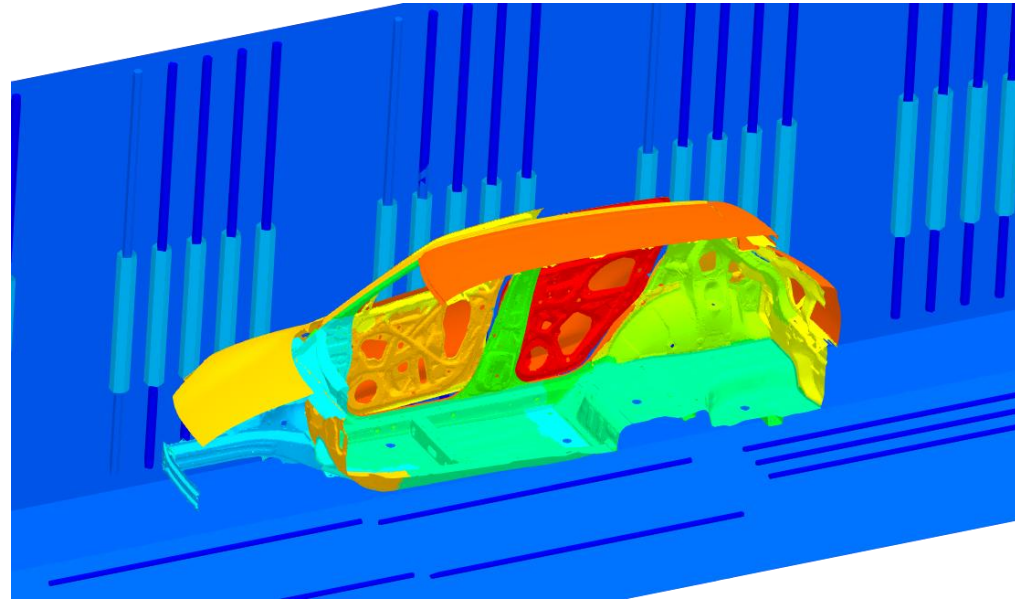
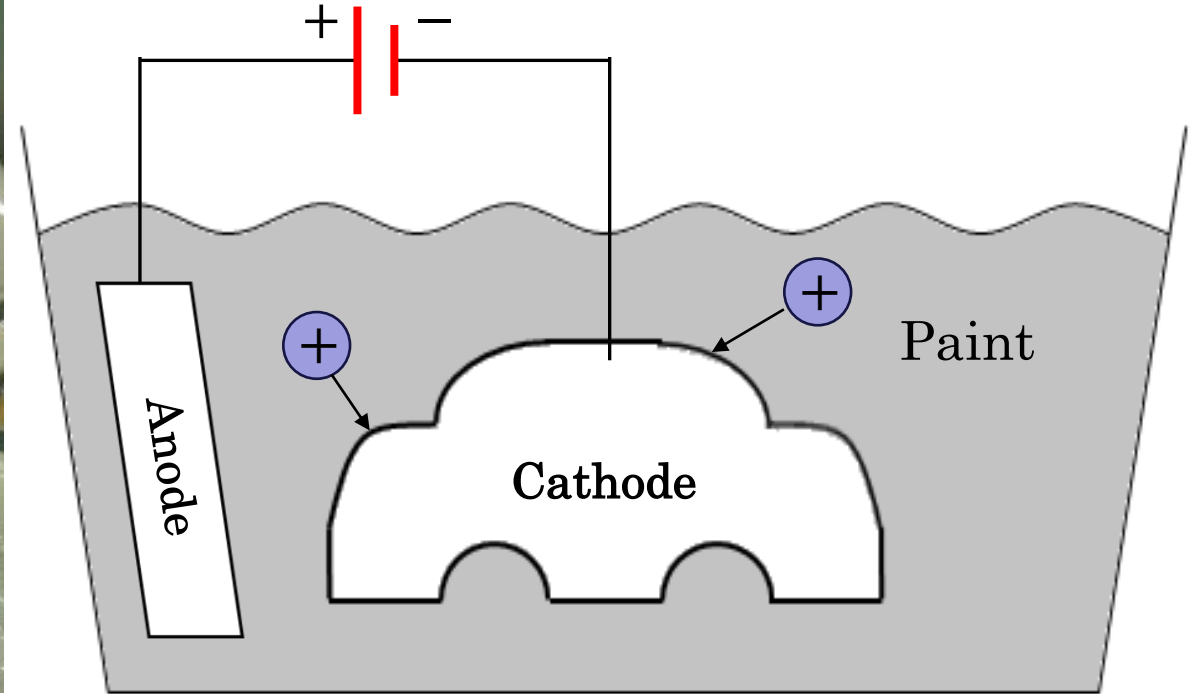


EDESFEM

電着塗装の付きまわりシミュレーション専用
数値解析ソフトウェア



電着塗装とは？



- 塗料溶液中に全没させた車体に**直流電流**を流し、車体表面に塗膜を析出させる塗装法.
- 自動車車体を含む様々な金属製品を**腐食**から保護するための**防食用下塗り工程**として幅広く利用されている.
- **複雑形状**を持つ車体でも比較的均一な成膜が可能.

電着塗装の重要性



- 車体の安全性/健全性に関する検査(実車衝突試験など)は、通例、腐食のない新車でのみ実施される.
- しかし、現実には**腐食**が進むと新車の時と比べて**強度や剛性が著しく低下**してしまう.
- すなわち、**腐食**により新車で評価した車体の安全性/健全性は簡単に陳腐化する.

∴電着塗装は自動車の安全性/健全性にとって極めて重要.

電着工程の車体設計への影響

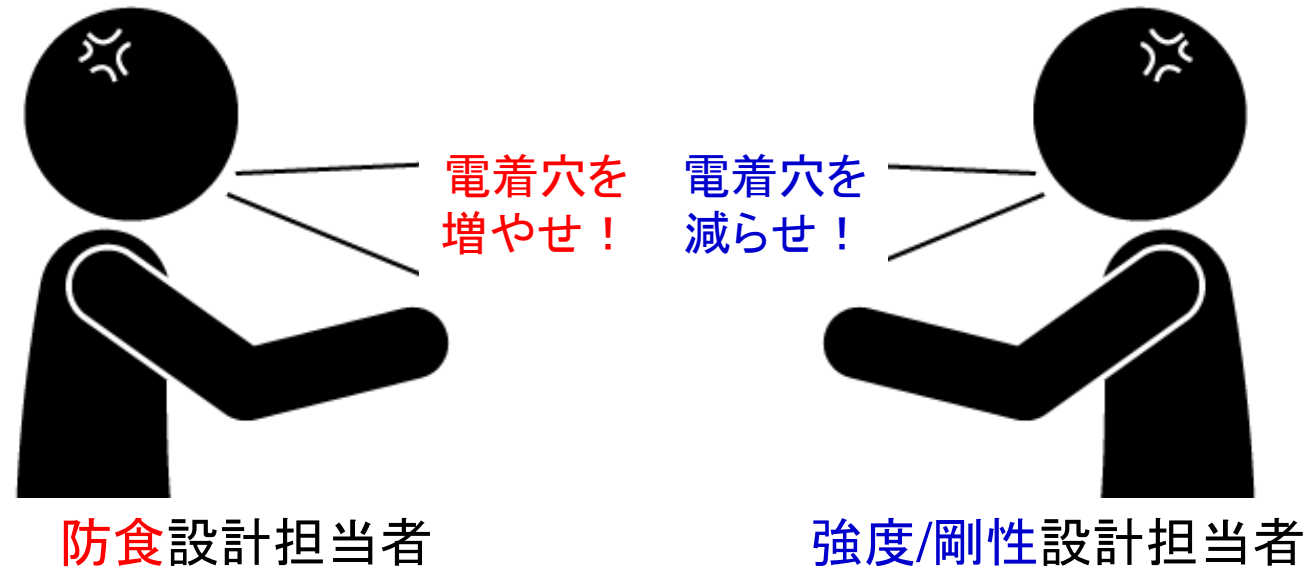


- **車体足回り**は厳しい**腐食**環境に晒される。
(**海水**や**融雪剤**のある環境では一段と厳しい。)
- 従って、足回り部品では全面に渡って最低限の厚さの塗膜が成膜されることを保証する必要がある。
- **サイドシル**等は合わせ部を持つ複雑な袋状構造であるため、その内部に塗膜を析出させるには電着時に電流の通り道となる「**電着穴**」を多数空ける必要がある。

∴電着穴の位置とサイズを含め、車体設計には電着工程の理解と考慮が不可欠。

電着塗装シミュレーションの必要性

- 電着穴は防食にとっては必要不可欠である一方、強度/剛性にとっては迷惑な存在.
- よって、車体設計の現場では次の様な争いが起こり得る.



電着塗装シミュレーションを行えば、
この様な争いが後腐れなく解決され、
車体の最適設計に繋がります。

- その他、電着条件変更による膜厚変化の事前検討、付きまわり不良の原因究明と短期改善などに対しても、電着塗装シミュレーションは勿論有効です。

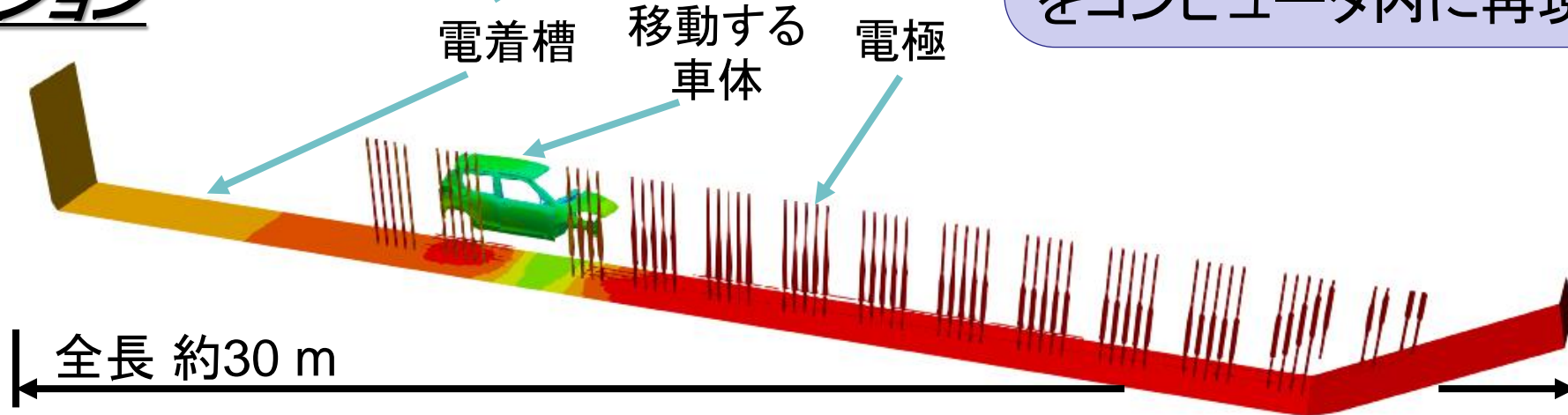
電着塗装シミュレーションとは？

実ライン

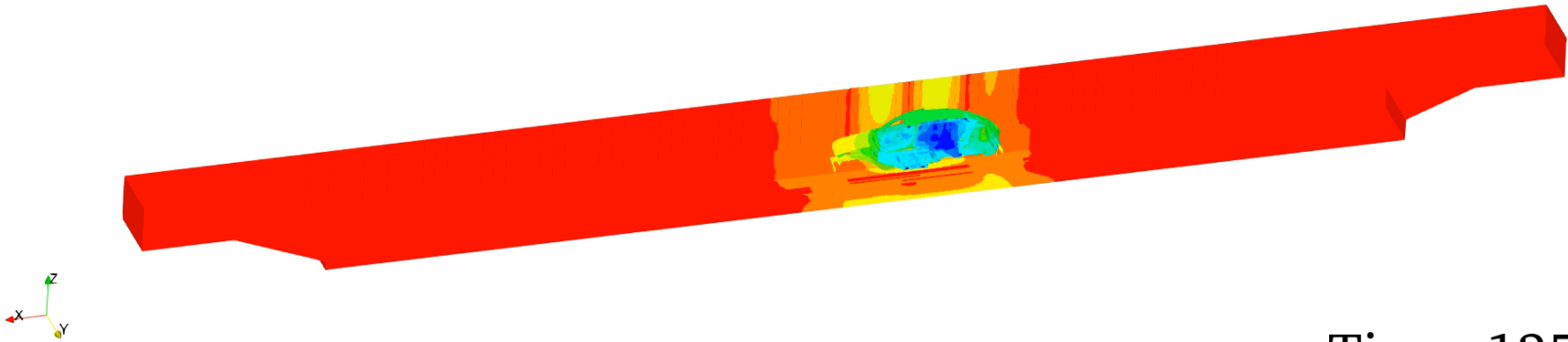


1. 電着槽
 2. 移動する車体
 3. 電極
- をコンピュータ内に再現する方法.

シミュレーション



電着塗装シミュレーションとは？



Time: 135.0 (s)

■ 支配方程式：

塗料領域における静電場のラプラス方程式 ($\nabla^2 \phi = 0$) .

■ 境界条件：

1. 壁(絶縁)境界,
2. アノード(電極表面)境界,
3. カソード(車体表面)境界:
塗膜抵抗/成長の構成則モデル ← ラボ実験で同定

■ 結果出力：

- 表面電位,
- 電流密度,
- 膜厚 などの時刻歴
→ 最終膜厚分布の予測が主目的

高精度電着塗装シミュレーションの要件

① 正確な形状：

- 狭小な袋部形状や電着穴を再現した上質な車体メッシュ生成 ← ユーザー努力が不可欠
- 複数車体の槽内移動の正確な再現

② 正確な支配方程式とその解法：

- 電気伝導率の正確な測定 ← ラボ実験で同定可能
- メッシュ収束の速いFEMの利用 ← 次世代FEM(ES-FEM-T4)が利用可能

③ 正確な境界条件：

- 塗膜抵抗・成長・析出開始モデル(車体表面境界条件)の正確な同定 ← ラボ実験で同定可能
- 内外板の区分けによる攪拌の有無の指定 ← Assortment機能で実施可能
- 隔膜電極1本毎の経年劣化度(電極表面境界条件)の正確な推定 ← 工場モニタリングが不可欠
- サイリスタ電源制御等を含む印加電圧時刻歴の正確な設定

車体のメッシュ生成と隔膜電極の境界条件設定が鬼門となりますが、顧客へのアドバイス等は可能ですのでご相談ください。



EDESFEM

の4特徴

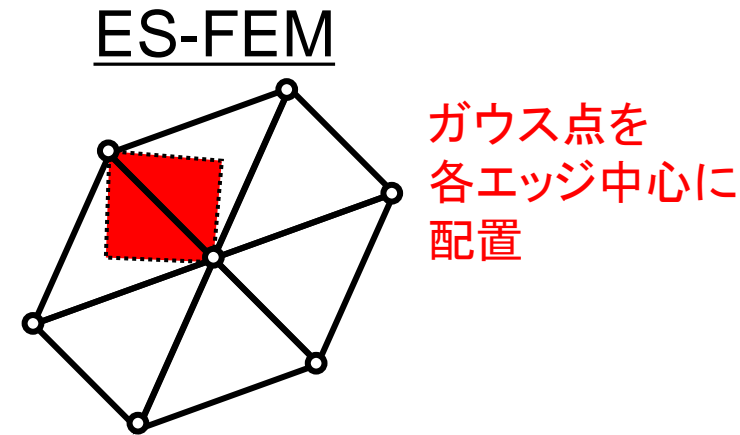
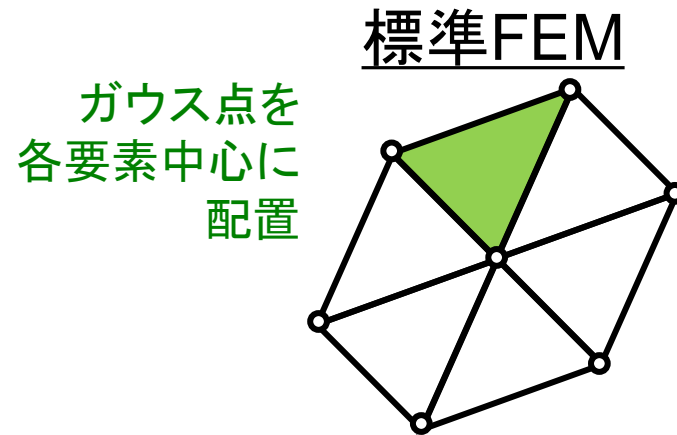


特徴 1 : 4 節点四面体メッシュでも高精度

有限要素定式化に平滑化有限要素法(S-FEM)を採用(業界初)

- 平滑化有限要素法(S-FEM)は次世代の有限要素法として近年活用が進んでいる.
- EDESFEMでは4節点四面体メッシュの各エッジにガウス点を配置するエッジベースのS-FEM(ES-FEM-T4)を採用.

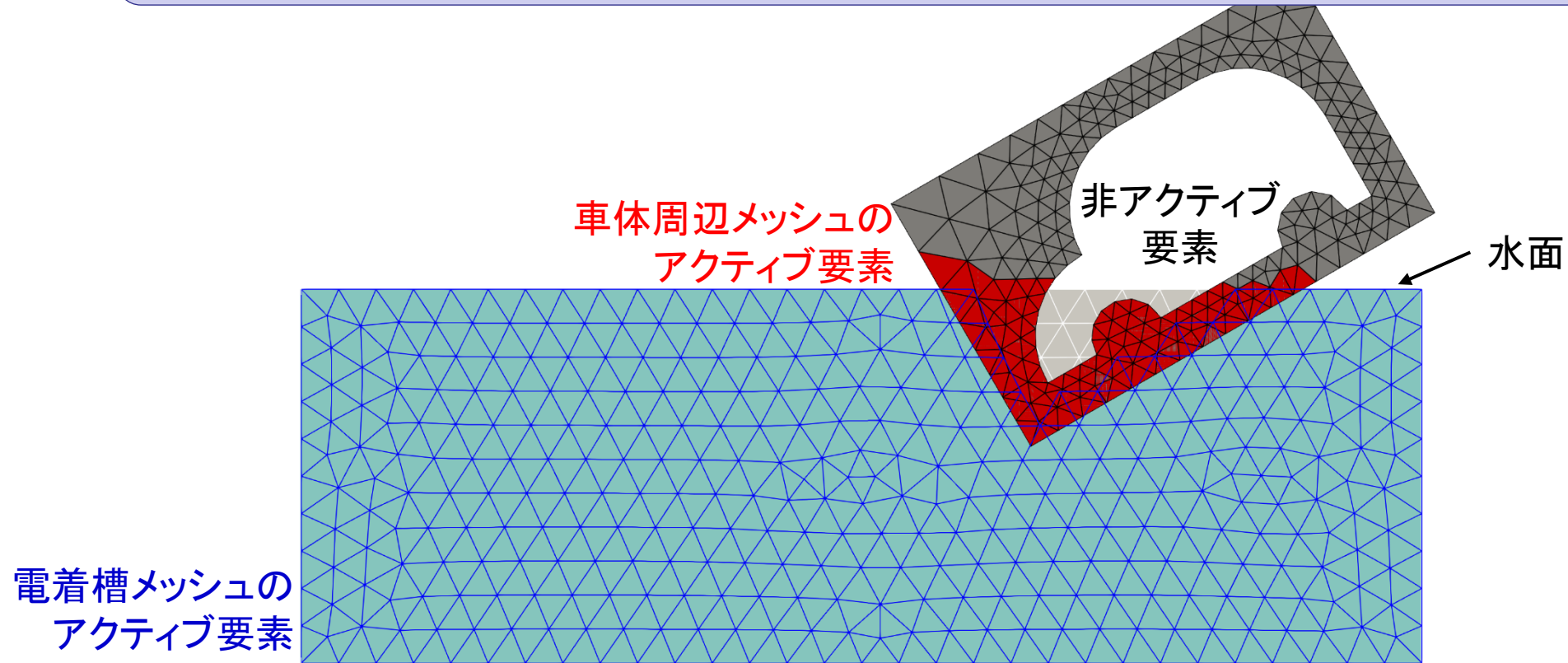
簡単のため
2次元で表示



- 4節点四面体メッシュにも関わらず, 2次要素と同等のメッシュ収束速度が得られる.
- 電着穴周辺など, 2次要素やカーテシアン系のメッシュでは要素数が過剰に増えてしまう場所でも, 4節点四面体メッシュなら必要最小限の要素数で計算が可能.

特徴 2 : 複数台の槽内移動解析に対応

オーバーセットメッシュ法により, 複数台の槽内移動解析が可能



- ユーザーは電着槽メッシュおよび車体周辺メッシュ(車種数分)を用意し, 各車体の移動パターンを入力するだけ.
- 多点拘束(MPC)により, EDESFEM内部でメッシュ同士が界面で自動的に結合される.

特徴 3 : 並列計算による高速化が可能

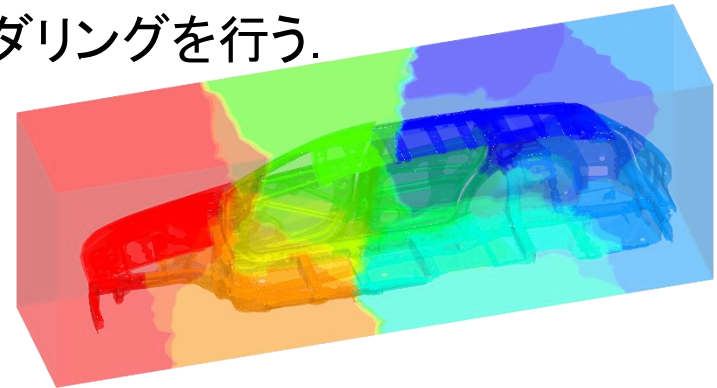
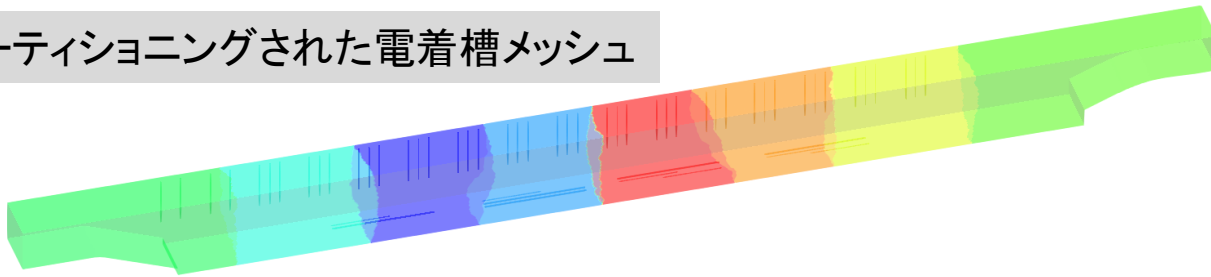
MPI/OpenMPハイブリッド並列により, 種々のHPC環境に対応

■ EDESFEMは**多ノード/マルチコアCPUのHPC環境**で計算を実行できる.

■ 解析手順:

1. 電着槽メッシュと車体周辺メッシュを4節点四面体で作成する.
2. METISを使用し, 各メッシュのパーティショニングとリオーダリングを行う.

パーティショニングされた電着槽メッシュ



パーティショニングされた車体周辺メッシュ

3. メッシュファイル名, 境界条件, 移動パターン等が記載された入力ファイルを用意する.
4. 解析を実行する. OpenMPIを用いるLinux環境での実行コマンド例は次の通り.

```
orterun -np 64 -map-by numa -bind-to numa  
-x OMP_NUM_THREADS=8 -x numactl -l edesfem.bin input_file_name.ied
```

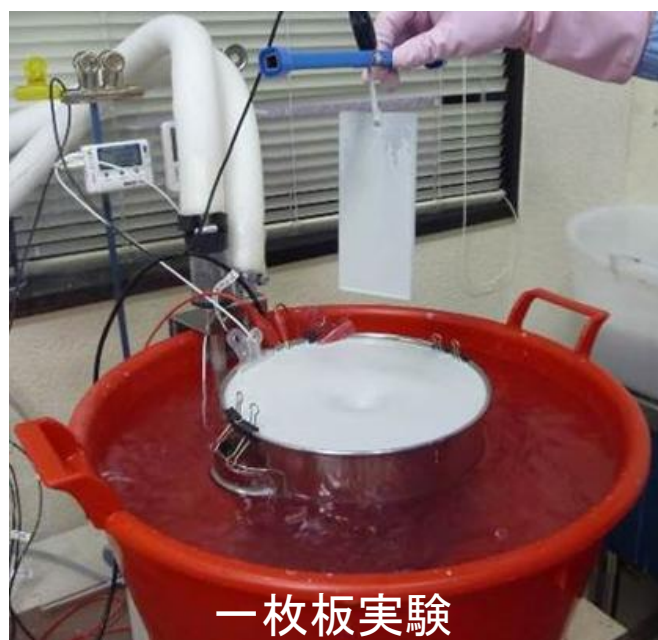


特徴 4 : 内板の析出遅れを忠実に再現

詳細な電着ラボ実験に基づく**最新の電着数理モデル**を搭載

- 電着塗装では電着穴内部の内板の膜厚が重要.
- 内板の析出挙動を数理モデルに落とし込むには詳細なラボ実験が不可欠.

https://www.a.sc.e.titech.ac.jp/~yuki/ed_exp_lab/index-j.html



一枚板実験



4枚ボックス実験



回流槽実験

- EDESFEMには**最新の実験的知見**から得られた電着数理モデルが実装されている.
- 非物理的な「**合わせ込み**」作業の削減に貢献.

EDESFEM

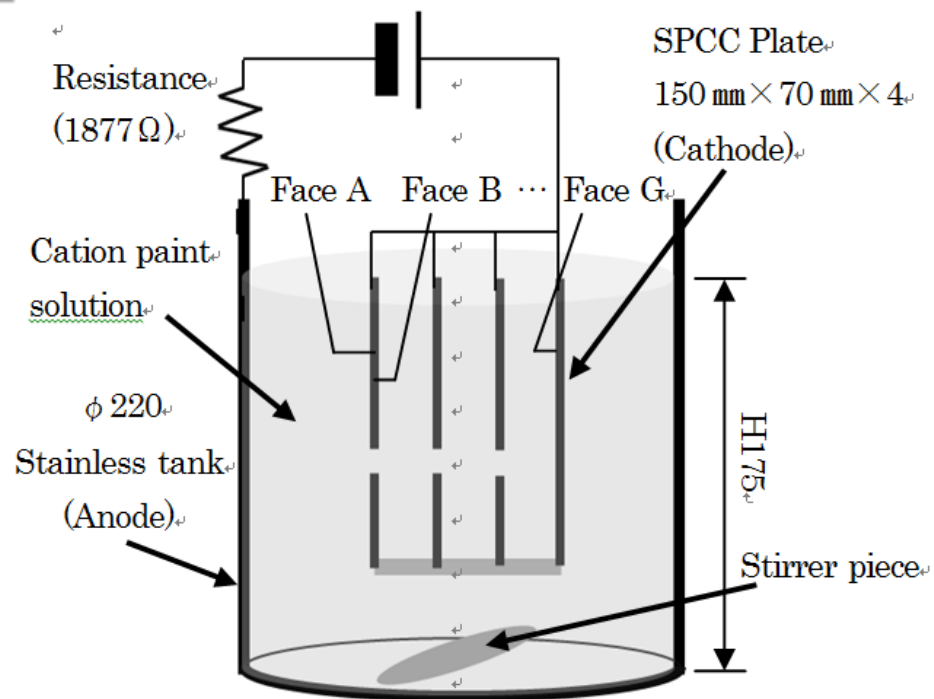
検証解析例 1

4 枚ボックス解析

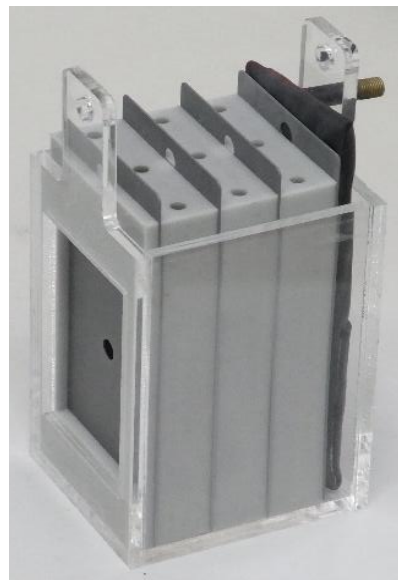


4枚ボックス解析

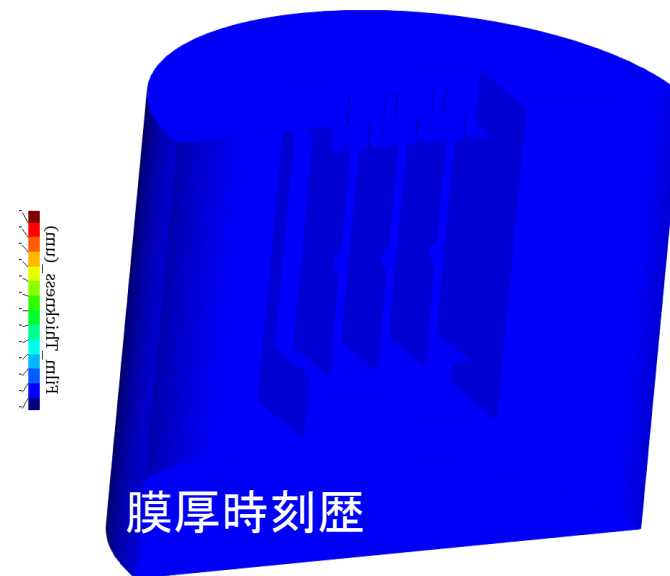
概要



- 4枚の板で3つの袋を構成.
- 3つ目の袋部に塗膜が析出し辛い.



4枚ボックスの写真



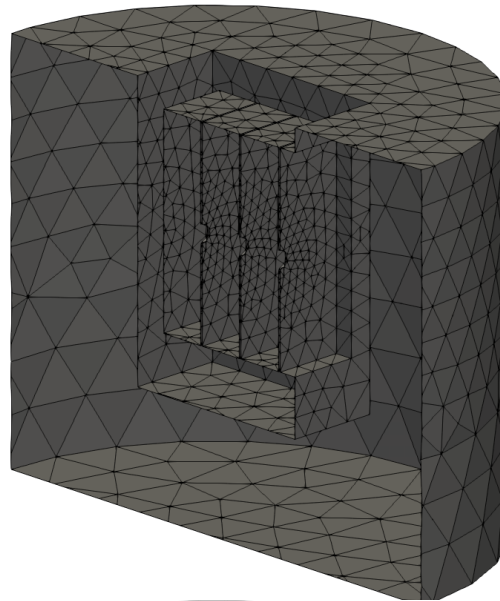
膜厚時刻歴

- サイドシルの様な袋状構造をラボで再現.
- 最奥面 (Face G) の膜厚が重要.
- 密度の異なる4種類のメッシュを用意し, 標準FEM(FEM-T4)とEDES FEM(ES-FEM-T4)で精度を比較.

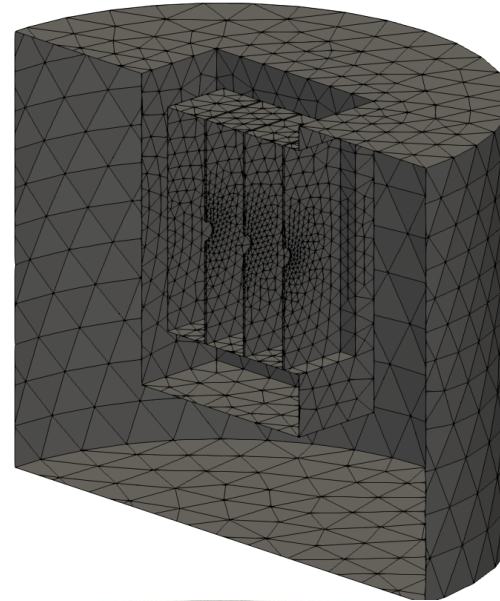
4枚ボックス解析

4種類のメッシュ

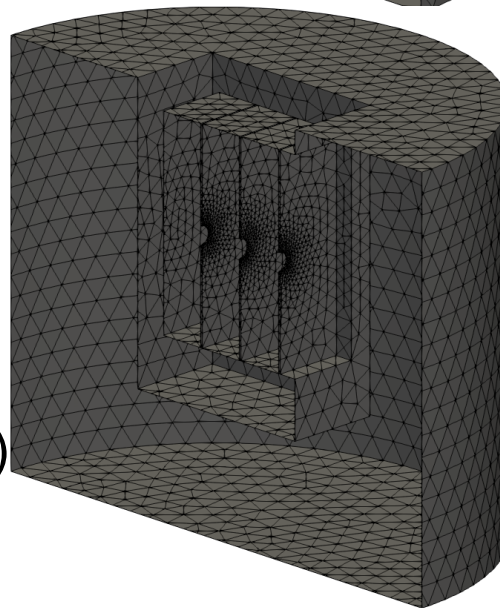
3.2 mmメッシュ
(要素数: 約3万)



1.6 mmメッシュ
(要素数: 約7万)



0.8 mmメッシュ
(要素数: 約17万)



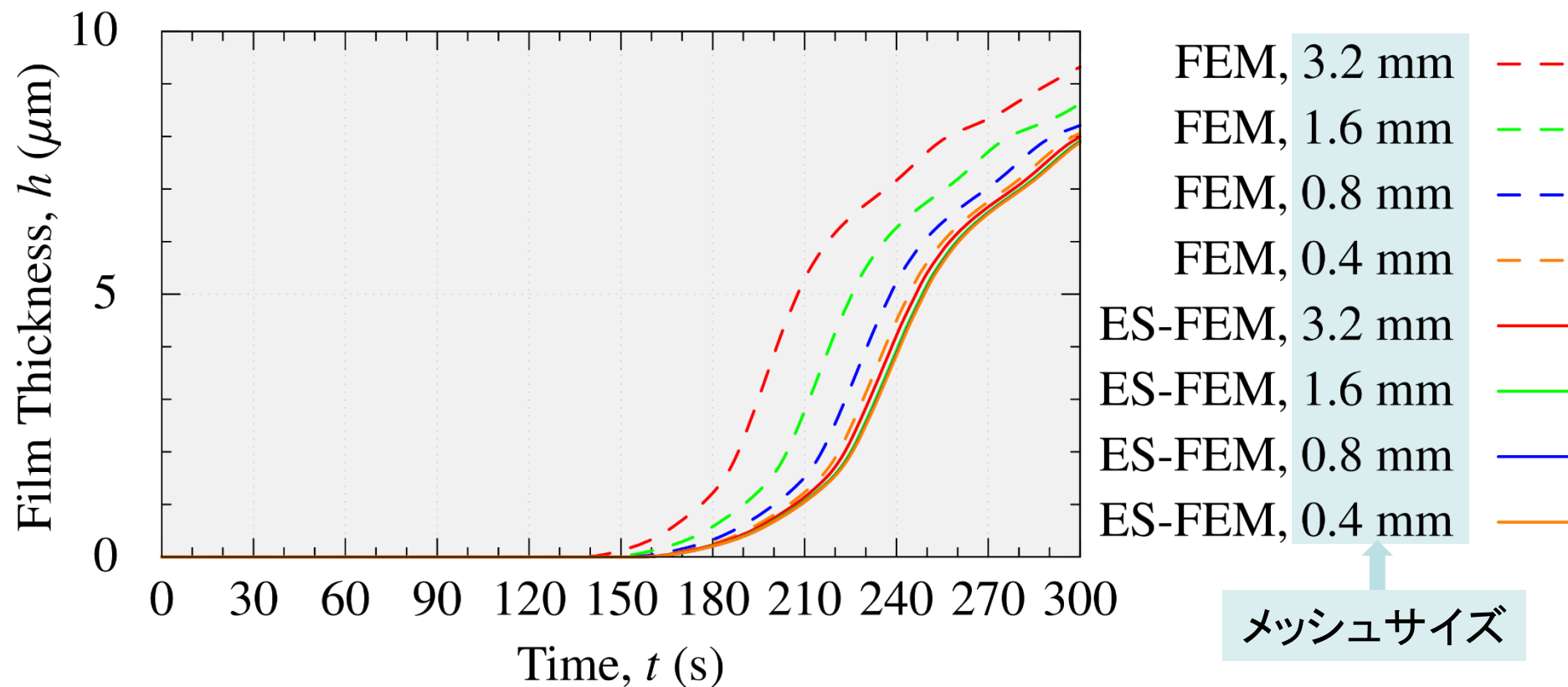
0.4 mmメッシュ
(要素数: 約72万)



表面メッシュ
のみを表示

4枚ボックス解析

最奥面の膜厚時刻歴

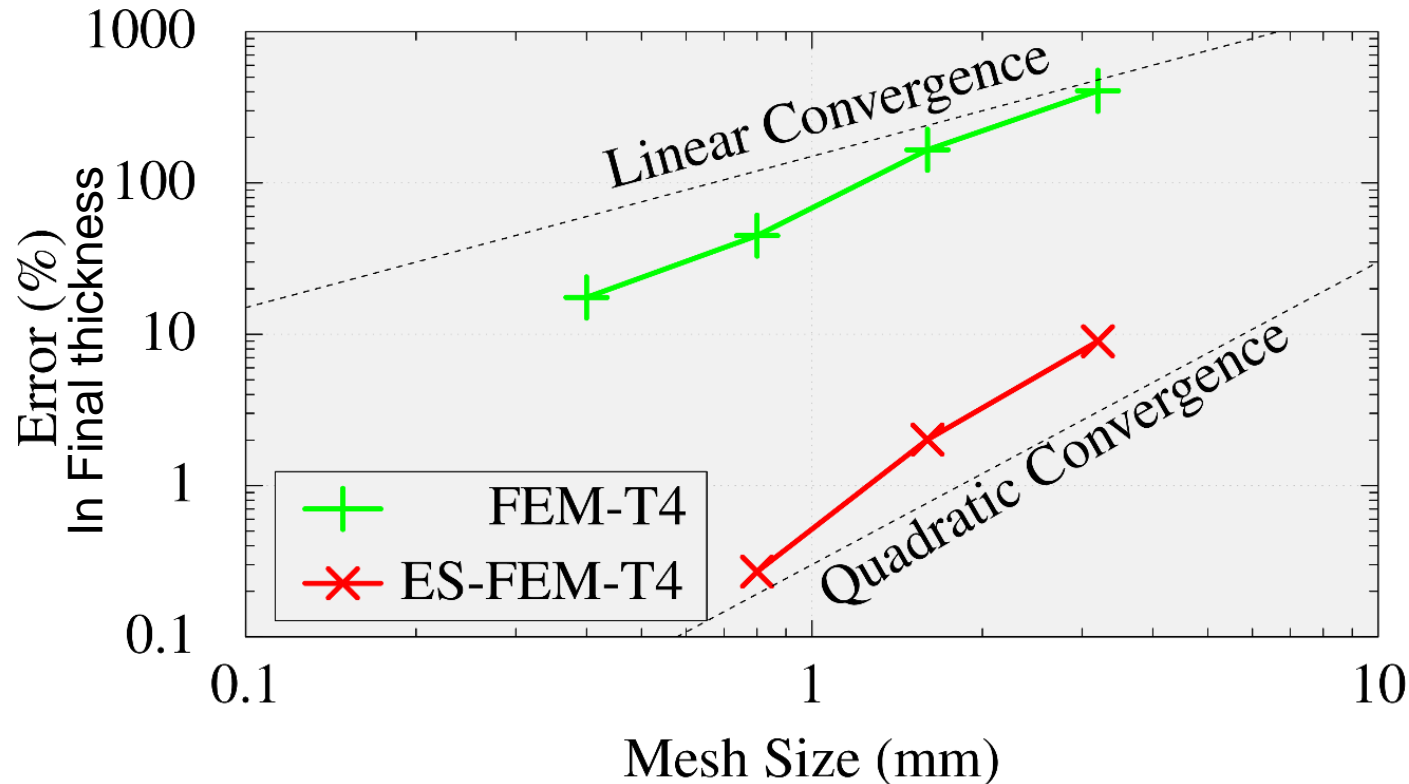


標準FEMの解析結果(破線)は誤差が大きい.

他方, EDESFEM(ES-FEM)の解析結果(実線)はほぼ誤差が無く,
メッシュ収束速度が極めて速いことが分かる.

4 枚ボックス解析

最奥面の膜厚のメッシュ収束速度比較



最も細かいメッシュ
(0.4 mm)を用いた
ES-FEMの解析結果
を参照解とした。

- 標準FEMのメッシュ収束速度は1次.
- EDES FEM(ES-FEM)のメッシュ収束速度は2次.

EDES FEMが採用するES-FEM-T4は
標準FEMよりも遥かにメッシュ収束速度が速い.



4枚ボックス解析

計算時間比較

PC (Intel i9-9960X) で1個のCPU (16コア) を使用

メッシュサイズ	標準FEM (FEM-T4)	EDES FEM (ES-FEM-T4)
3.2 mm	7 s	10 s
1.6 mm	8 s	14 s
0.8 mm	12 s	26 s
0.4 mm	41 s	125 s

同等
精度

- メッシュが同じなら, EDES FEMは標準FEMより約2~3倍遅い.
- 精度が同じなら, EDES FEMは標準FEMより約4倍速い.

EDES FEMが採用するES-FEM-T4は
標準FEMよりも遥かに効率的である.

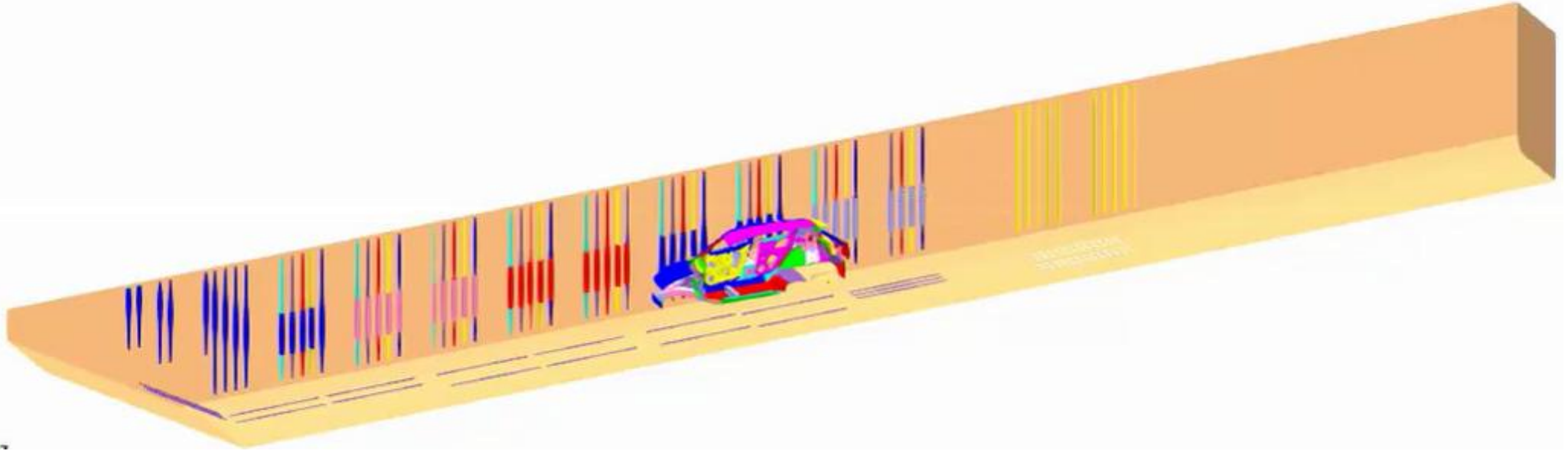
EDESFEM

検証解析例 2

実ライン解析



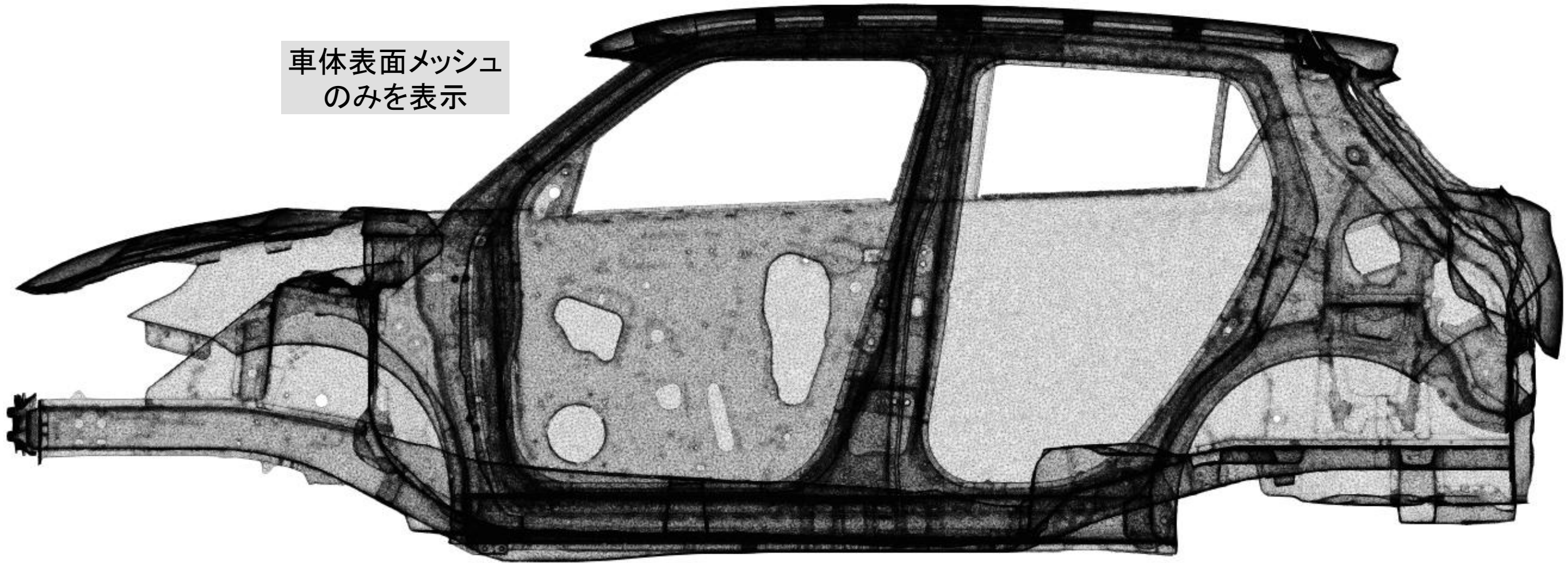
概要



- 電着槽および車体の右半分のみを考慮した面対称の解析.
- 槽・車体・電極の形状および車体の移動を全て再現.
- 300秒間の現象を約1000時間ステップで解析(平均時間増分 $\Delta t = 0.3$ 秒).
- 密度の異なる3種類のメッシュを用意し, 標準FEM(FEM-T4)とEDES FEM(ES-FEM-T4)で精度を比較.

10M要素の車体周辺メッシュ

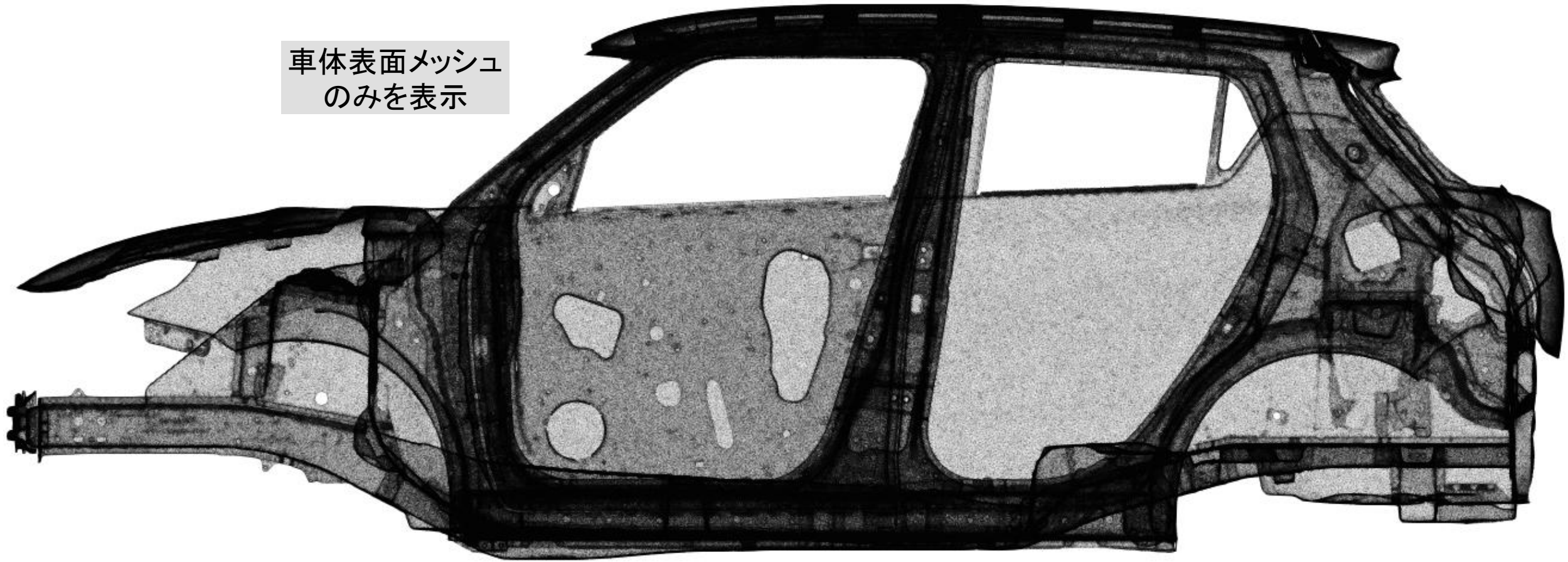
車体表面メッシュ
のみを表示



- 鋼板間の狭い隙間に多数の電着穴があることが確認できる.

16M要素の車体周辺メッシュ

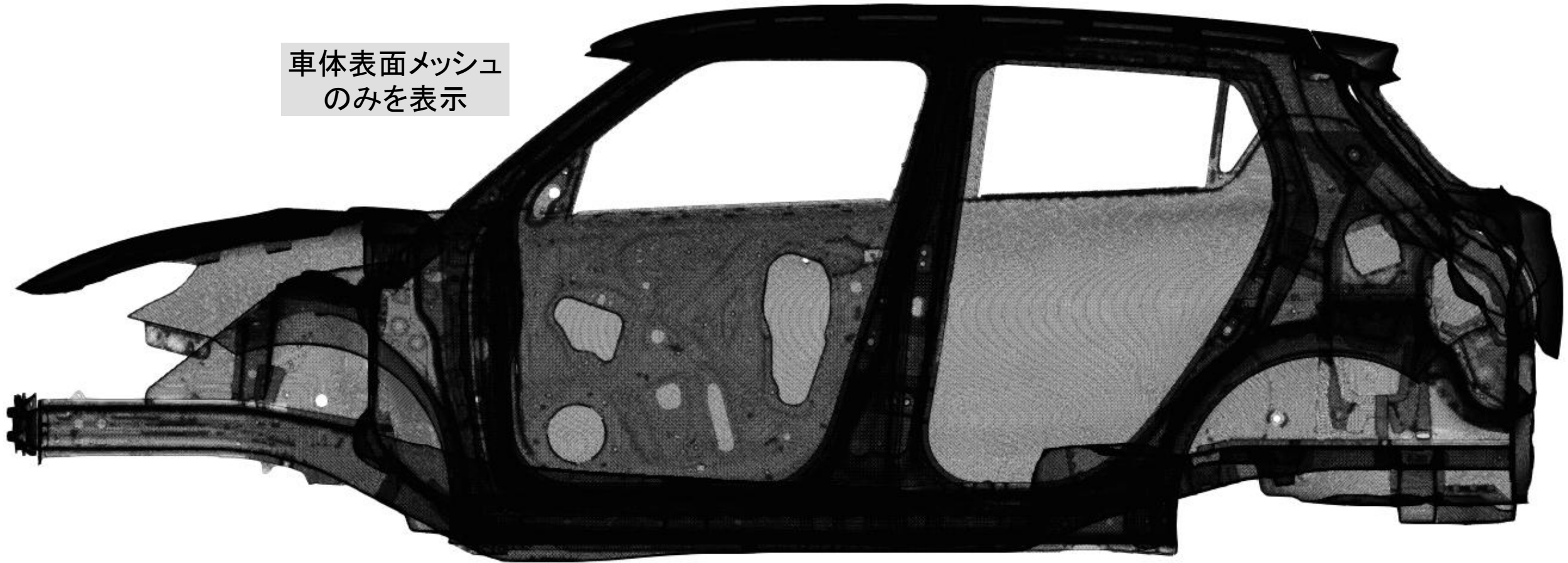
車体表面メッシュ
のみを表示



- 鋼板間の狭い隙間に多数の電着穴があることが確認できる.

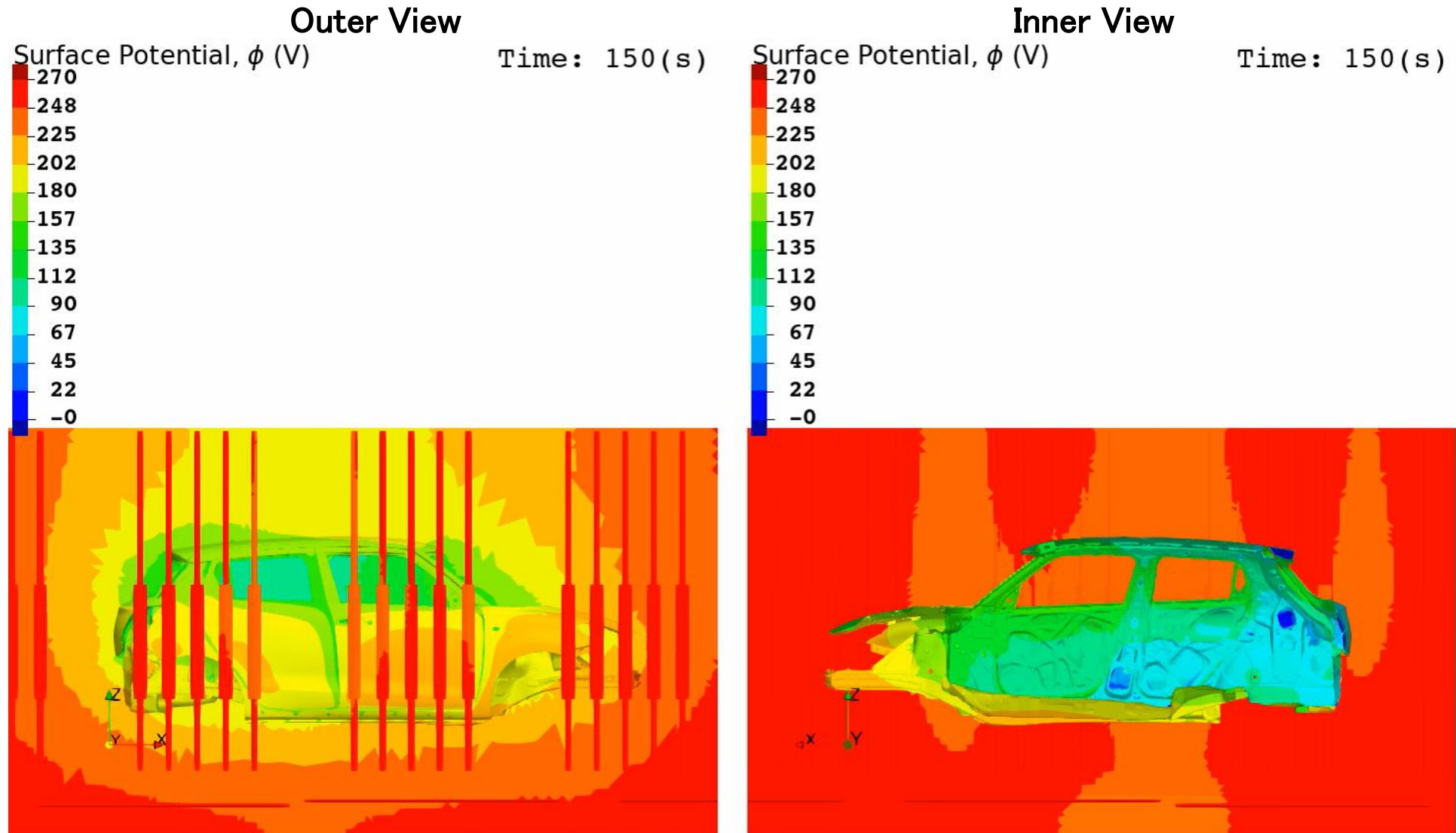
51M要素の車体周辺メッシュ

車体表面メッシュ
のみを表示

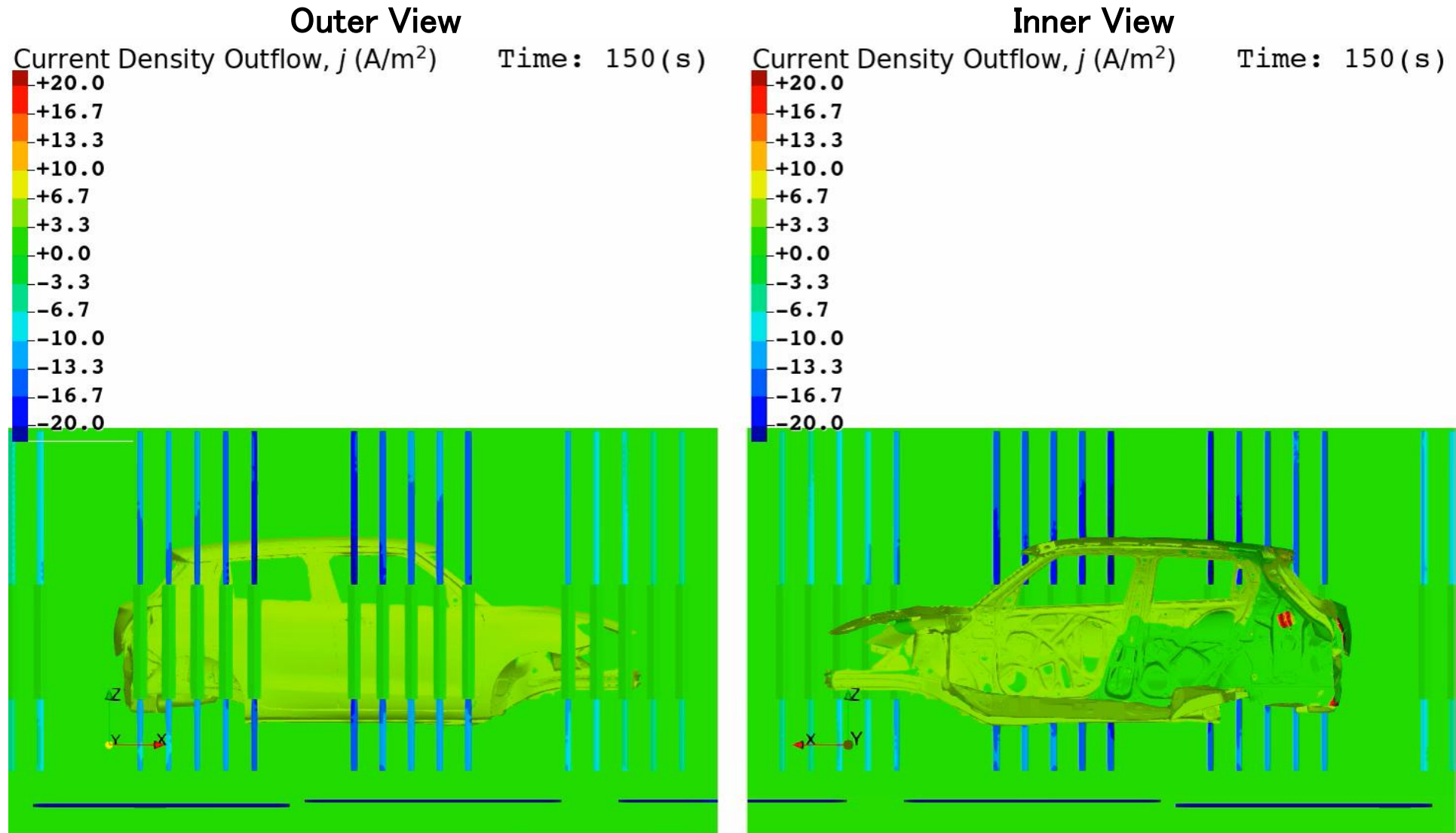


- 鋼板間の狭い隙間に多数の電着穴があることが確認できる。

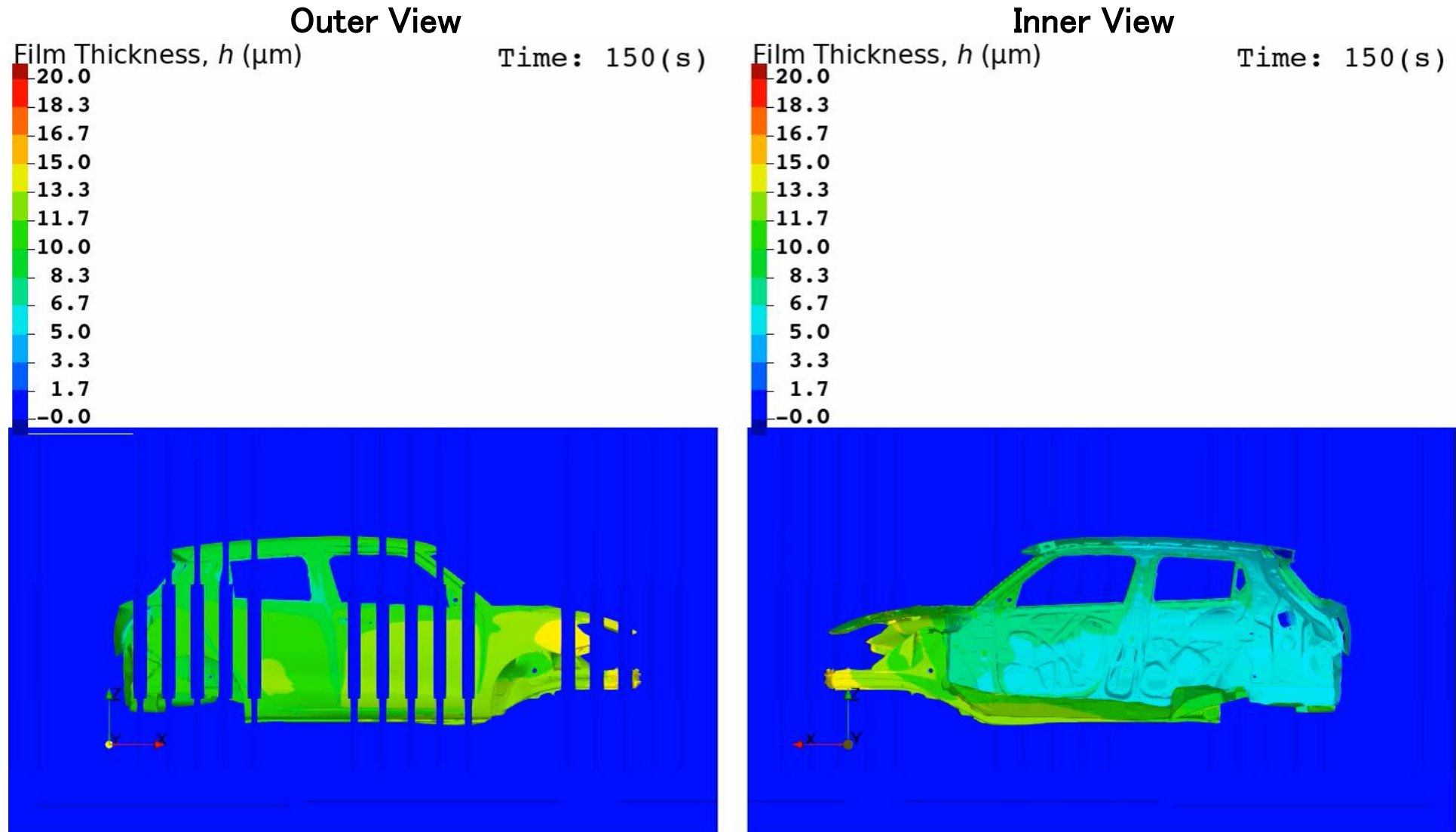
表面電位分布のアニメーション(51M要素EDES FEMの解析結果)



電流密度分布のアニメーション(51M要素EDES FEMの解析結果)



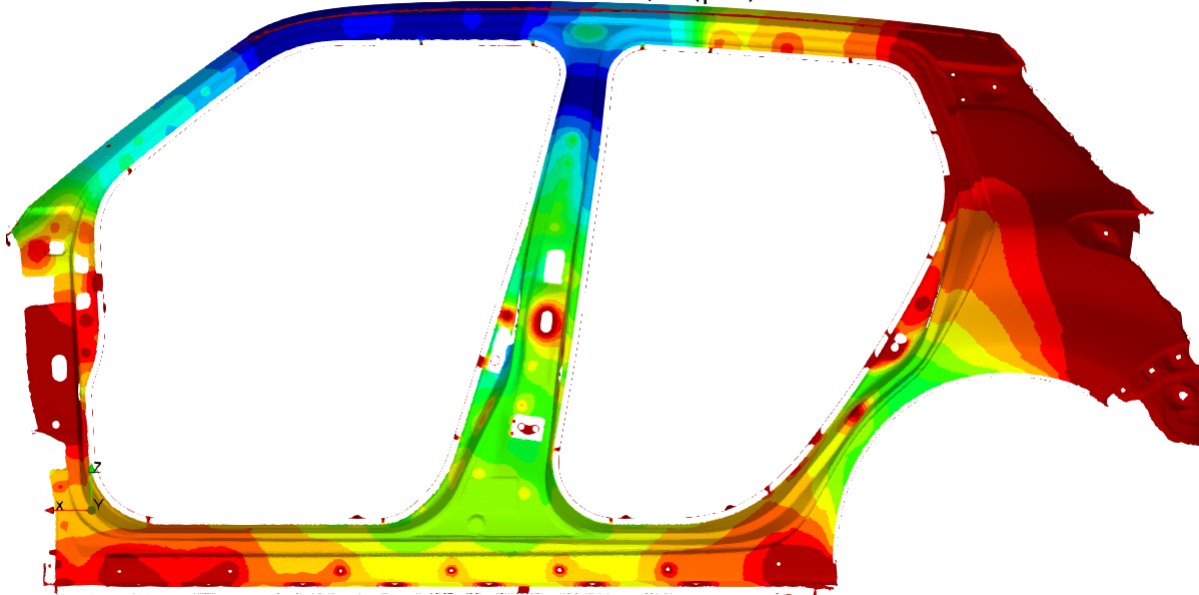
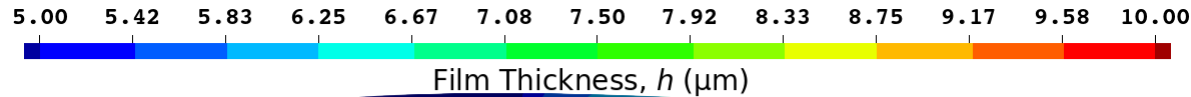
膜厚分布のアニメーション(51M要素EDESFEMの解析結果)



実ライン解析

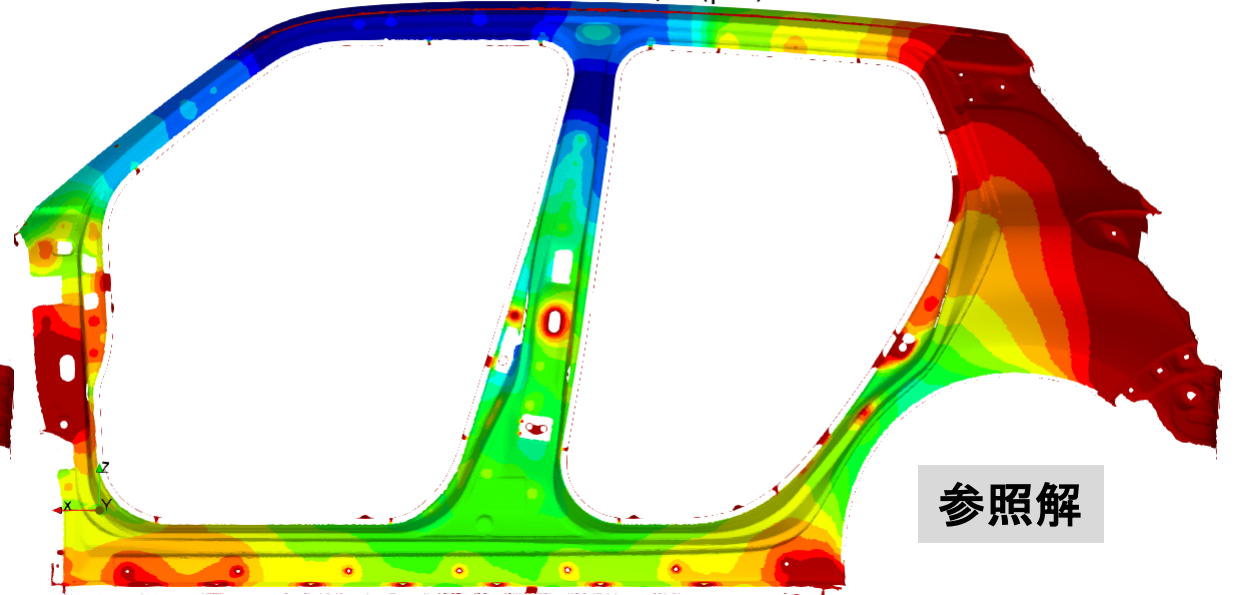
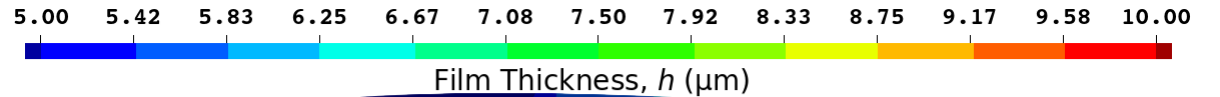
サイドシル内の最終膜厚分布(51M要素の場合)

標準FEM (FEM-T4)



標準FEMの解はやや厚い。
(サイドシル中央のコンター色が黄色)

EDSFEM (ES-FEM-T4)

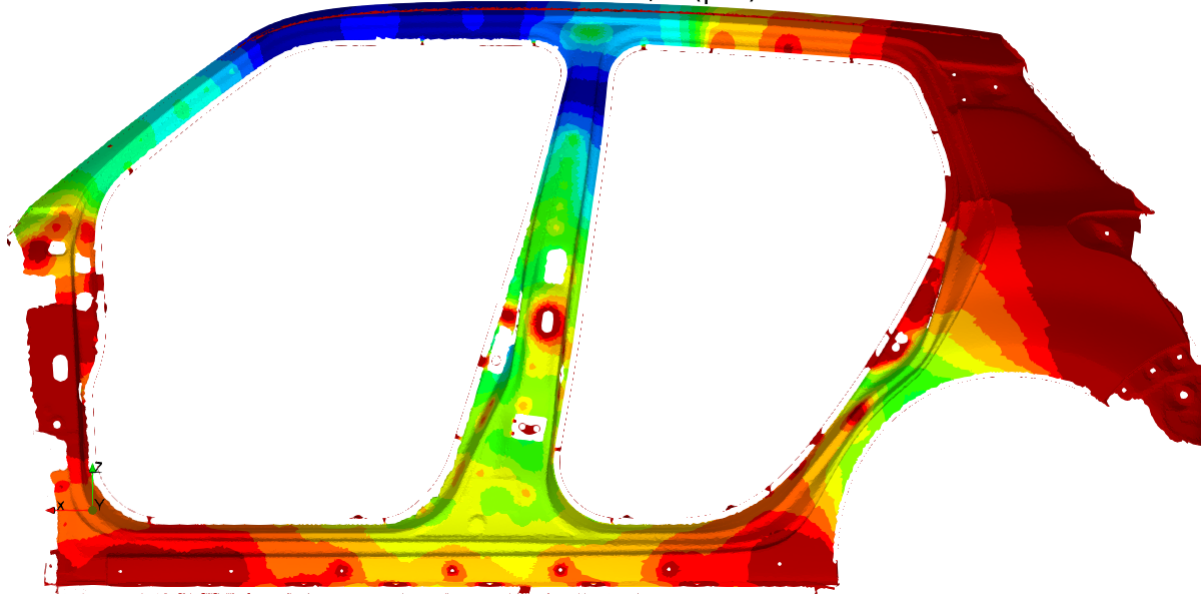
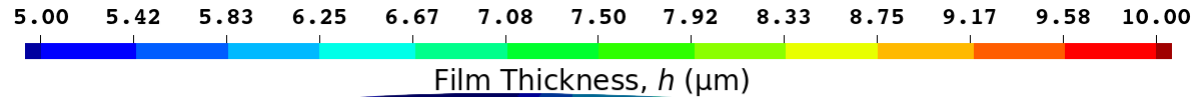


参照解

この解を参照解とする。
(サイドシル中央のコンター色が緑色)

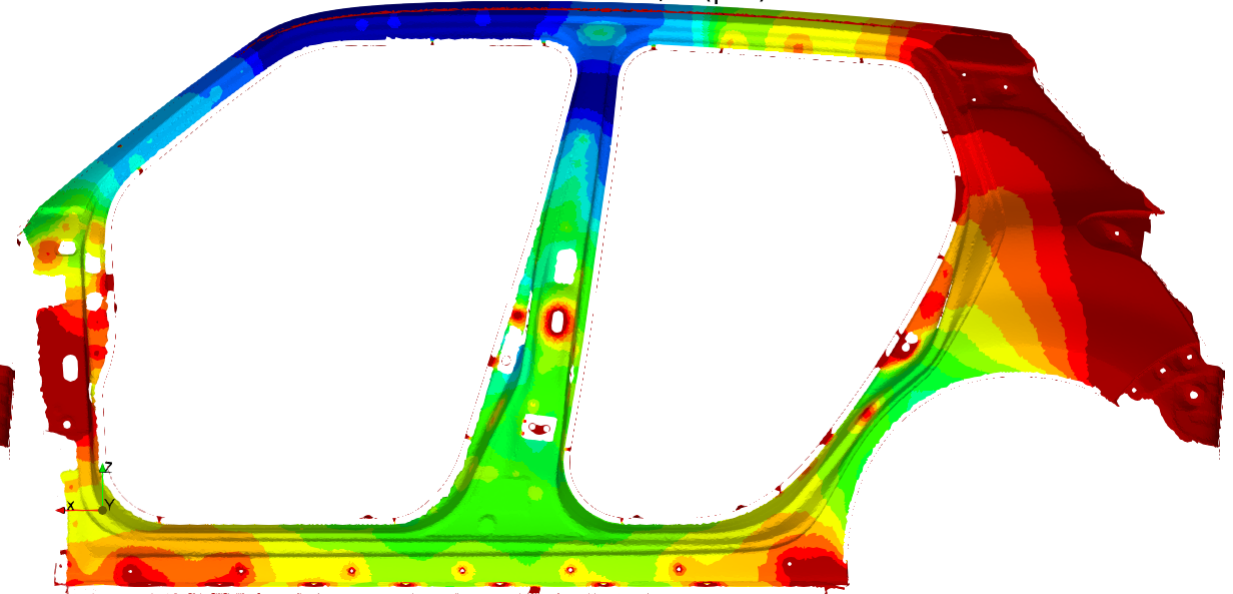
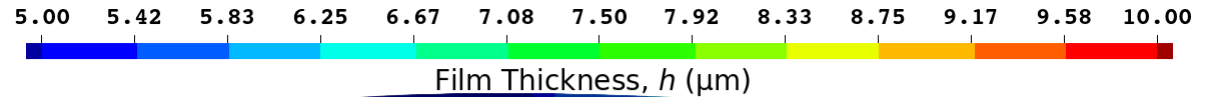
サイドシル内の最終膜厚分布(16M要素の場合)

標準FEM (FEM-T4)



標準FEMの解はかなり厚い。
(サイドシル中央のコンター色が橙色)

EDESFEM (ES-FEM-T4)

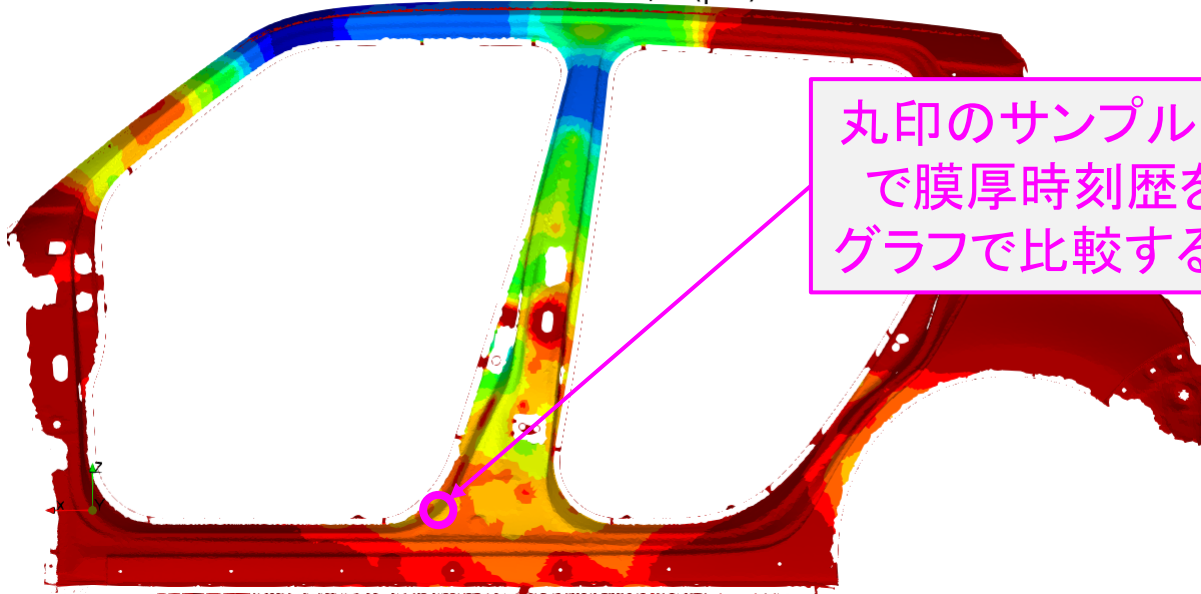
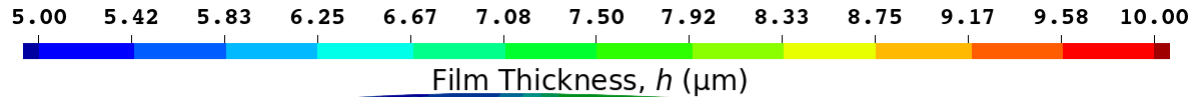


EDESFEMの解は高精度。
(サイドシル中央のコンター色が緑色)

実ライン解析

サイドシル内の最終膜厚分布(10M要素の場合)

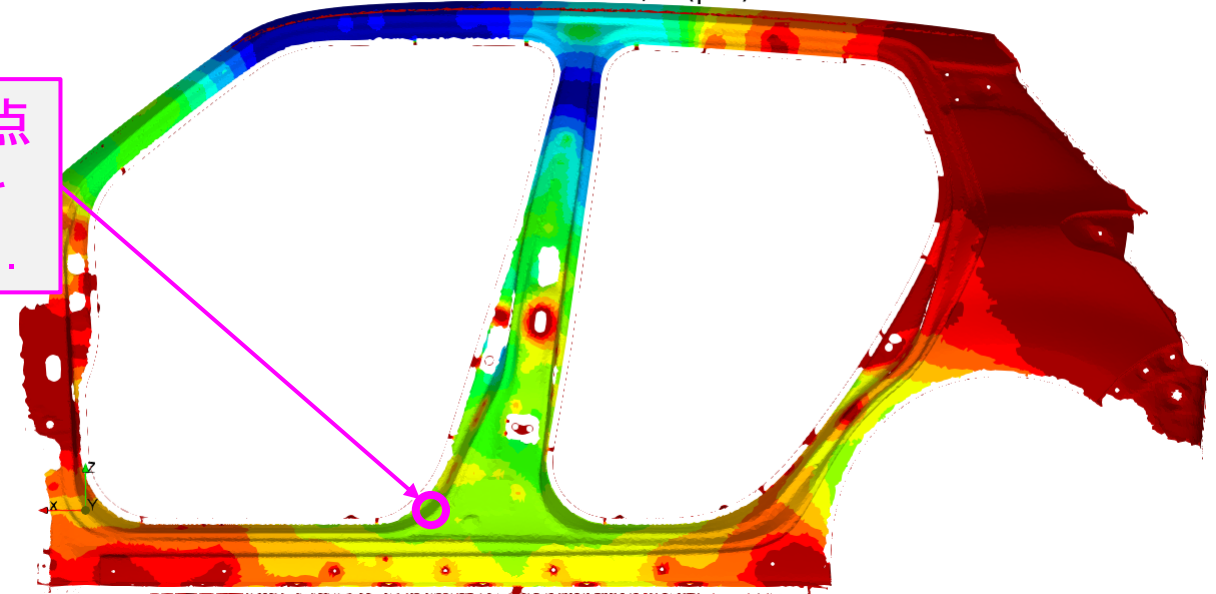
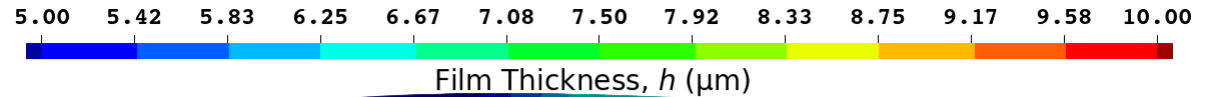
標準FEM (FEM-T4)



丸印のサンプル点
で膜厚時刻歴を
グラフで比較する。

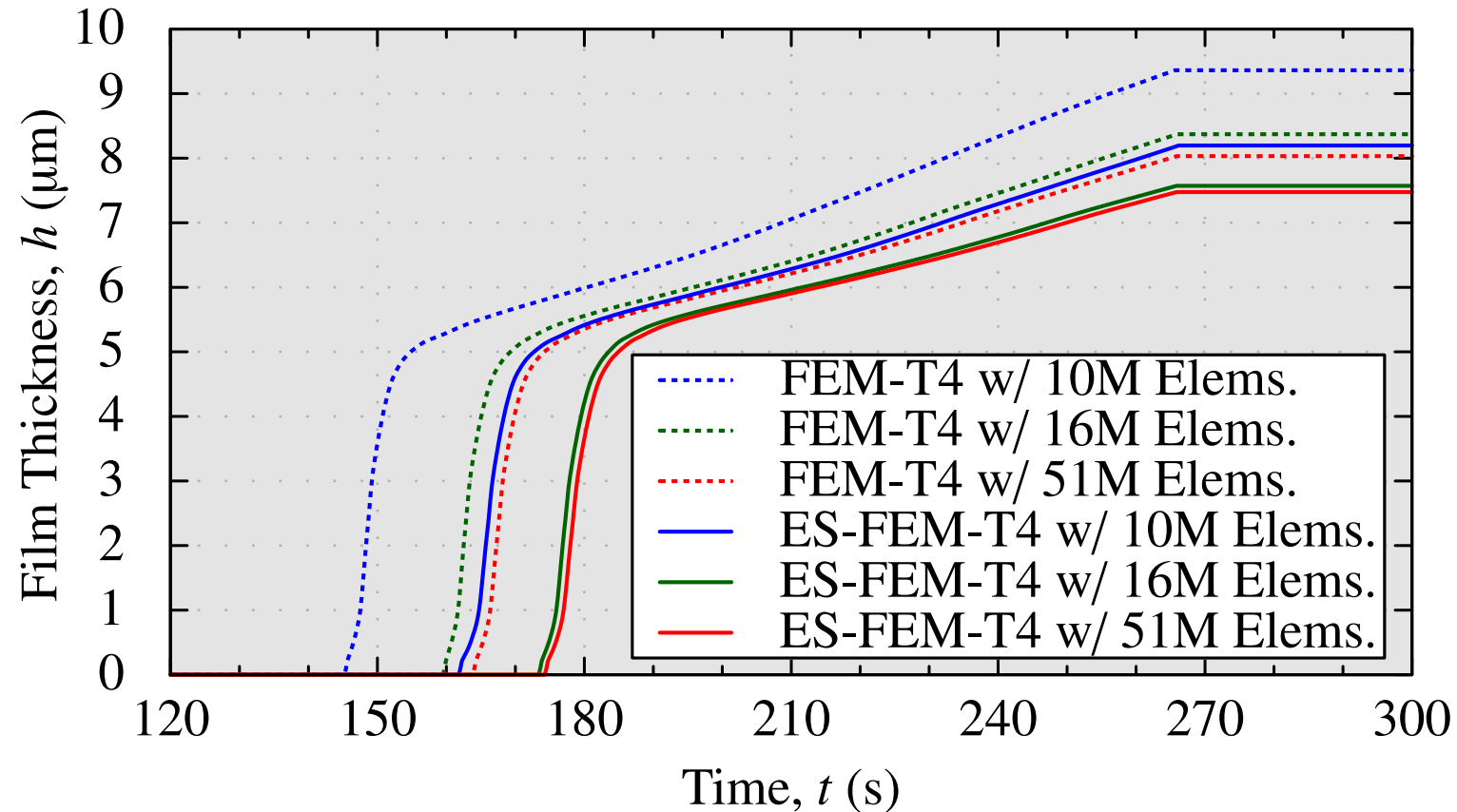
標準FEMの解は異常に厚い。
(サイドシル中央のコンター色が赤色)

EDSFEM (ES-FEM-T4)



EDSFEMの解はやや厚い。
(サイドシル中央のコンター色が黄色)

サイドシル内サンプル点における膜厚時刻歴比較



- 標準FEM(51M要素) と EDES FEM(10M要素) が同等精度.
- EDES FEM(16M要素) は実用上十分な精度でメッシュ収束している.

計算時間比較

東工大TSUBAME3.0 (Intel Xeon E5-2680 v4) で64個のCPU (計896コア) を使用

要素数	標準FEM (FEM-T4)	EDES FEM (ES-FEM-T4)
10M	1.6 h	1.9 h
16M	2.3 h	3.4 h
51M	6.0 h	8.5 h

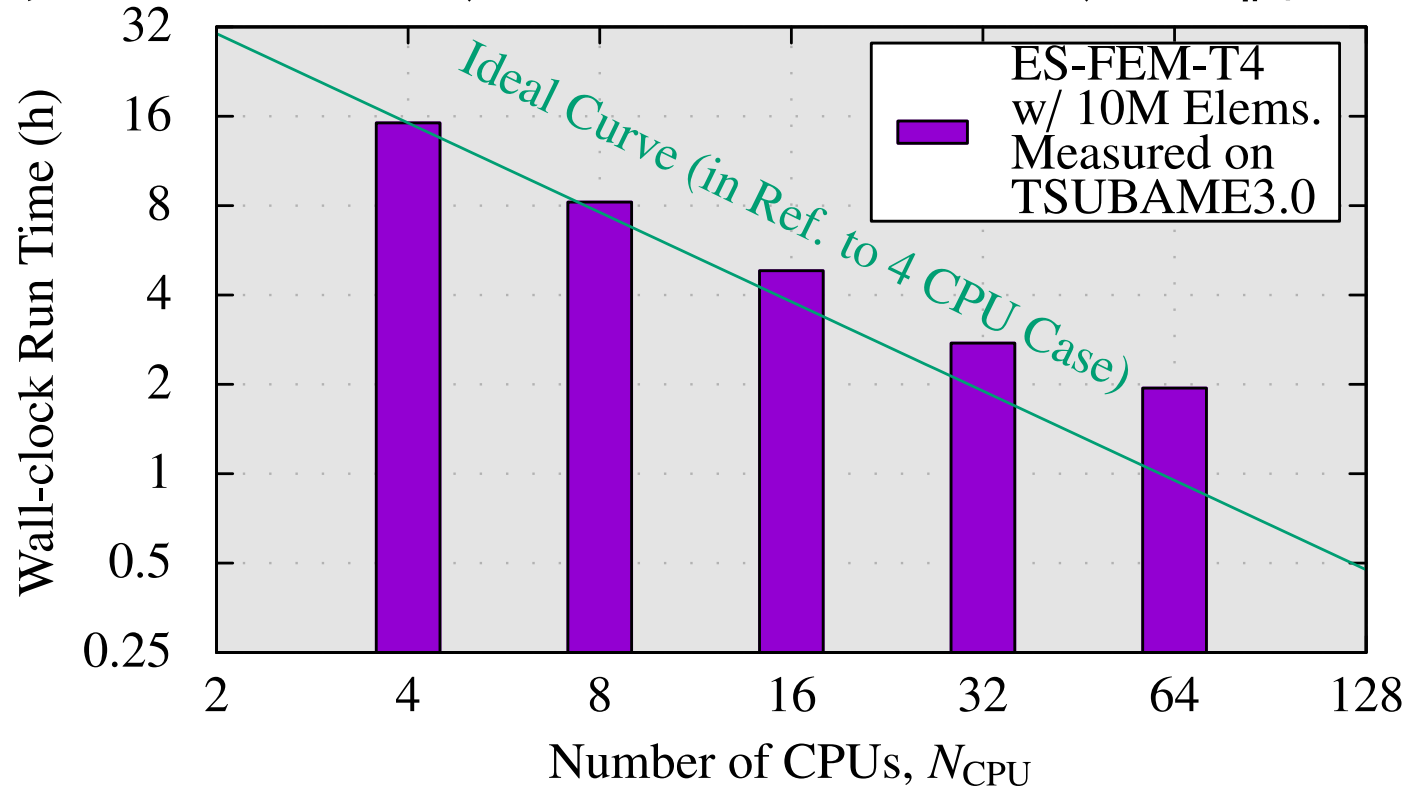
単独入槽の
実ライン解析なら
数時間で完了する.

- メッシュが同じなら, EDES FEMは標準FEMより約1.5倍遅い.
- 精度が同じなら, EDES FEMは標準FEMより約3倍速い.

並列計算を行う実ライン解析においても
EDES FEMが採用するES-FEM-T4は
標準FEMより遥かに効率的である.

強スケーリングテスト(10M要素の場合)

東工大TSUBAME3.0(Intel Xeon E5-2680 v4)で64個のCPU(計896コア)を使用



EDESFEMは少なくとも64CPUまで相当程度スケールしている。

EDESFEM

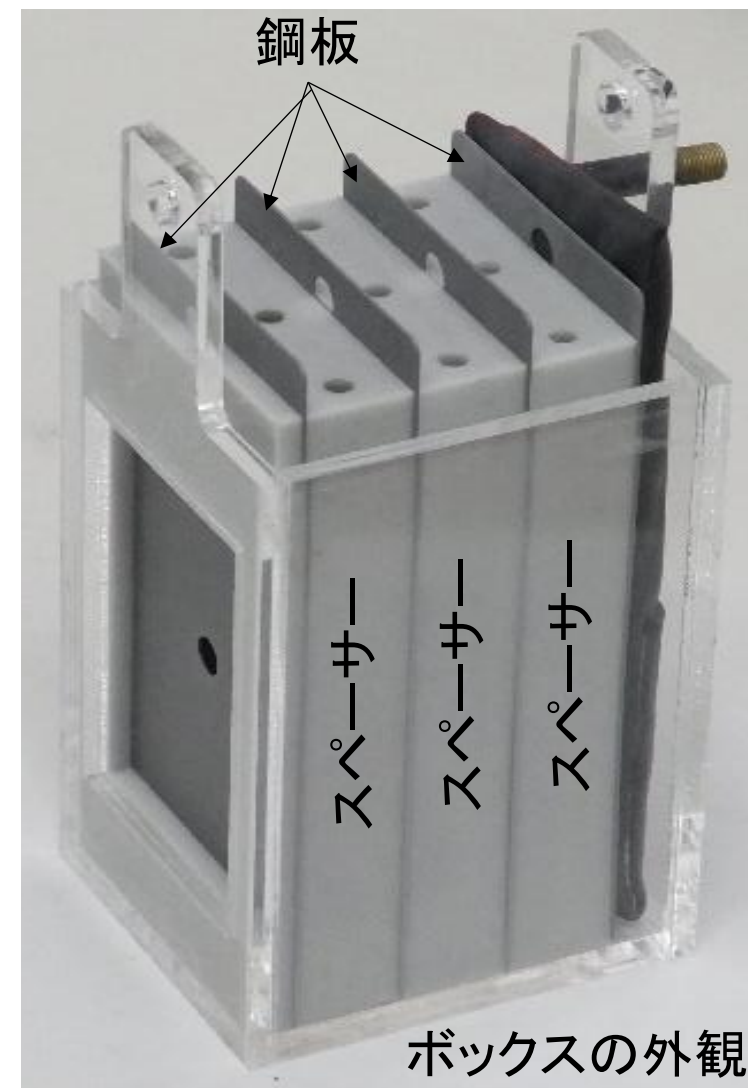
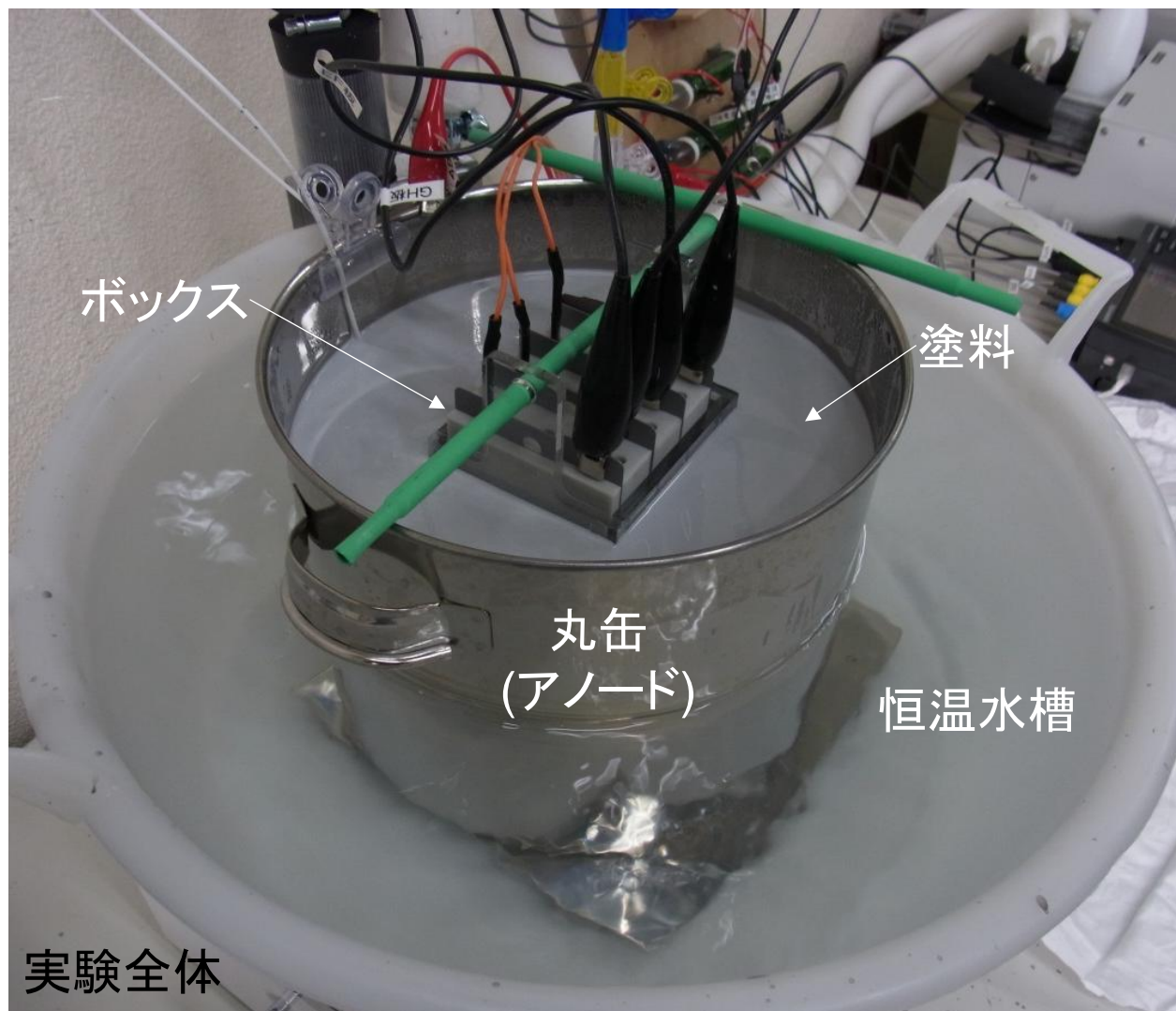
妥当性確認例 1

4 枚ボックス実験/解析



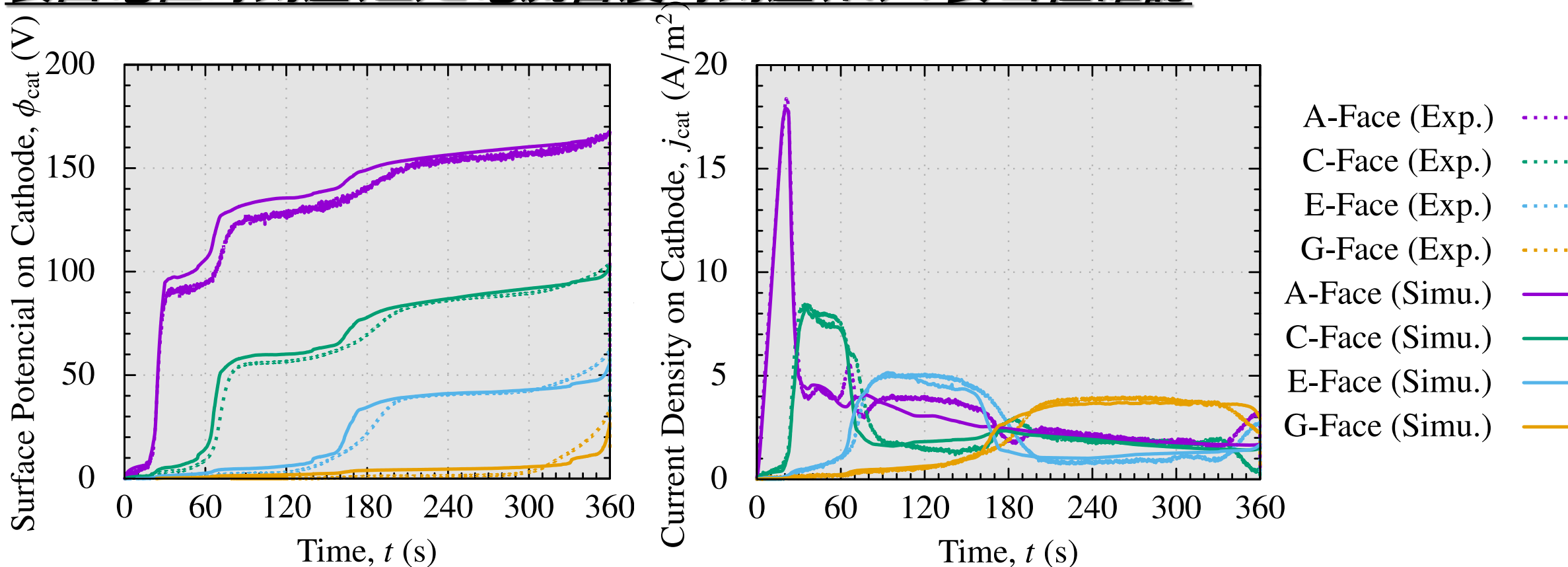
4枚ボックス実験/解析

実験の概要



4枚ボックス実験/解析

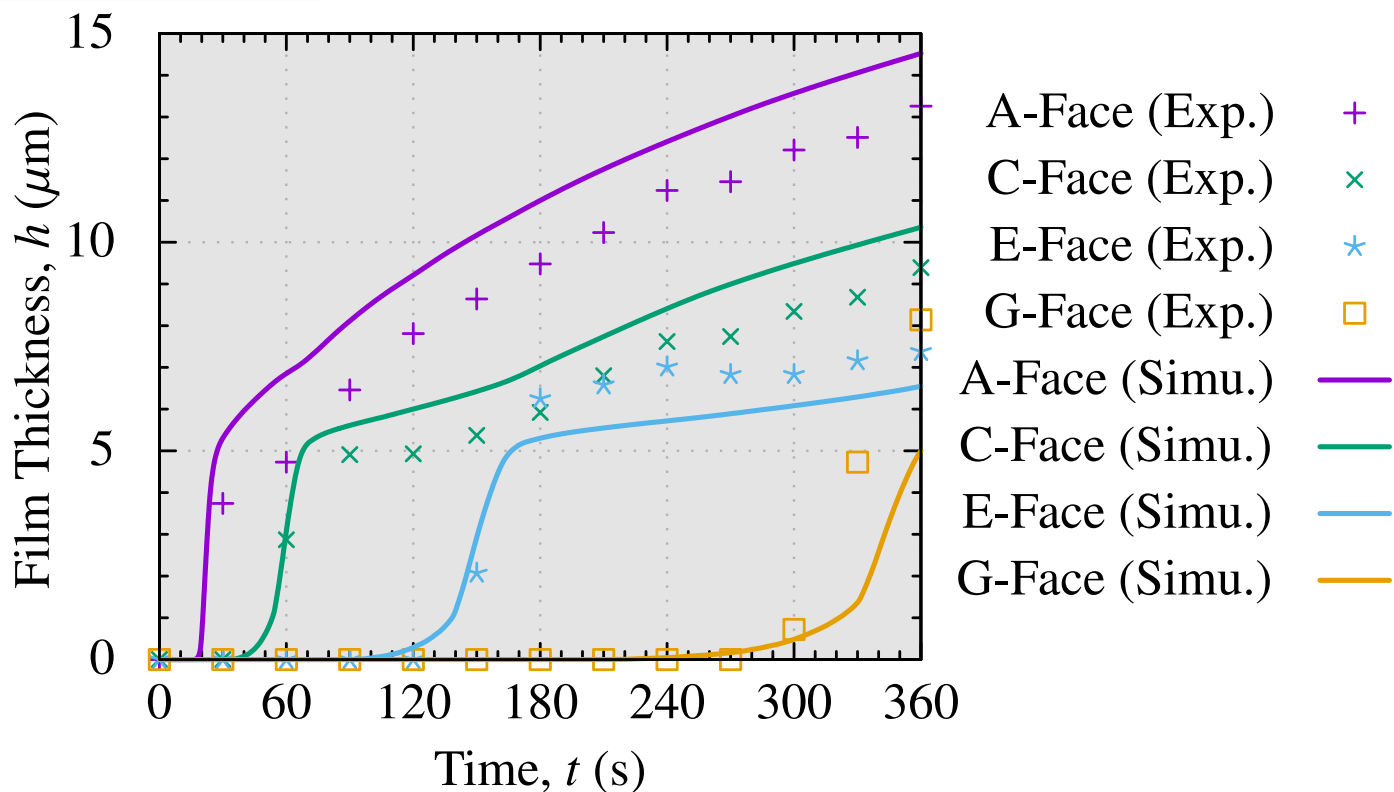
表面電位時刻歴(左)と電流密度時刻歴(右)の妥当性確認



実用的な精度で一致している。

4枚ボックス実験/解析

膜厚時刻歴の妥当性確認



最奥面(G面)の精度に課題(最大誤差3 μm)が残るものの、
その他は概ね実用的な精度(誤差2 μm 以内)で一致している。

EDESFEM

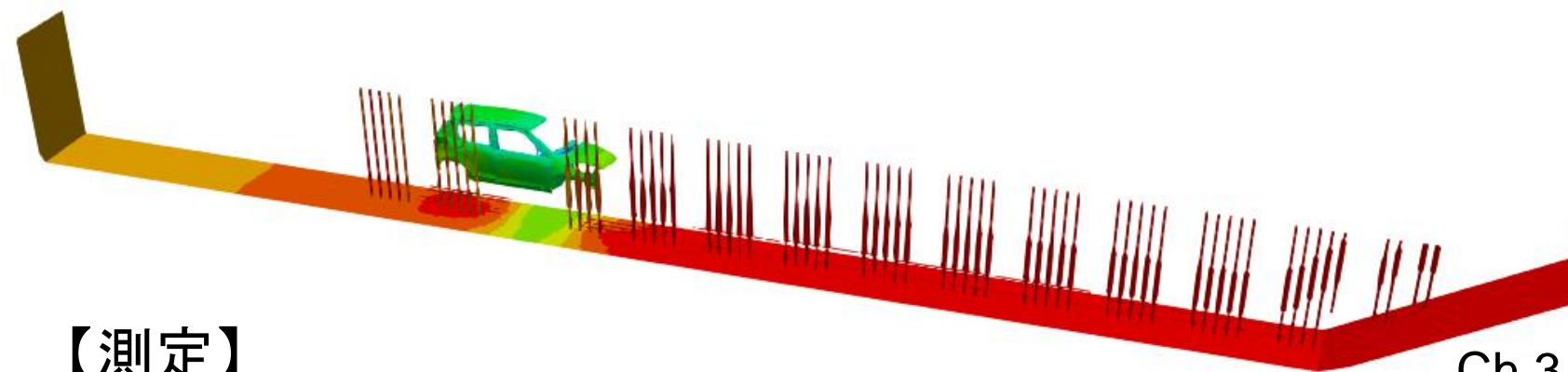
妥当性確認例 2

実ライン測定/解析



実ライン測定/解析

概要



■ 6箇所の測定点

Ch.7: Back Door

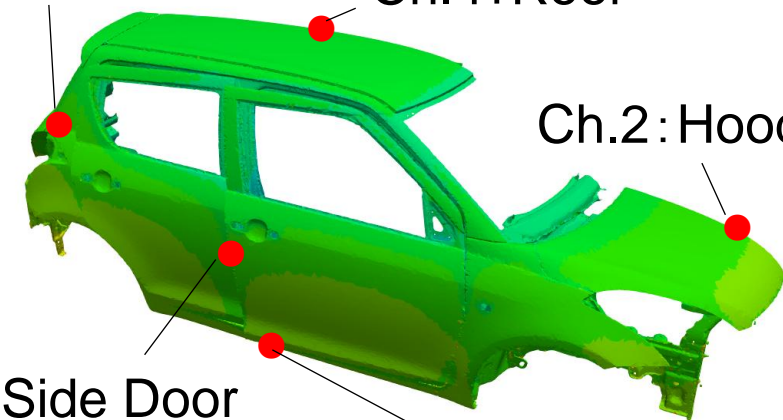
Ch.4: Roof

Ch.2: Hood

Ch.3: Side Door

Ch.5: Side Sill

Ch.6: Floor
は見えない位置



【測定】

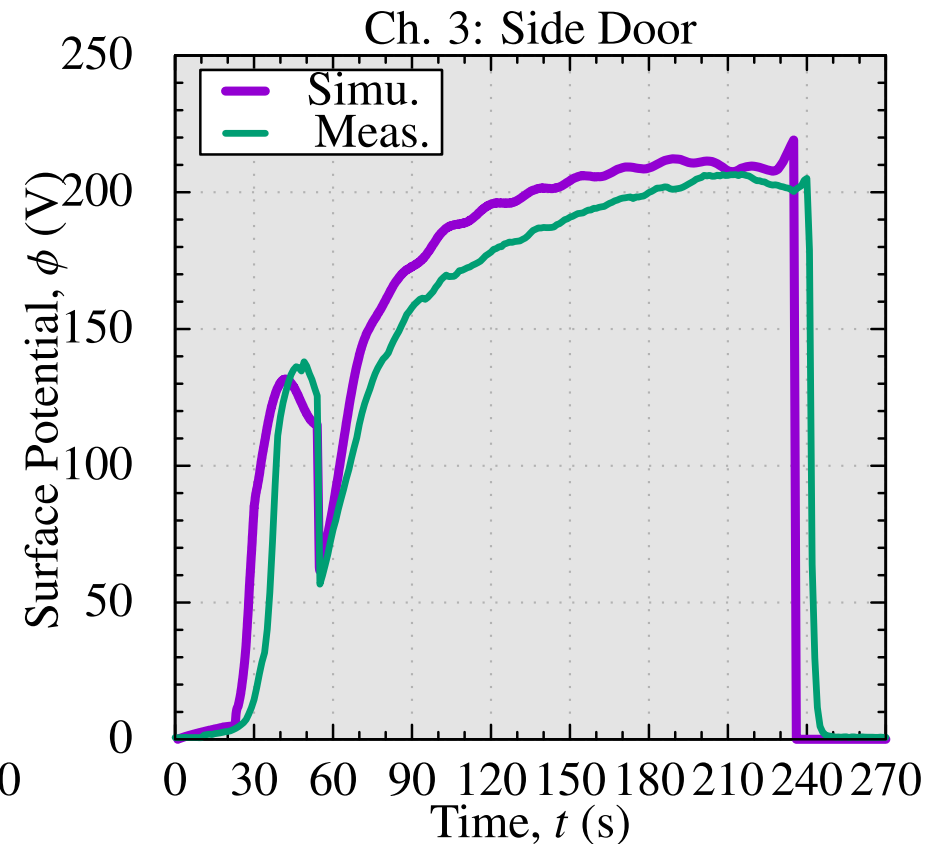
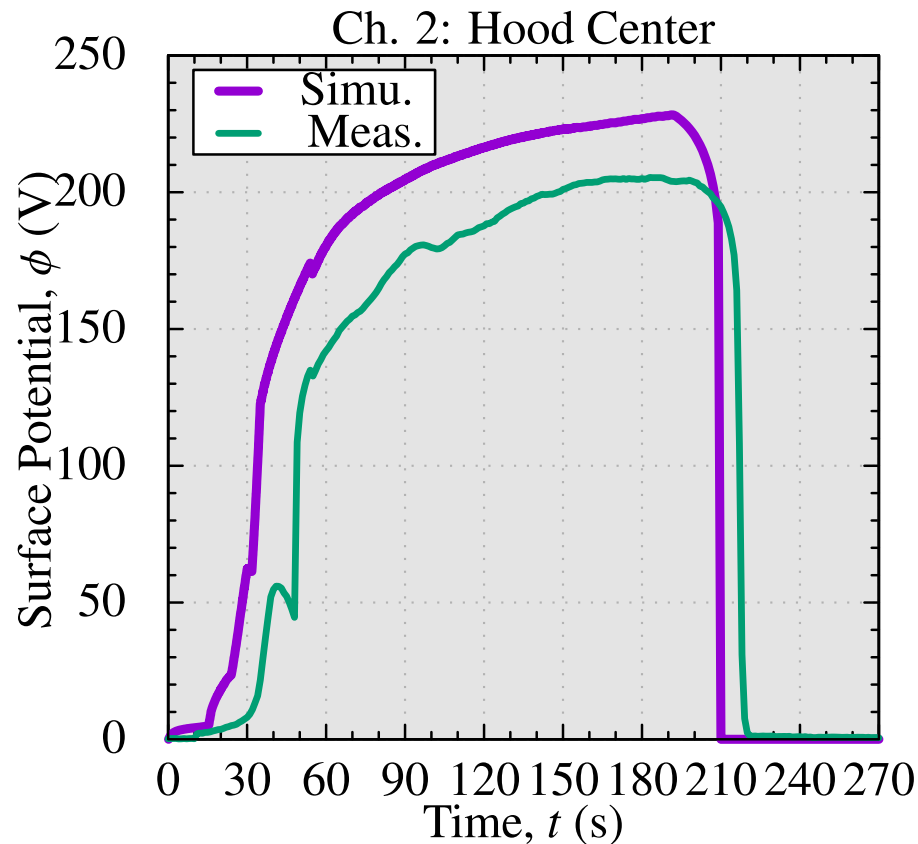
- 実ラインを流れる実車に車体表面電位測定装置を搭載し、車体表面の6箇所の測定プローブを配置して電着を実施.
- 焼付後, 同6箇所の膜厚を測定.

【解析】

- 電着槽および車体の右半分のみを考慮した面対称の解析.
- 槽・車体・電極の形状および車体の移動を全て再現.

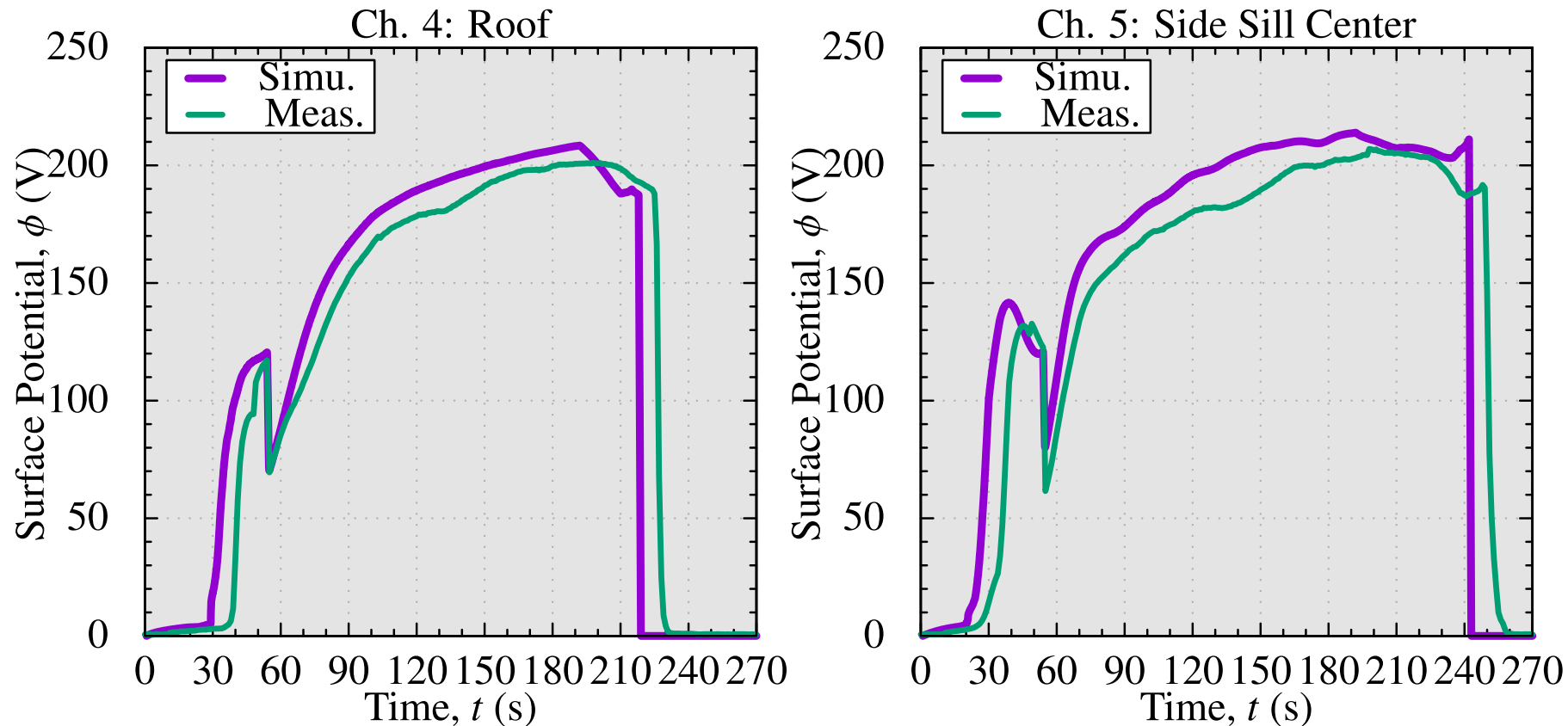
6箇所の測定点における表面電位時刻歴および最終膜厚を比較

表面電位時刻歴の妥当性確認(Ch. 2, 3)



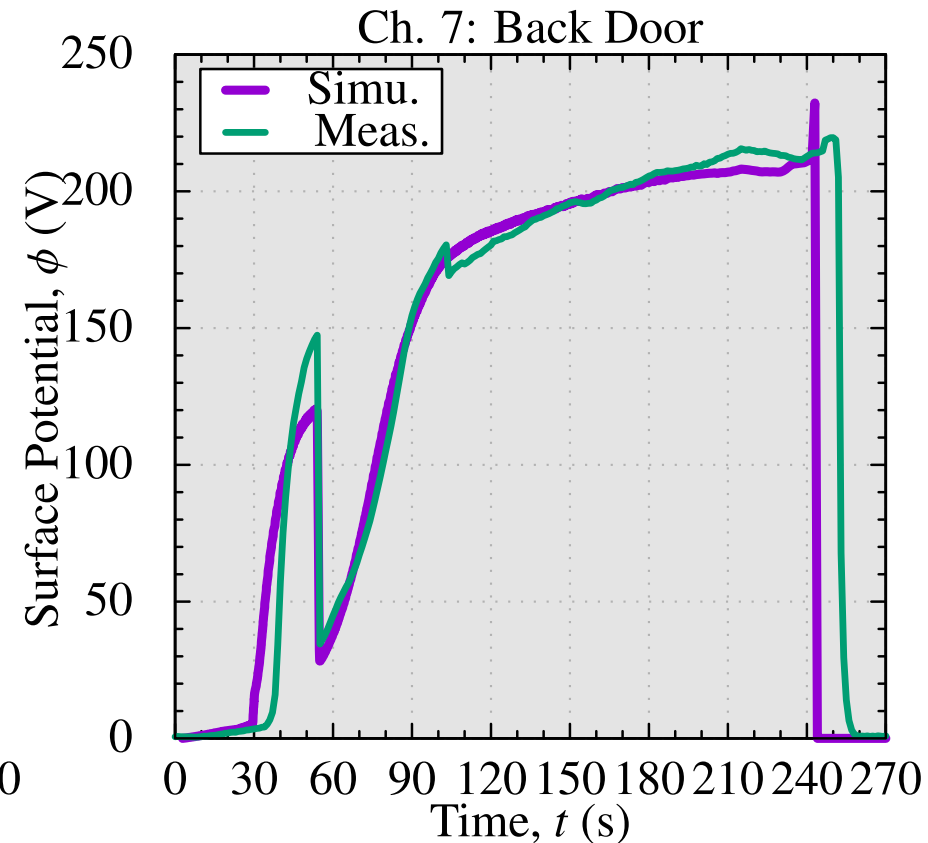
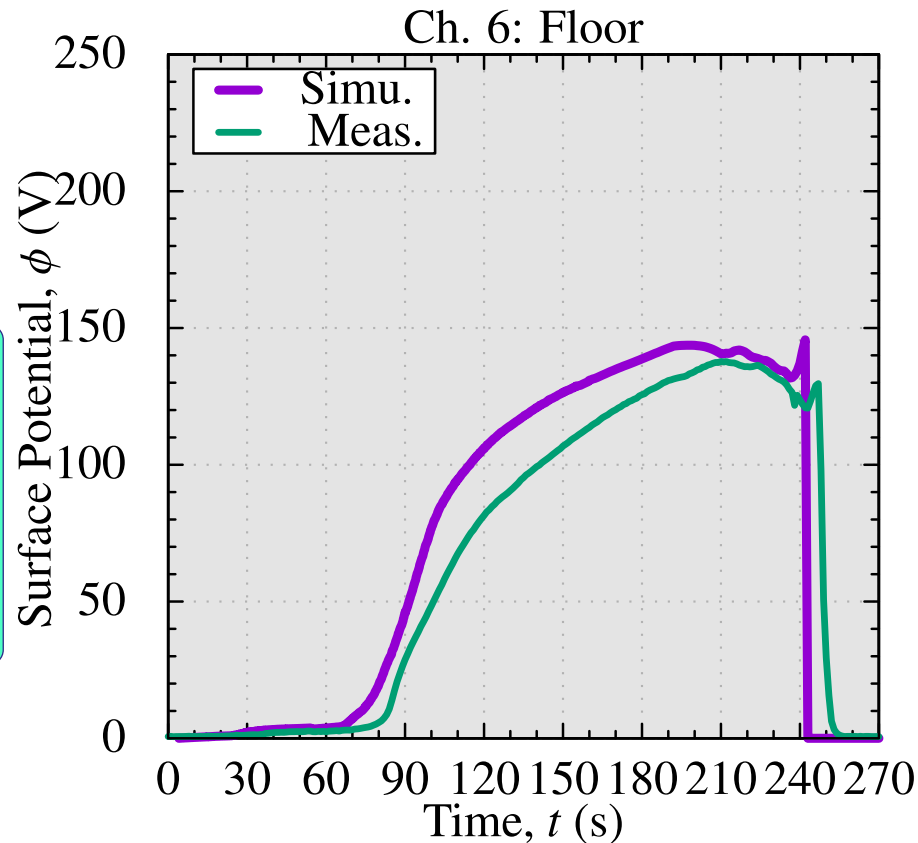
隔膜電極の劣化を解析で完全には模擬できていないため
表面電位がやや高めに計算されているものの、
概ね実用的な精度で一致している。

表面電位時刻歴の妥当性確認(Ch. 4, 5)



隔膜電極の劣化を解析で完全には模擬できていないため
表面電位がやや高めに計算されているものの、
概ね実用的な精度で一致している。

表面電位時刻歴の妥当性確認(Ch. 6, 7)



内板である
フロアでの
析出遅れを
高精度に再現
出来ている。

隔膜電極の劣化を解析で完全には模擬できていないため
表面電位がやや高めに計算されているものの、
概ね実用的な精度で一致している。

最終膜厚の妥当性確認

場所	実測値 (μm)	EDES FEM 解析値(μm)	誤差(μm)
Ch.2: Hood	20.1	21.4	+1.3 (+6.5%)
Ch.3: Side Door	19.0	21.0	+2.0 (+10.5%)
Ch.4: Roof	17.0	19.3	+2.3 (+13.5%)
Ch.5: Side Sill	20.0	21.6	+1.6 (+8.0%)
Ch.6: Floor	—	14.5	—
Ch.7: Back Door	23.0	20.3	-2.7 (-11.7%)

精度にまだ改善の余地があるものの、
膜厚の最大誤差は3 μm 未満であり、
実用に耐えうる実ライン予測精度を有している。

EDESFEM

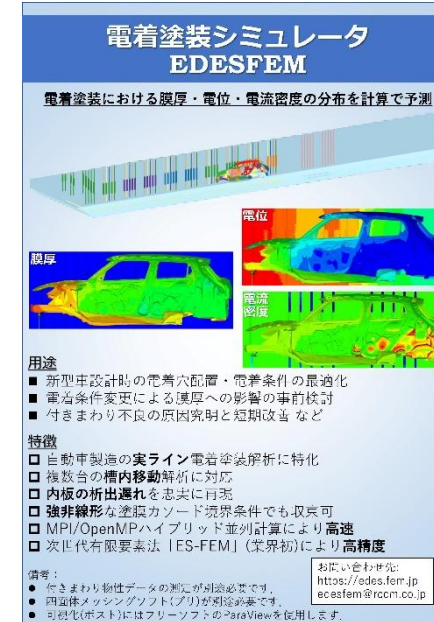
まとめ



まとめ

- 電着塗装シミュレータ「**EDESFEM**」の販売を開始した。
- 本ソフトの4特徴を紹介した。
 1. 4節点四面体メッシュでも高精度
 2. 複数台の槽内移動解析に対応
 3. 並列計算による高速化が可能
 4. 内板の析出遅れを忠実に再現
- 4枚ボックスおよび実ラインに対するV&V事例を紹介した。

検索 edesfem



リーフレット
も配布中

EDESFEMの試用や購入のお申し込み・ご質問等は
下記メールアドレスまでお気軽にお問い合わせください。
電着ラボ実験や実ライン測定に関するご相談も歓迎いたします。

edesfem@rccm.co.jp

