



大西 有希

技術賞受賞解説

# 「電着塗装シミュレータ「EDESFEM」」

大西 有希

## 1 はじめに

(株)計算力学研究センター(RCCM)より発売中の電着塗装シミュレータ「EDESFEM」<sup>[1, 2]</sup>の開発に対し、日本計算工学会より2023年度の技術賞を賜りました。本誌にて改めて感謝申し上げると共に、受賞技術の内容について簡単に紹介したいと思います。特に、キーテクノロジーの1つである平滑化有限要素法(S-FEM)<sup>[3]</sup>について重点的に解説を行おうと思います。

簡単な製品紹介を2章に、S-FEMの概説を3章に、自動車の電着解析事例を4章に、結びを5章に記します。

## 2 製品紹介

EDESFEM(えですふえむ)は自動車電着塗装工程のシミュレーション(図1のイメージ図を参照)に特化した数値解析ソフトウェアです。電着塗装とは、電着塗料と呼ばれる特殊な塗料に金属製の被塗装物を沈めて数百ボルトの高電圧を印加して電流を流すことで数ミクロン～数十ミクロンの防錆塗膜を析出させる塗装方法です。EDESFEMは複雑形状を持つ被塗装物である自動車の車体や部品の電着塗装を対象とし、膜厚・電位・電流密度の分布時刻歴を計算で予測します。自動車会社において新型車の設計開発を行う際、どの様な

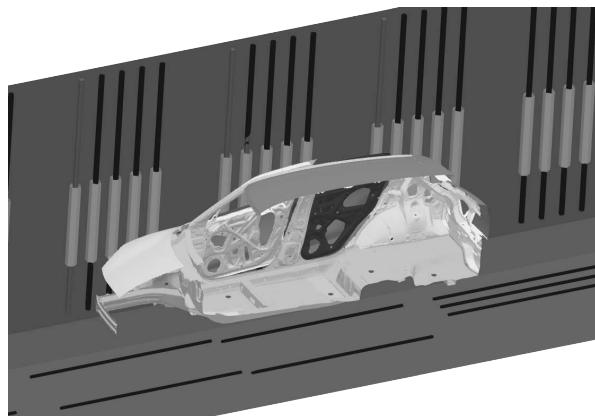


図1 実ライン自動車電着塗装解析のイメージ図

## 筆者紹介



おおにし ゆうき

2005年東京工業大学大学院情報理工学研究科博士課程修了。みずほ情報総研(株)勤務を経て、現在、(株)計算力学研究センター客員研究員および東京科学大学助教。電着塗装解析の他に、固体の超大変形解析、腐食の電気化学解析、熱／光インプリントのプロセス解析などの研究に従事。

形状・電着条件であれば防錆に必要な最低膜厚が確保できるかを予め計算で検討したい時などにEDESFEMが活用されています。

電着塗装シミュレータが解く支配方程式は極めて単純で、塗料が占める領域の静電場ラプラス方程式です。ただし、時々刻々と変化する塗膜の抵抗と成長に関する境界条件を考慮しなければならない点に問題の難しさがあります。塗膜の抵抗・成長挙動は使用する電着塗料・被塗装物(鋼板/アルミ板など)・前処理方法の種類により大きく異なるため、詳細な物性測定が欠かせません。東京科学大学の大岡山キャンパスには各種電着物性が測定可能なラボ実験設備<sup>[4]</sup>が整っており、そこで取得した電着数理モデルパラメータをEDESFEMに入力することで電着塗装シミュレーションが実施できます。

EDESFEMには様々な特徴<sup>[1]</sup>がありますが、次世代有限要素法である平滑化有限要素法(Smoothed Finite Element Method: S-FEM)<sup>[3]</sup>を世界に先駆けて商用ソフトで採用している点は特筆すべき強みです。自動車ボディの様な複雑形状を4節点四面体メッシュで解析する際、S-FEMは絶大な威力を発揮します。長らく「『次世代』有限要素法」と呼ばれてきたS-FEMですが、我が国でも汎用FEMコード「FrontISTR」にS-FEM四面体が実装される<sup>[5]</sup>など、今世代での活用が既に始まっています。実務解析に携わる読者の方々にとって、S-FEMを利用する機会は今後必ずや訪れるかと思います。

## 3 平滑化有限要素法(S-FEM)概説

S-FEMは2006年に提唱された比較的新しいFEM定式化であり、いわゆる「ひずみ平滑化」手法の1つです。ひずみ平滑化の場所や方法により多種多様なS-FEMが提案されていますが、古典的なS-FEMでありEDESFEMにも採用されているエッジベースの定式化(Edge-based Smoothed Finite Element Method: ES-FEM)についてここでは解説したいと思います。

### 3.1 ES-FEMの定式化

簡単のため、微小変形固体解析を例に2次元の3節点三角形(T3)セルのみで構成されるメッシュを使用したES-FEM-T3の概略を図2に示します。2個の三角形セル(Cell 1とCell 2)があり、その両方と繋がっているエッジ(Edge 1)に注目しています。この時、ES-FEM-T3の計算手順は下記の様になります。

- 各セルで歪み-変位マトリックス $[^{Cell}B]$ を通常のFEMと同様に作る。

- ii. 各エッジにて直接繋がっている周辺セルをリストアップし、各周辺セルの面積を重みとして  $[Cell_B]$  を平均化して  $[Edge_j B]$  を作る。
- iii.  $[Edge_j B]$  を用いて各エッジの歪み  $Edge_j \epsilon$ 、応力  $Edge_j \sigma$ 、節点内力寄与  $\{Edge_j f^{int}\}$ などを計算する。

つまり、標準的なFEMでは各セル中心に置かれるガウス点を各エッジ中心に置くよう変更した定式化がES-FEMであると言えます。非常にシンプルな定式化であり、実装は極めて容易です。

なお、静電場解析の場合は歪み-変位マトリックス  $[B]$  の代わりに形状関数の微分  $(\frac{dN}{dx})$  そのものを平滑化し、各エッジで電位勾配・電流密度・節点電流寄与などを計算することになります。また、3次元で4節点四面体(T4) メッシュを用いる場合も計算手順は全く同じですが、エッジ周辺セルの数の上限がメッシュ依存になる点に注意が必要です(2次元T3メッシュの場合、エッジ周辺セルの数は高々2個になる)。

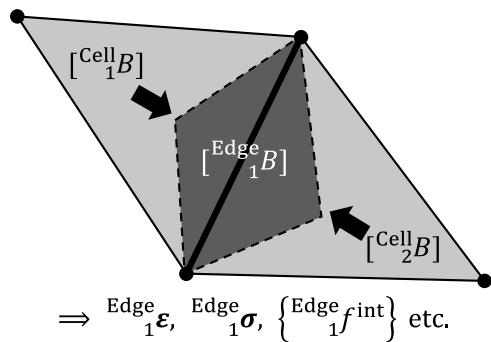


図2 微小変形固体解析におけるES-FEM-T3計算手順の概略図

### 3.2 ES-FEM検証解析例(固体解析の場合)

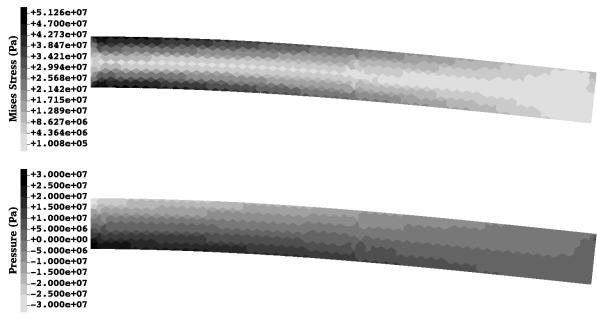
ES-FEMの威力が最も分かり易い例として、3節点三角形(T3) メッシュを用いた片持ち梁の曲げ解析例を紹介したいと思います。ヤング率5.2 GPa・ポアソン比0.3の弾性材料で出来た $10 \times 1$  mの平面ひずみ片持ち梁を考えます。梁先端上側角点に1 MNの下向き集中荷重を加える解析を行いました。

まず、メッシュシードサイズを0.2 mとしたT3非構造メッシュを用いた場合の解析結果を図3に示します。(a)が標準的な三角形要素(ABAQUS CPE3)の解析結果、(b)がES-FEM-T3の解析結果であり、それぞれMises応力分布と圧力分布を表示しています。ES-FEM-T3の結果の方が明らかに滑らかで妥当な分布を示しており、同一メッシュを使用した際のひずみ/応力の精度がES-FEMにより向上していることが見て取れます。

次に、メッシュ収束速度を比較したプロットを図4に示します。メッシュシードサイズを変えた時の梁先端下側角点のたわみ量を比較しています。標準的なT3要素(ABAQUS CPE3)だと0.0625 m(1/16 m)まで細かくメッシュ分割を行わないと参照解に近い解が得られない一方、ES-FEM-T3であれば0.5 m(1/2 m)の極粗いメッシュでも参照解に収束しています。標準的なT3要素



(a) ABAQUS CPE3の解析結果  
(上: ミーゼス応力分布、下: 圧力分布)



(b) ES-FEM-T3の解析結果  
(上: ミーゼス応力分布、下: 圧力分布)

図3 3節点三角形メッシュを用いた片持ち梁の曲げの検証解析における精度比較

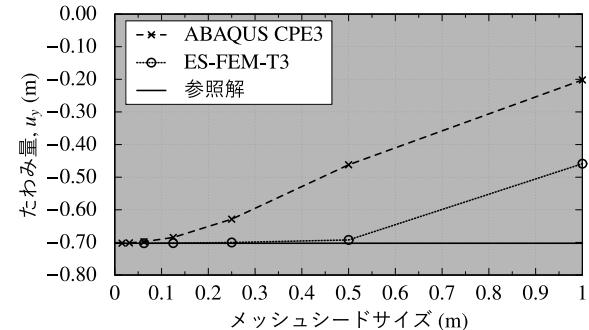


図4 3節点三角形メッシュを用いた片持ち梁の曲げの検証解析におけるメッシュ収束速度比較

素は「せん断ロックギング」を引き起こすためメッシュ収束速度が遅いことが知られていますが、ES-FEM-T3はせん断ロックギングフリーなのでメッシュ収束が高速です。ES-FEM-T3のメッシュ収束速度は標準的な6節点三角形2次要素と同等である<sup>[3]</sup>ことが知られています。3次元の場合も同様に、4節点四面体(T4) メッシュを用いるES-FEM-T4はせん断ロックギングフリーで、10節点四面体2次要素と同等のメッシュ収束速度を持ちます。

ES-FEMが産業利用に適した実用的な手法であることは、この例題だけでも十分にお分かり頂けたのではないでしょうか。固体解析におけるES-FEMの特徴を下記に簡単にまとめました。より詳しい説明は文献[3]ほかをご参照ください。

- ① せん断ロックギングフリー
- ② 超1次のメッシュ収束速度

- ③ 低品質なメッシュでも高品質な解
- ④ 自由度が増えない
- ⑤ コーディングが容易

なお、近年ではES-FEM-T4を更に進化させて驚異的なひずみ／応力精度を4節点四面体で実現したEdge Center-based Strain Smoothing Element (EC-SSE-T4)<sup>[6]</sup>という新手法も登場して来ています。

### 3.3 ES-FEM 検証解析例（電着塗装解析の場合）

話を電着塗装解析に戻します。固体解析と異なり、静電場（ラプラス場）解析では三角形1次要素や四面体1次要素を用いたとしてもロッキングの様に明確な精度低下は起こりません。それでもES-FEMを使用することで標準的なFEMよりも遙かに高速なメッシュ収束速度が得られます。塗料領域に対する静電場解析を行う電着塗装解析も例に漏れず、ES-FEMによるメッシュ収束高速化の効果は絶大です。

例として、乗用車の実ライン電着塗装解析を標準的な4節点四面体要素（FEM-T4）およびES-FEM-T4を用いて解析した結果の比較を示します。紙面の都合上、詳細は文献[1]に譲り、ここでは膜厚時刻歴と計算速度についての比較を示します。密度の異なる3種類の車体メッシュ（1000万要素、1600万要素、5100万要素）を用意し、車体メッシュ以外の解析条件を同一に設定した解析をFEM-T4およびES-FEM-T4を用いて行いました。

まず、膜厚時刻歴を比較したサンプル点の場所を図5に示します。サンプル点はドア下のサイドシル内（正確にはセンターピラーの付け根内側）に位置しており、防錆が必要な部位で最も塗膜が析出しづらい箇所のひとつです。3種のメッシュと2種の手法（全6ケース）で解析したサンプル点の膜厚時刻歴を図6に示します。塗膜が析出しづらい箇所のため、電源が電圧を印加し始めた時刻 $t=0$ から150秒以上経過した後によく析出が始まっていることが分かります。そして、FEM-T4の時刻歴（点線）はメッシュ毎に析出開始時刻および最終膜厚が大きく異なっています。他方、ES-FEM-T4の時刻歴（実線）は最も粗いメッシュ（1000万要素）のみやや外れているものの、他のメッシュ（1600万要素と5100万要素）の解析結果はほとんど同一です。すなわち、FEM-T4では5100万要素を用いても解がメッシュ収束していないのに対し、ES-FEM-T4では1600万要素で既にメッシュ収束しています。電着塗装解析においてもES-FEM-T4のメッシュ収束速度は優秀です。

次に、全6ケースの解析の計算時間一覧を表1に示します。解析には旧東工大のTSUBAME3.0（Intel Xeon E5-2680 v4）上で64個のCPU（計896コア）を使用しました。メッシュが同じ場合、ES-FEM-T4はFEM-T4より約1.5倍速いことが分かります。これはES-FEM-T4の方が[K]（いわゆる剛性行列）のバンド幅が約3倍広いことに起因しています。しかし、要求する精度が同じ場合、ES-FEM-T4はFEM-T4より約3倍速いことが分かります。つまり、解析実務においてFEM-T4の代わりにES-FEM-T4を用いれば、計算時間を約1/3に減らせるの

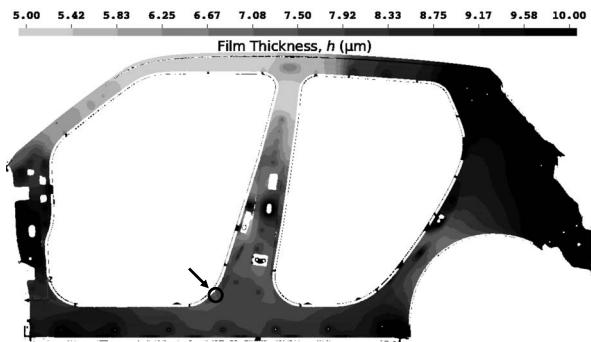


図5 4節点四面体メッシュを用いた自動車電着塗装の検証解析における膜厚評価のサンプル点

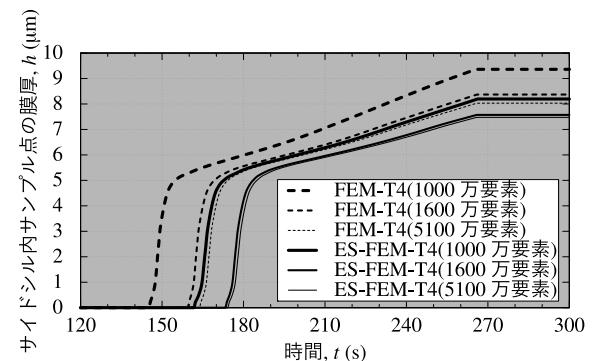


図6 4節点四面体メッシュを用いた自動車電着塗装の検証解析におけるメッシュ収束速度比較

表1 4節点四面体メッシュを用いた自動車電着塗装の検証解析における計算速度比較

車体メッシュ	標準FEM (FEM-T4)の要素数	平滑化有限要素法 (ES-FEM-T4)の計算時間
1000万	1.6 時間	1.9 時間
1600万	2.3 時間	3.4 時間
5100万	6.0 時間	8.5 時間

です。これはもう、ES-FEM-T4を使わない選択肢など無いと言える状況であり、従ってEDESFEMではES-FEM-T4を採用しています。

### 3.4 2次要素では駄目な理由

ここまで4節点四面体（T4）メッシュを用いるES-FEM-T4の優位性について見てきました。しかし、10節点四面体（T10）要素、いわゆる四面体2次要素を使えば済む話ではないのかと思われる方が居るかも知れません。確かに、比較的単純な形状を解析領域とするラプラス場の解析では2次要素を使えば十分です。ところが、複雑形状を解析対象とする場合、2次要素では駄目なのです。

工業製品に頻出する複雑形状の例として、図7のようないわゆる穴を持つ部品を考えてみます。図7には穴周辺をT4およびT10でメッシュ分割した際の表面に現れる三角形メッシュを示しています。図7（左）の通り、T4メッ

シユであれば何の問題もなく穴周辺をメッシュ分割可能です。しかし、T4メッシュをそのままT10メッシュに置き換える様にメッシュ分割すると、図7(中)の様に節点数が猛烈に増えたメッシュになってしまいます。節点数を増やさないようにT10メッシュ分割を行うと、図7(右)の様に中間節点で辺が折れ曲がった2次要素になってしまいます。2次要素の辺が折れ曲がると、形状関数で要素内挿を計算する精度が低下し、本来2次要素が持つ速いメッシュ収束性が犠牲となってしまいます。以上の理由により、多数の穴などの複雑形状を持つ車体メッシュを要する電着塗装解析では2次要素の利用は非効率となるのです。

また、カーテシアン系のメッシュを使えば良いではないかという意見もあるかと思います。しかしながら、カーテシアン系メッシュだと複雑形状部のメッシュが不必要に細かくなってしまう問題、衝突解析などの動解析で縦波の偽反射が起こる問題(電着塗装解析では無関係ですが)等が避けられません。計算資源と電気代が有り余っている環境であればカーテシアン系メッシュも選択肢の1つですが、そうでない一般的な環境では今でもT4メッシュが最適であると我々は考えています。

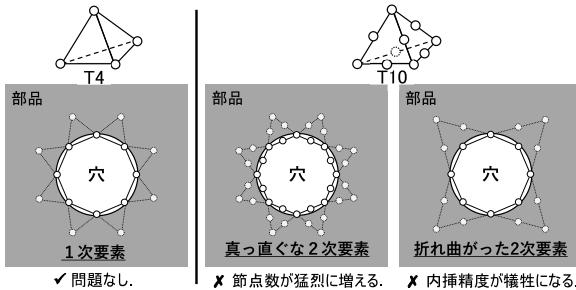


図7 複雑形状の四面体メッシュ分割が2次要素では駄目な理由

#### 4 自動車電着塗装解析の妥当性確認事例

最後に、EDESSEMを用いた自動車製造工場の実ラインにおける電着塗装解析の妥当性確認事例を紹介したいと思います。

妥当性確認事例の概要を図8に示します。長さ約30 mの電着槽に自動車ボディを単独入槽させて電着を行う工程を模擬しています。対称近似した右側半分のみの解析で、実際の電着槽および車体の形状と槽内移動を再現しています。電極側のアノード境界条件には実際の電着工程で与えられる印加電圧および推定された表面抵抗率を設定し、自動車ボディ側のカソード境界条件には科学大の電着実験ラボ<sup>[4]</sup>で同定した電着数理モデルを設定しました。妥当性確認のため、図9に示すサンプル点において表面電位時刻歴と最終膜厚を実ラインで測定し、解析結果との比較を行いました。

まず、表面電位時刻歴について、解析と実測の結果を比較したプロットを図10に示します。図10(a)のフロアはサンプル点の中で最も塗膜が析出しづらい場所、図10(b)のバックドアは最も析出しやすい場所です。表面電位の立ち上がり時刻や最大電位が両地点で大きく



図8 妥当性確認事例(実ライン解析)の概要図

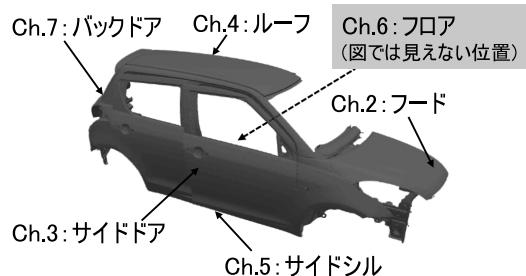
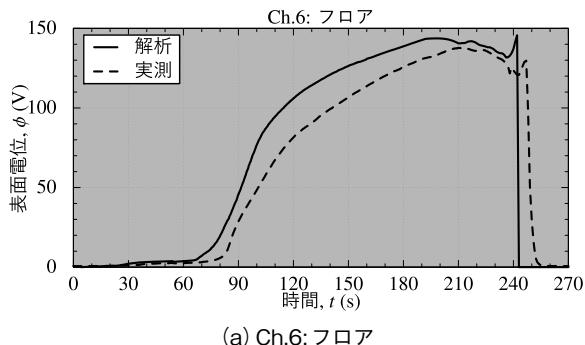
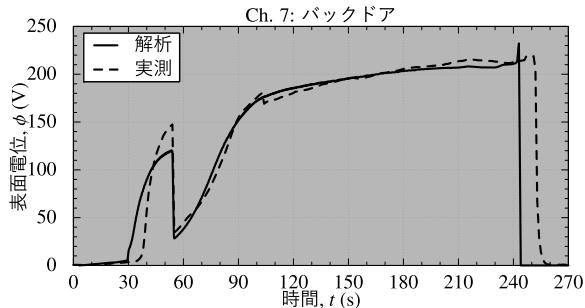


図9 妥当性確認事例における表面電位時刻歴および最終膜厚のサンプル点



(a) Ch.6: フロア



(b) Ch.7: バックドア

図10 妥当性確認事例における表面電位時刻歴の比較

異なりますが、解析結果は実測と実用的な精度で一致していることが分かります。

次に、各サンプル点の最終膜厚について解析と実測の結果を比較した一覧を表2に示します。精度にまだ改善の余地があるものの、最終膜厚誤差は3ミクロン未満であり、実用に耐える予測精度が得られています。本事例の詳細およびその他の妥当性確認例については文献[1]をご参照下さい。

#### 5 おわりに

EDESSEMに採用されている次世代有限要素法、平滑化有限要素法(S-FEM)、の優れた解析性能を中心に

表2 妥当性確認事例におけるサンプル点の最終膜厚比較

サンプル点	実測値 ( $\mu\text{m}$ )	解析値 ( $\mu\text{m}$ )	誤差 ( $\mu\text{m}$ )
Ch. 2: フード	20.1	21.4	+1.3 (+6.5%)
Ch. 3: サイドドア	19.0	21.0	+2.0 (+10.5%)
Ch. 4: ルーフ	17.0	19.3	+2.3 (+13.5%)
Ch. 5: サイドシル	20.0	21.6	+1.6 (+8.0%)
Ch. 6: フロア	–	14.5	–
Ch. 7: パックドア	23.0	20.3	-2.7 (-11.7%)

技術解説を行いました。電着塗装解析に限らず、複雑形状を対象とする固体解析や伝熱解析などでもS-FEMの有用性が確認されています。本稿を期に、S-FEMを使用／研究してみようという方が一人でも現れてくれれば幸いです。

「100年に一度の変革期」にあると言われる自動車業界はEV・自動運転・コネクテッド化の話で持ち切りです。その一方で、錆びずに長持ちする自動車へのニーズは何ら変革を受けることなく続いている。自動車製造の屋台骨の1本と言える防錆技術にEDESFEMが貢献し続けられるよう、今後も技術改善に努めて参ります。

## ■参考文献

- [1] 大西有希、電着塗装シミュレータ「EDESFEM」オフィシャルウェブサイト、<https://edes.fem.jp/>, (2023).
- [2] 計算力学研究センター、電着塗装シミュレータ EDESFEM 製品案内、<https://www.rccm.co.jp/product/fluid/edesfem/>, (2023).
- [3] G. R. Liu et al., "Smoothed Finite Element Methods", CRC Press, (2010).
- [4] 大西有希、電着実験ラボの紹介、[https://www.a.sc.e.titech.ac.jp/~yuki/ed\\_exp\\_lab/](https://www.a.sc.e.titech.ac.jp/~yuki/ed_exp_lab/), (2023).
- [5] FrontISTR commons, "FrontISTR v5.5 Release Note", [https://www.frontistr.com/sys/files/release/v5.5/ReleaseNote\\_ja.pdf](https://www.frontistr.com/sys/files/release/v5.5/ReleaseNote_ja.pdf), (2023).
- [6] T. Jinsong et al., "An edge center-based strain-smoothing triangular and tetrahedral element for analysis of elasticity", *European Journal of Mechanics - A/Solids*, Vol. 95, p. 104606, (2022).

## 記事募集

### 【先進技術解説】

本誌は、読者である計算工学に関心を持つ研究者や技術者の方々に、この分野の時宜にかなった役立つ技術や情報を発信することも使命であると考えております。その中で、先進的な技術の紹介と解説は極めて重要であります。つきましては、読者の方々に【先進技術解説】の記事を募集しますので、ご協力をお願い致します。なお、計算工学との関係が薄い内容、極端に商用に偏った内容など、掲載できない場合もありますので、ご承知おき願います。

問い合わせ先：日本計算工学会 会誌委員会  [jsceseditor@googlegroups.com](mailto:jsceseditor@googlegroups.com)