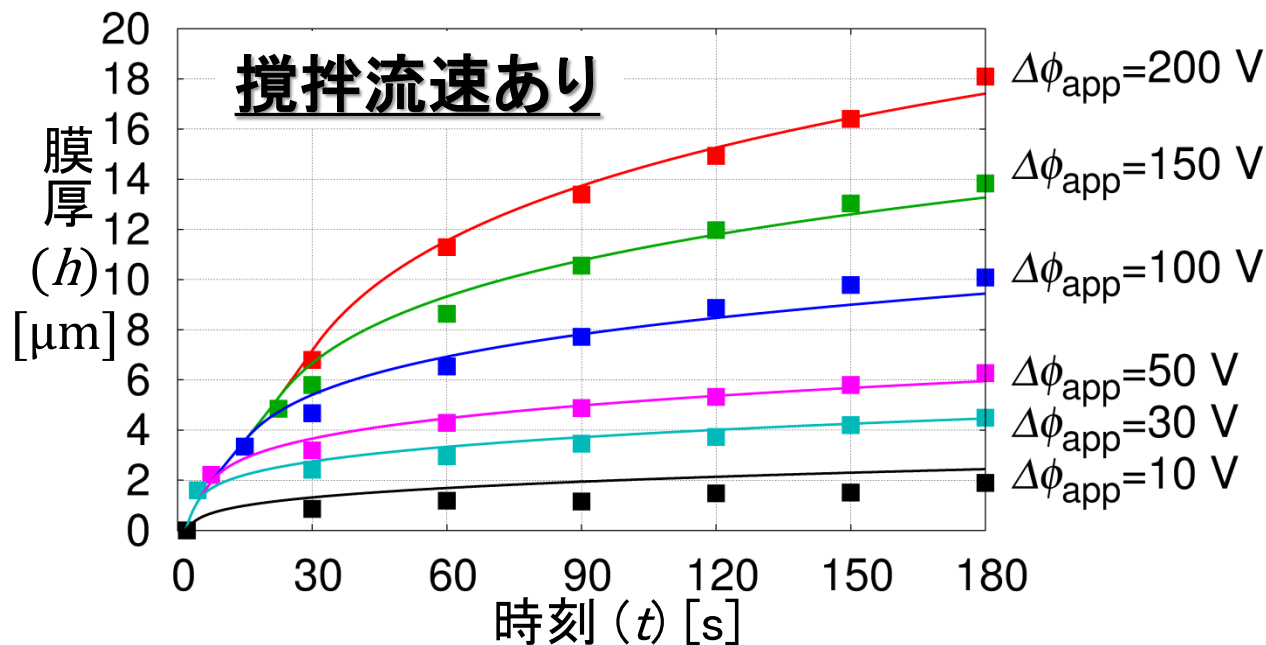


一枚板電着の解析



- 有限要素法を用いて解析
- 攪拌流速2種類(あり, なし)の流速条件を模擬
- 実験と同様の電源電圧時刻歴を与える

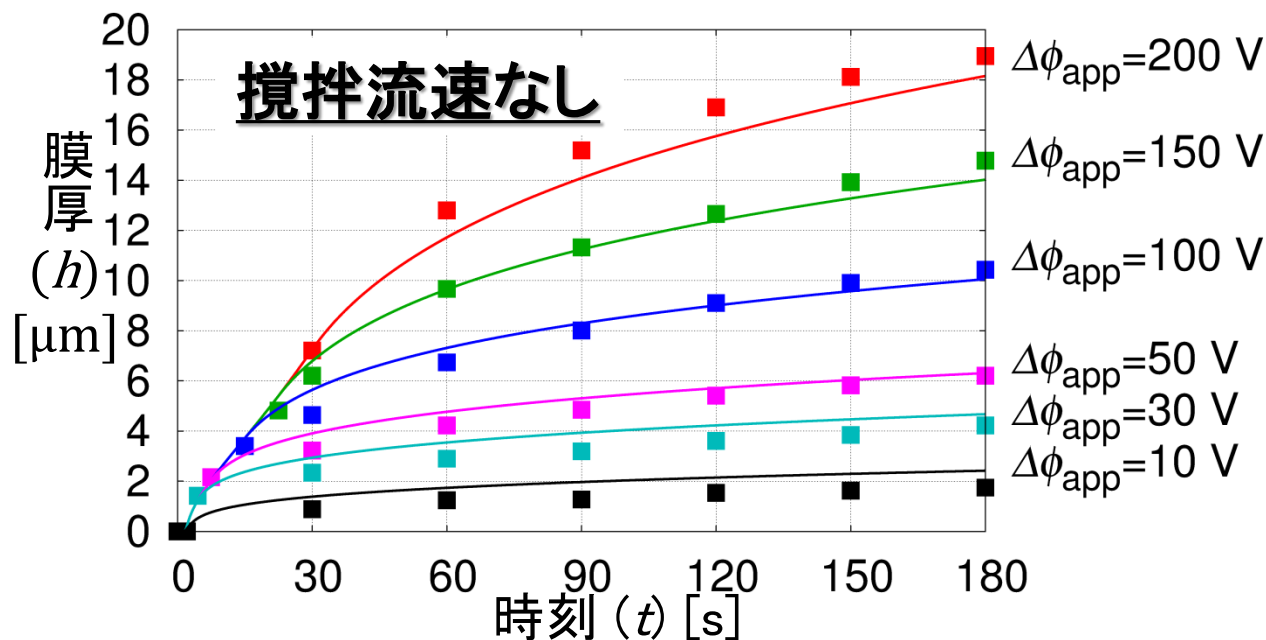
一枚板電着の解析結果(膜厚)



RMSE = 0.534 μm

■ 十分精度の良い結果が出ている

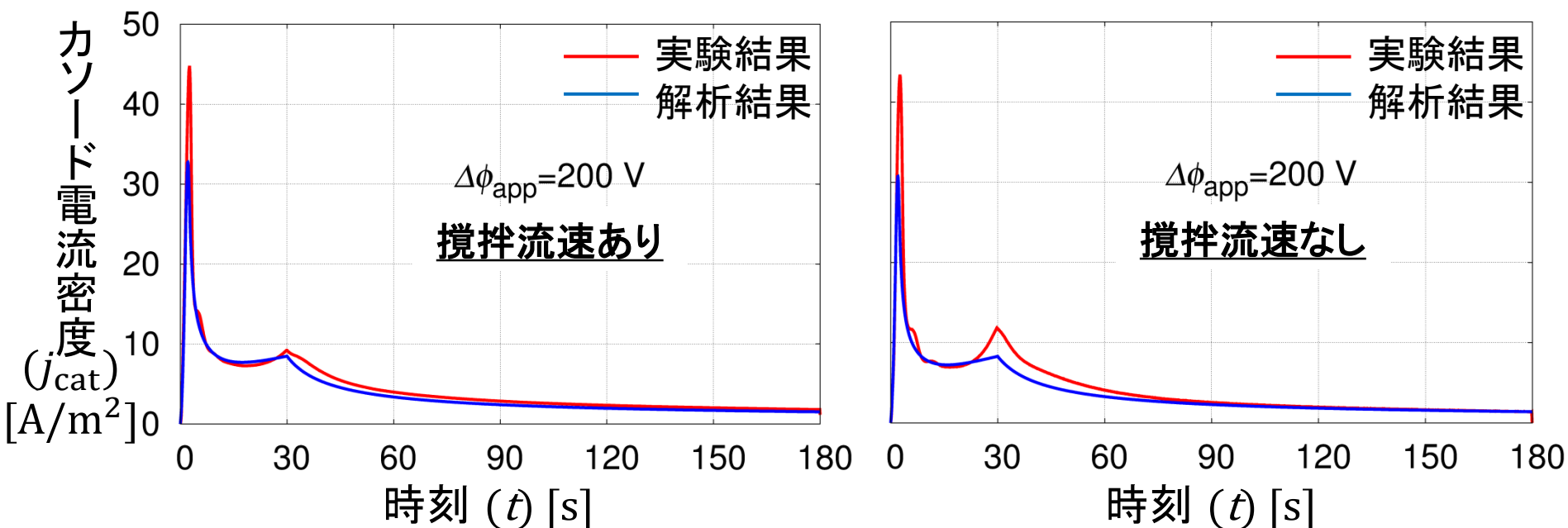
一枚板電着の解析結果(膜厚)



RMSE = $0.765\mu\text{m}$

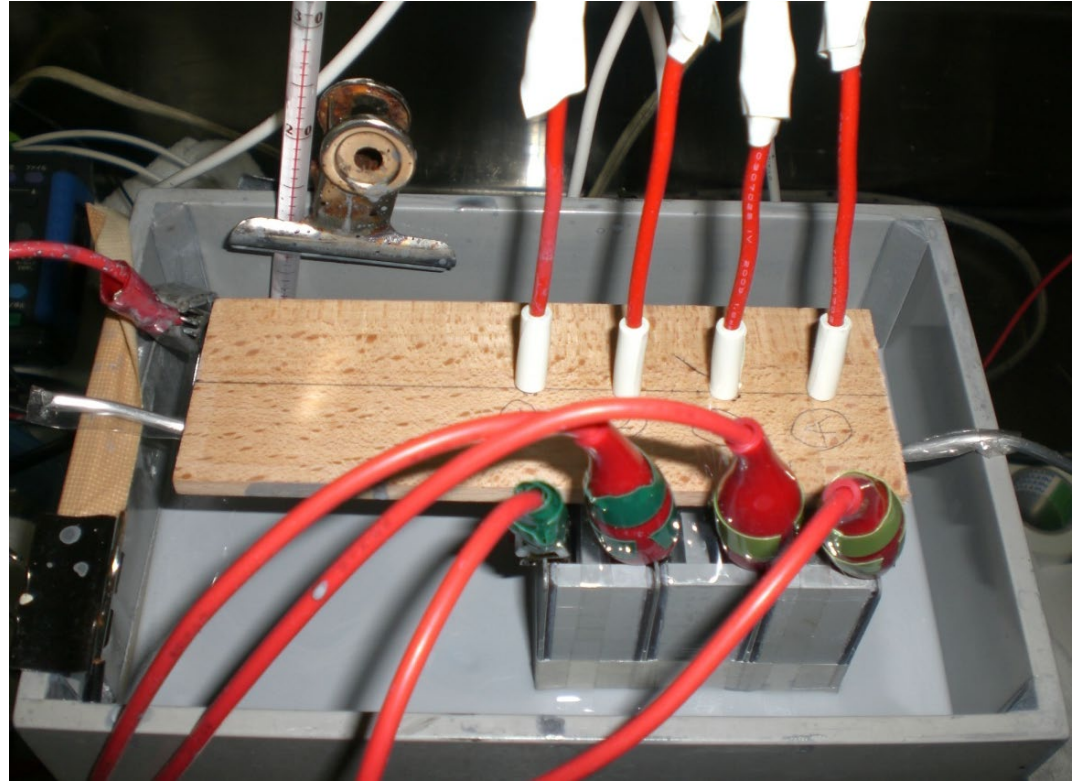
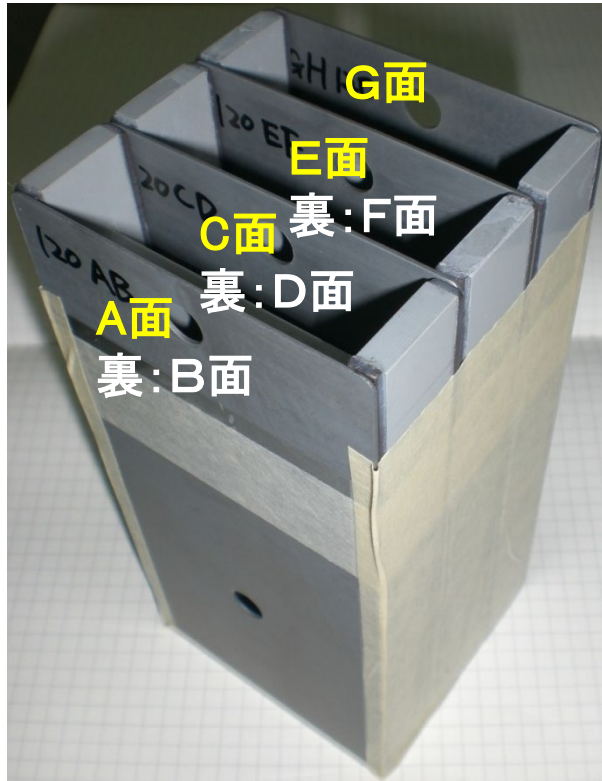
- 十分精度の良い結果が出ている
- 高電圧時に少し誤差がみられる程度

一枚板電着の解析結果(電流密度)



■ 各流速で十分精度の良い結果が出ている

4枚BOXの解析



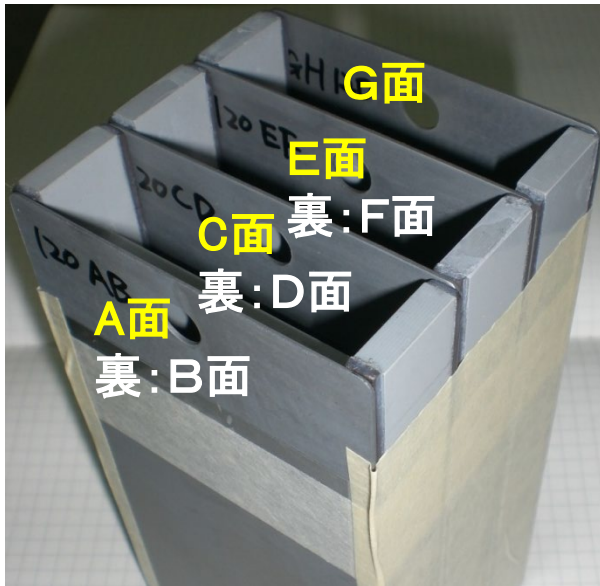
- 有限要素法を用いて解析
- 保持電圧200Vの標準的な電圧時刻歴を与えた
- H面は絶縁

4枚BOXの解析(流速依存性の考慮)

■ 2種類の塗膜析出パラメータを用いる(提案手法)

A面: 攪拌流速ありの塗膜析出パラメータを与える

B~G面: 攪拌流速なしの塗膜析出パラメータを与える



塗膜析出モデルの有効電流比

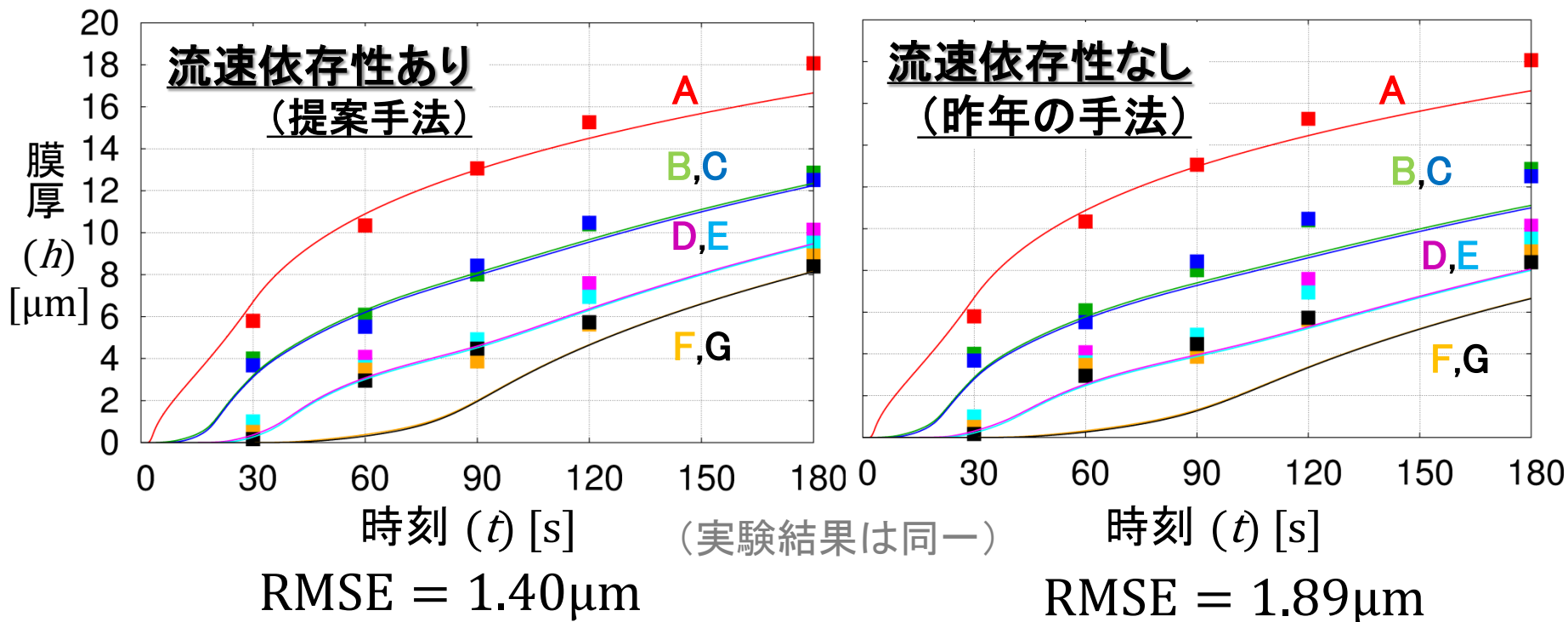
$$\beta(j_{\text{cat}}, \Delta\phi_{\text{pai}}) = 1 - \beta_1 \exp(\beta_2 j_{\text{cat}} \Delta\phi_{\text{pai}})$$

攪拌流速ありと攪拌流速なしの場合の
それぞれ実験して求めたパラメータを
 β_1 , β_2 に与える

■ 単一の塗膜析出パラメータを用いる(昨年手法)

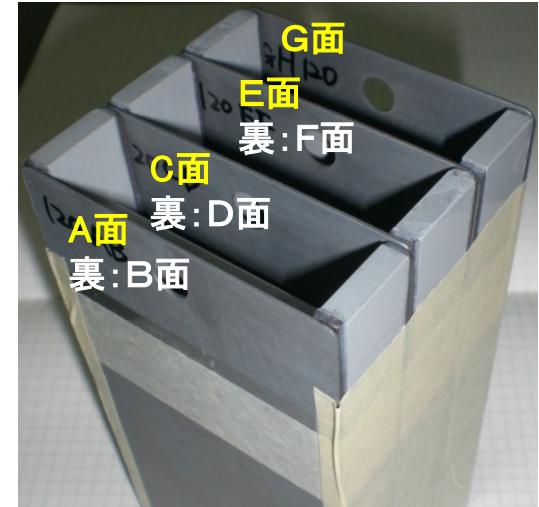
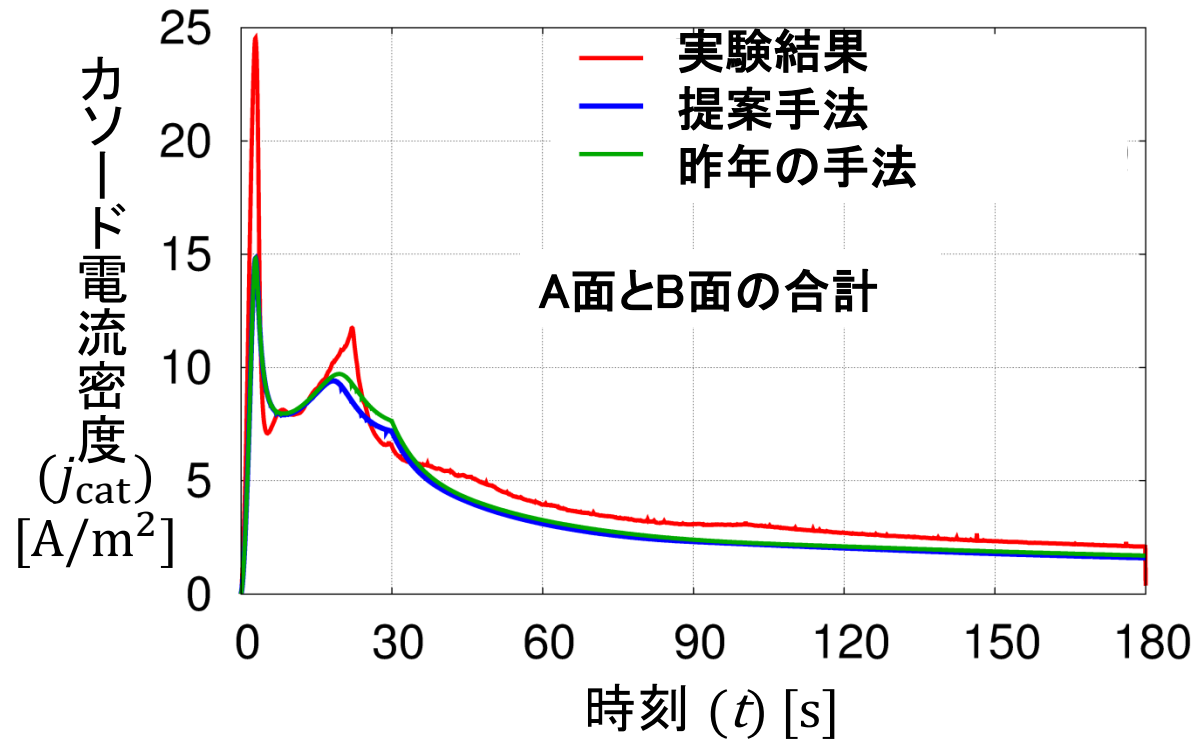
A~G面: 攪拌流速ありの塗膜析出パラメータを与える

4枚BOXの解析結果(膜厚)



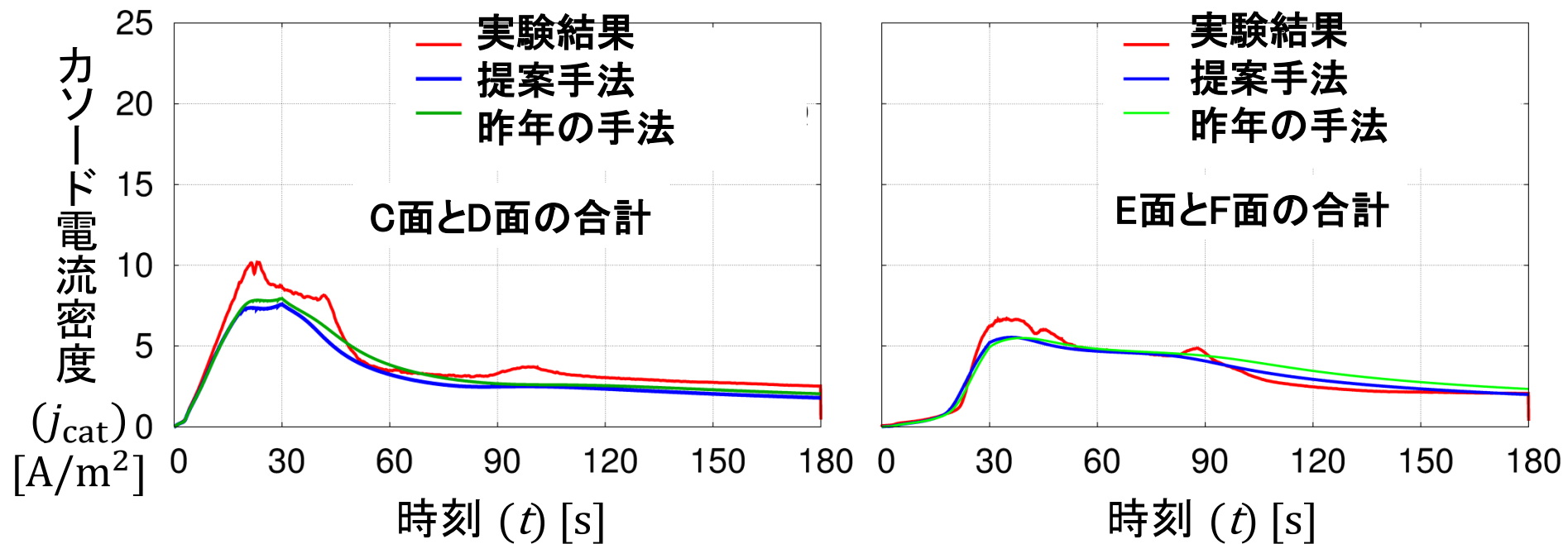
- 昨年手法ではBOXの奥の面で膜厚を小さく見積もっている
- 流速依存性の考慮により最終膜厚の精度改善
- F, G面の析出開始時刻に改善の余地あり

4枚BOXの解析結果(電流密度)



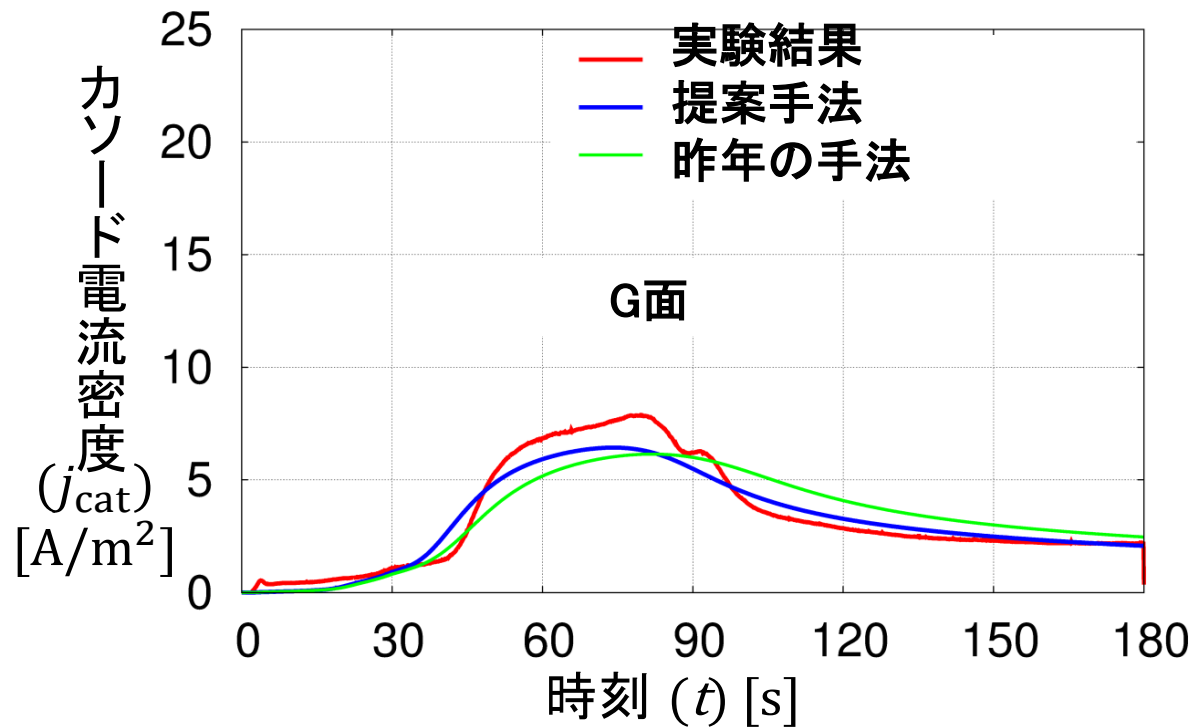
■ 十分精度の良い結果が出ている

4枚BOXの解析結果(電流密度)



■ 十分精度の良い結果が出ている

4枚BOXの解析結果(電流密度)



- 流速依存性を考慮したことで
予測精度の改善がみられる

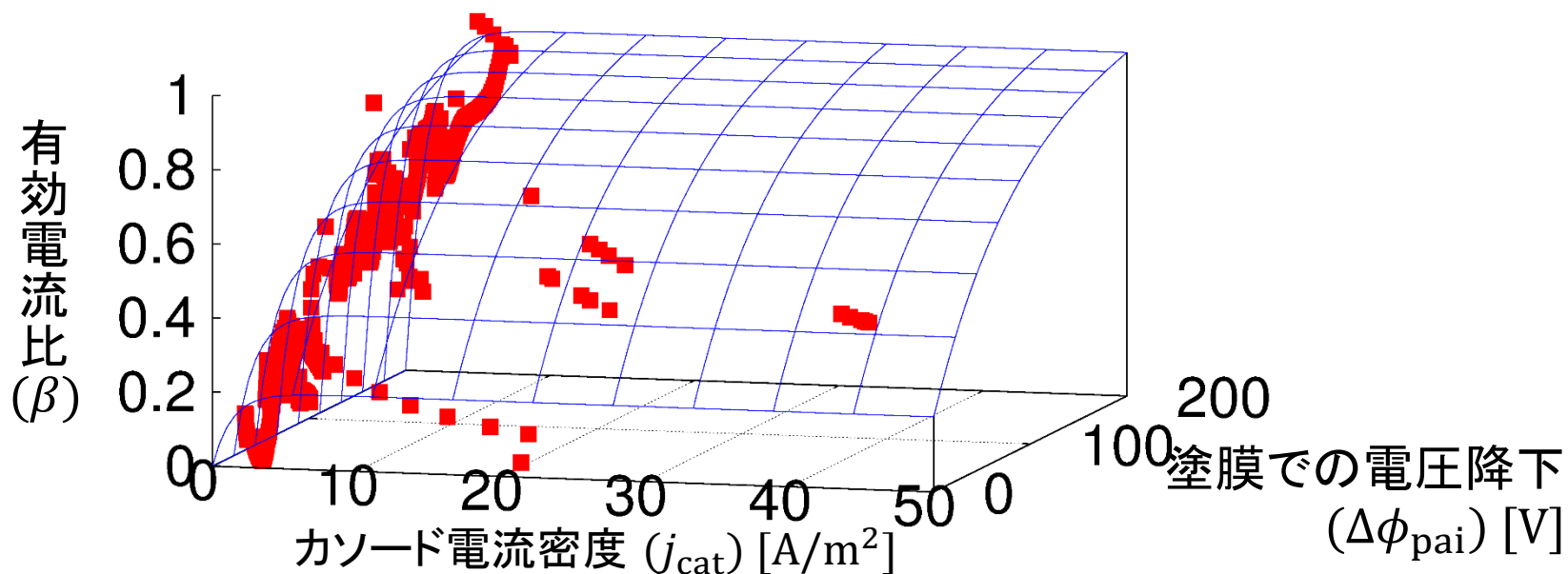
まとめ

まとめ

- 基礎的な電着実験を行い，塗膜析出の流速依存性を考慮した塗膜析出モデルを提案した.
- 塗膜析出の流速依存性を考慮して解析を行うことにより，4枚BOXの膜厚予測が実用的な精度で行えることを示した.

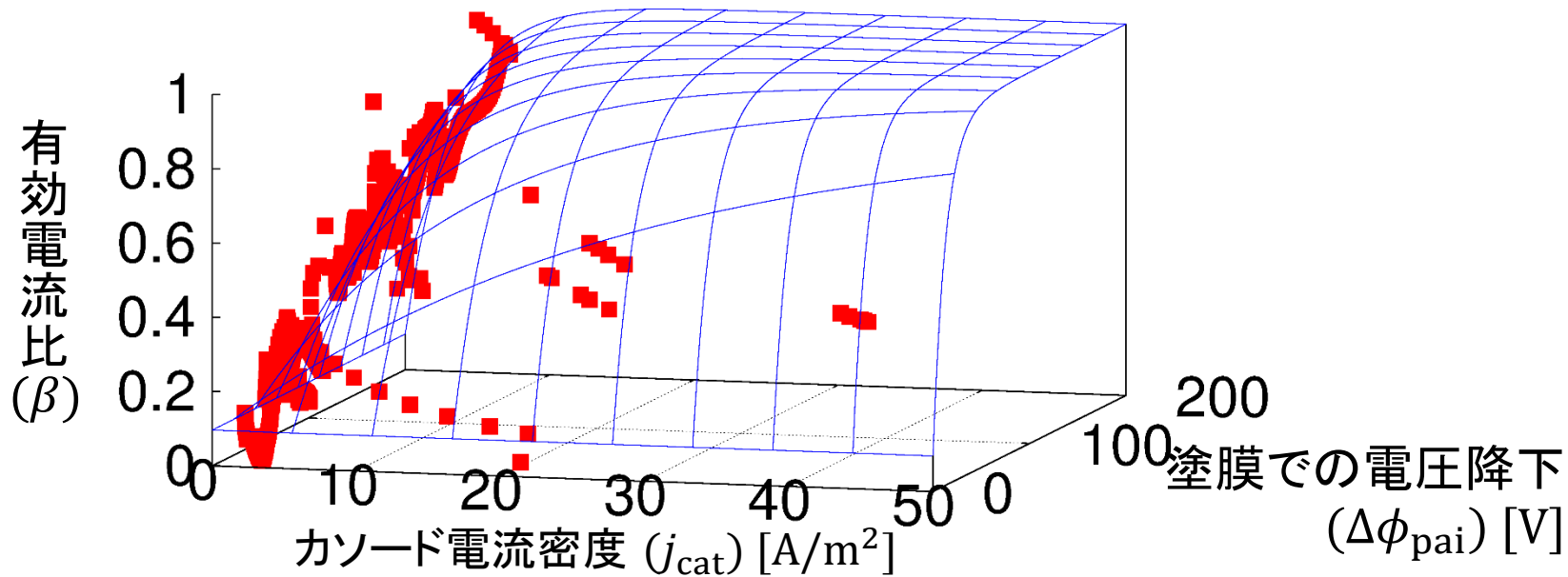
付録

塗膜析出モデルの見直し



- 有効電流比のグラフがうまくフィットしない
- 電流小 \Rightarrow 有効電流比が小さいまま
電流大 \cup 電圧大 \Rightarrow 有効電流比 $\cong 1$

塗膜析出モデルの見直し



$$\beta(j_{cat}, \Delta\phi_{pai}) = 1 - \beta_1 \exp(\beta_2 j_{cat} \Delta\phi_{pai})$$

誤差まとめ

■一枚板電着解析(膜厚[μm])

●攪拌流速あり

10V: 0.585

30V: 0.516

50V: 0.531

100V: 0.571

150V: 0.455

200V: 0.537

All : 0.534

last: 0.591

●攪拌流速なし

10V: 0.558

30V: 0.667

50V: 0.570

100V: 0.482

150V: 0.601

200V: 1.43

All : 0.765

last: 0.665

誤差まとめ

■ 一枚板電着解析 (電流密度 [A/m²])

● 攪拌流速あり

200V: +2.325e+00

(afetr30s): +3.466e-01

150V: +2.454e+00

(afetr30s): +6.131e-01

100V: +2.589e+00

(afetr30s): +4.658e-01

050V: +2.516e+00

(afetr30s): +3.480e-01

030V: +2.812e+00

(afetr30s): +2.547e-01

010V: +4.851e-01

(afetr30s): +1.855e-01

● 攪拌流速なし

200V: +2.328e+00

(afetr30s): +5.159e-01

150V: +2.264e+00

(afetr30s): +7.294e-01

100V: +2.532e+00

(afetr30s): +5.934e-01

050V: +2.490e+00

(afetr30s): +3.484e-01

030V: +2.875e+00

(afetr30s): +2.822e-01

010V: +6.417e-01

(afetr30s): +2.123e-01

誤差まとめ

■ 4枚BOX(膜厚[μm])

● 提案手法

A: 0.941

B: 1.10

C: 1.08

D: 1.18

E: 0.900

F: 2.03

G: 2.04

all: 1.40

last: 0.949

● 昨年の手法

A: 0.917

B: 1.64

C: 1.63

D: 1.88

E: 1.56

F: 2.55

G: 2.54

all: 1.89

last: 2.02