



癌の温熱療法の効果を評価するための 160億自由度大規模可視化

杉本振一郎
(八戸工業大学)

第3回AVS可視化フォーラム

2018.08.24



目次

- 研究背景・目的
- 解析手法
 - 高周波電磁界問題
 - 階層型領域分割法
- 可視化
 - 数値人体モデル
 - データの変換
 - 可視化結果
- おわりに



研究背景

- **癌の温熱療法**: 定量的な評価
 - 数値人体モデルの高周波電磁界解析
 - 癌の直径は数mm
 - 0.1 mm以下の解像度(1兆自由度以上)
 - 解像度0.5 mm, 約160億自由度の解析
 - 約10分(東大Oakleaf-FX, 2016年11月)
 - 次の課題
 - 電磁界解析の結果を用いた人体内部の熱伝導解析
 - 電磁界解析と熱伝導解析の結果の可視化
 - 可視化: 医療現場での活用
 - ファイル数2万弱, ファイル容量4 TB弱



研究背景

- 数TBのデータの取り扱い是非常に困難
 - センターから研究室のコンピュータへの転送
 - ファイルの格納場所
 - 手元のコンピュータでの効率的な可視化処理



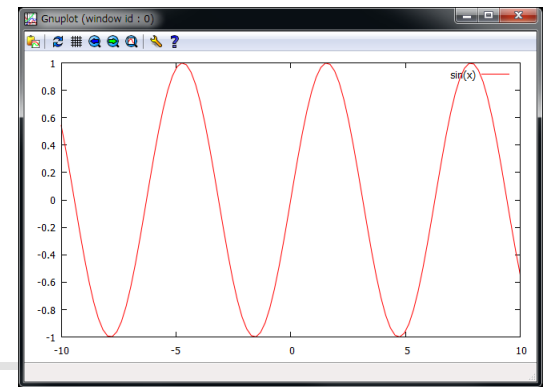
- スーパーコンピュータ上での可視化
 - 視点や断面を変えるたびにスーパーコンピュータを利用？
- 解析と同時に画像を生成
 - 視点や断面を変えるたびに解析からやり直し



研究目的

- 160億自由度数値人体モデルの大規模可視化
 - 名古屋大学情報基盤センター 大規模可視化システム
 - ファイル数2万弱, ファイル容量4 TB弱
 - データを大幅に削減
 - 治療効果の検討という観点から可視化に必要な情報を選別
 - 適切なファイル形式に変換
 - デスクトップパソコン上で可視化を実施

高周波電磁界問題



■ ベクトル波動方程式

$$\text{rot} \left(\frac{1}{\mu} \text{rot} E \right) - (\omega^2 \epsilon - i\omega\sigma)E = i\omega J \quad \text{in } \Omega,$$

$$E \times n = 0 \quad \text{on } \partial\Omega,$$

$$J = \sigma \hat{E}$$

■ 有限要素方程式

$$\iiint_{\Omega} \text{rot} E_h \cdot \frac{1}{\mu} \text{rot} E_h^* dv - \iiint_{\Omega} (\omega^2 \epsilon - i\omega\sigma) E_h \cdot E_h^* dv = \iiint_{\Omega} i\omega J_h \cdot E_h^* dv.$$

E : 電界[V/m]

i : 虚数単位

μ : 透磁率[H/m]

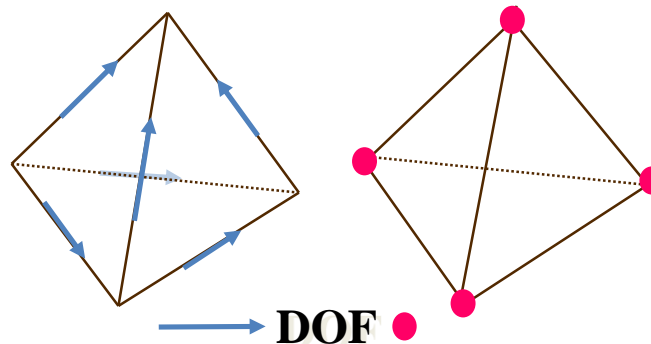
ω : 角周波数[rad/s]

ϵ : 誘電率[F/m]

σ : 導電率[S/m]

J : 放射源の電流密度[A/m²]

\hat{E} : 既知の電界

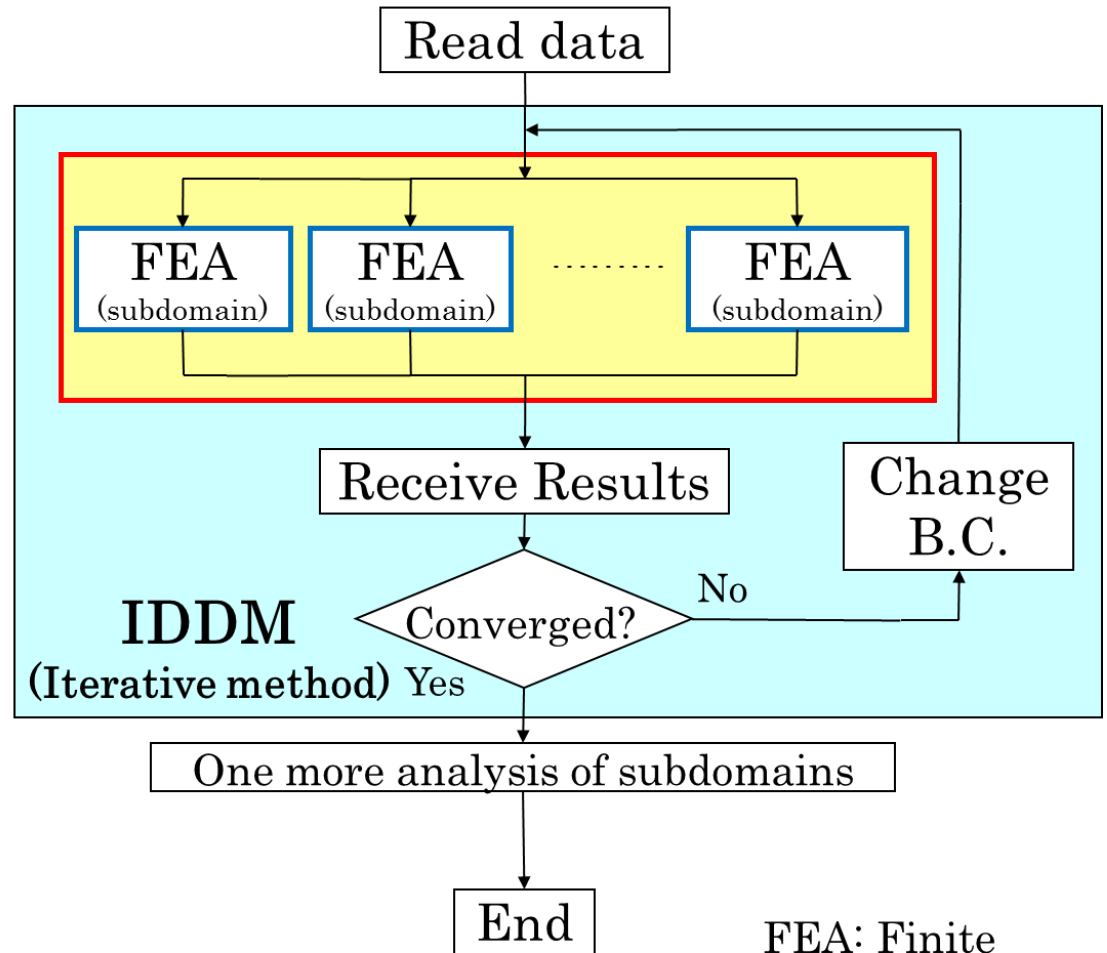


階層型領域分割法

(HDDM: Hierarchical Domain Decomposition Method)

Choose u_B^0 ;
 $r^0 = Su_B^0 - g$;(a)
 $p^0 = z^0 = M^{-1}r^0$;
 for $n = 0, 1, \dots$;
 $q^n = Sp^n$;(b)
 $\alpha^n = (r^n)^T z^n / (p^n)^T q^n$;
 $u_B^{n+1} = u_B^n - \alpha^n p^n$;
 $r^{n+1} = r^n - \alpha^n q^n$;
 $z^{n+1} = M^{-1}r^{n+1}$;
 $\beta^n = (r^{n+1})^T z^{n+1} / (r^n)^T z^n$;
 $p^{n+1} = z^{n+1} + \beta^n p^n$;
 If $\|r^{n+1}\| < \delta \|r^0\|$, break;
 end;

COCG法



FEA: Finite Element Analysis

数値人体モデル

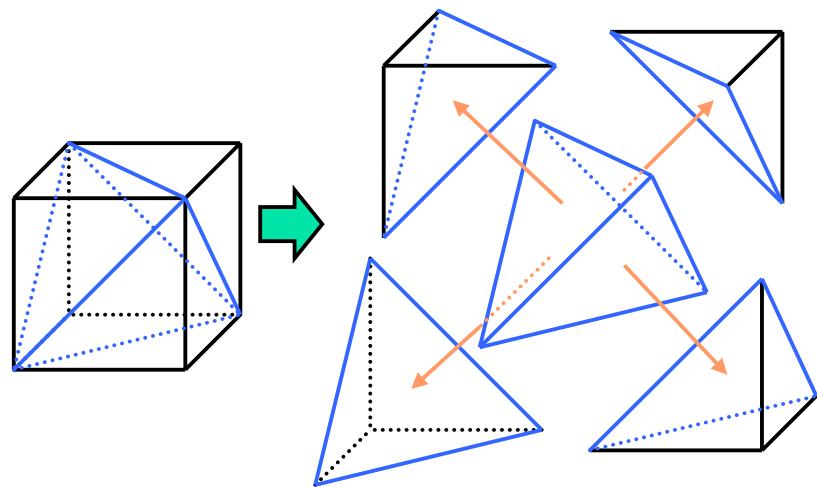
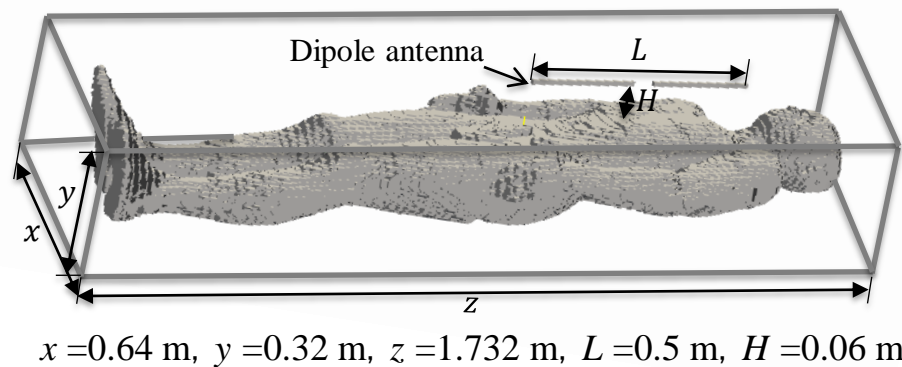
- メッシュ: 1辺0.5 mm
 - 要素数: 14,188,544,000
 - 自由度: 16,605,276,424
 - 領域分割: 144,000,000
 - 周波数: 300 MHz

- 約10分で求解

- 東京大学情報基盤センターOakleaf-FX (9,600プロセス)

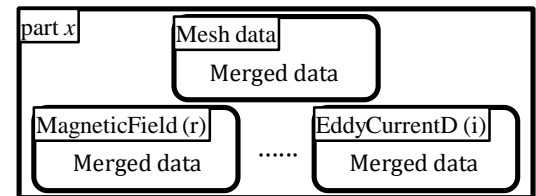
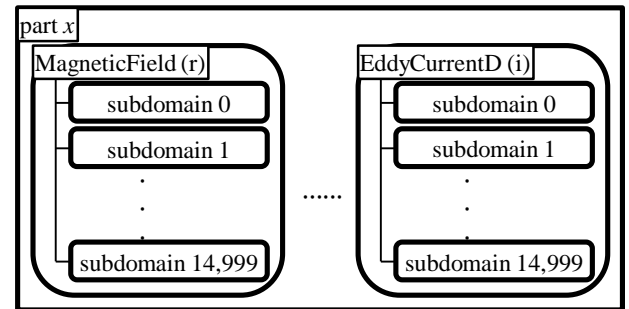
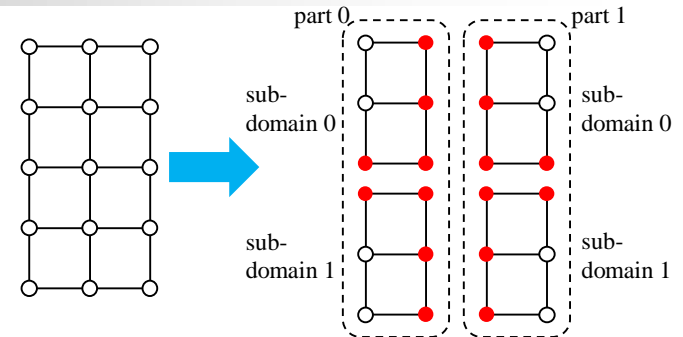
- ファイル数2万弱, ファイル容量4 TB弱(AdvIO)

- メッシュ(9,600個, 1.7 TB), 解析結果(9,600個, 2.0 TB)



データ変換

- 階層型領域分割法独特のデータ構造の変換
 - MPIプロセスごとにpartを割り当て
 - part内には多数のsubdomain
 - AVSでは読み込めない
- part内でメッシュ, 物理量ごとにsubdomainのデータをマージ





データの選別

- 治療効果の検討という観点から可視化に必要な情報を選別
 - 42°Cを超えているか? : 倍精度 -> 単精度
 - AdvIO -> UCD
 - subdomainデータのマージ
 - 既知の癌が対象 : 特定の臓器のデータのみ
 - UCD -> HDF5
 - AVS/Express
 - 癌の位置は特定済み, 値の範囲は限定(カラーマップ確定): 表面あるいは断面の色情報
 - HDF5 -> GFA
 - AVS/Express

データ容量と可視化

■ データ容量

- AdvIO: 約2万, 約4 TB
- UCD: 9,600, 537 GB
 - 単精度, subdomainデータのマージ
- HDF5: 約757 MB(心臓)
 - 特定の臓器のデータのみ
- GFA: 約50 MB~(心臓)
 - 表面あるいは断面の色情報のみ
 - 皮膚や骨の表面情報を含む

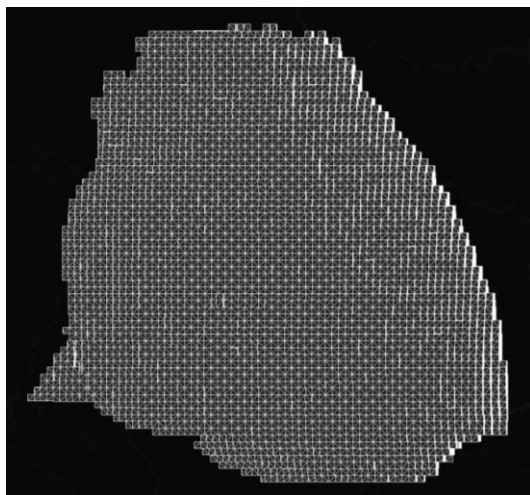
■ 可視化

- 静止画: 3D AVS Player
- 動画: 3D AVS Player, AVS/Express

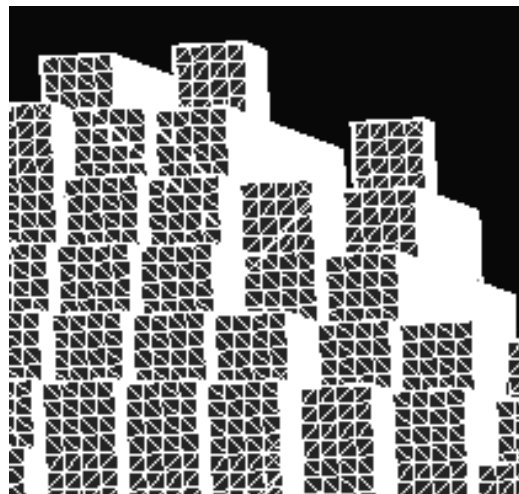
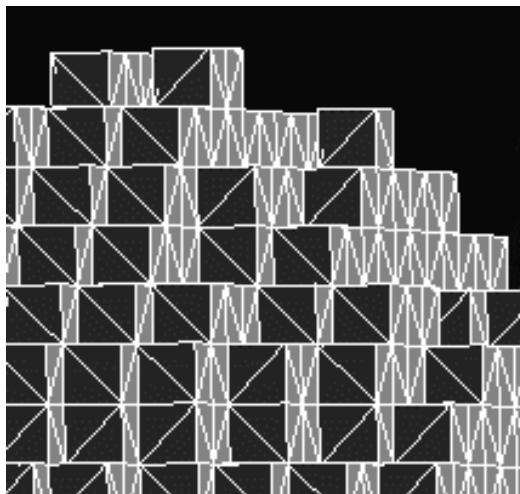
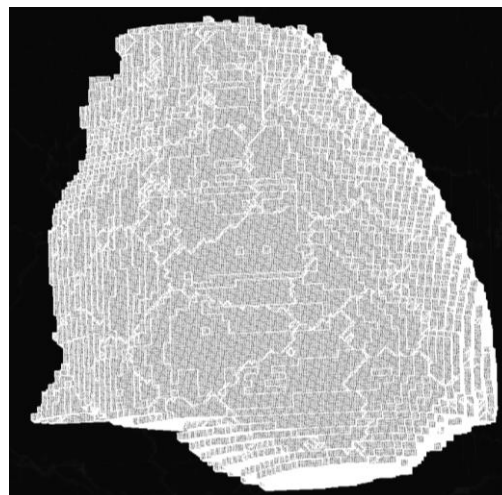


メッシュ(心臓)

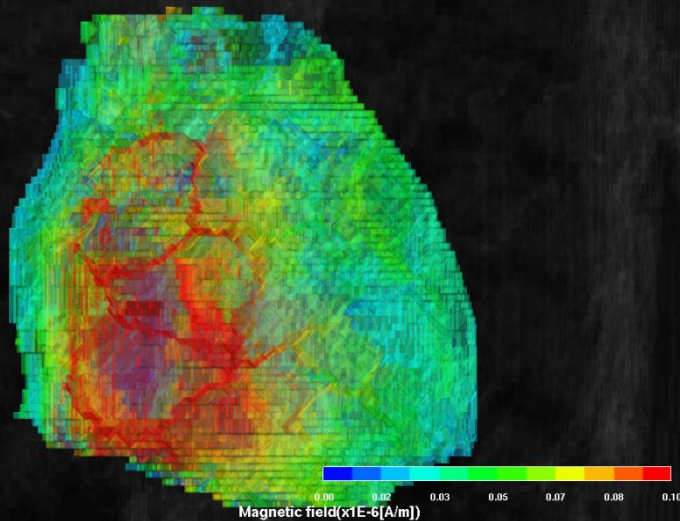
解像度2 mm



解像度0.5 mm



磁場(心臓)

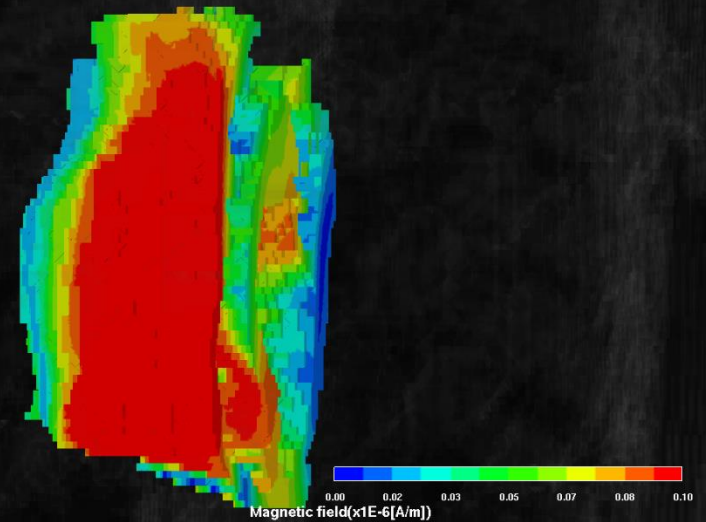


GFAファイル: 564 MB

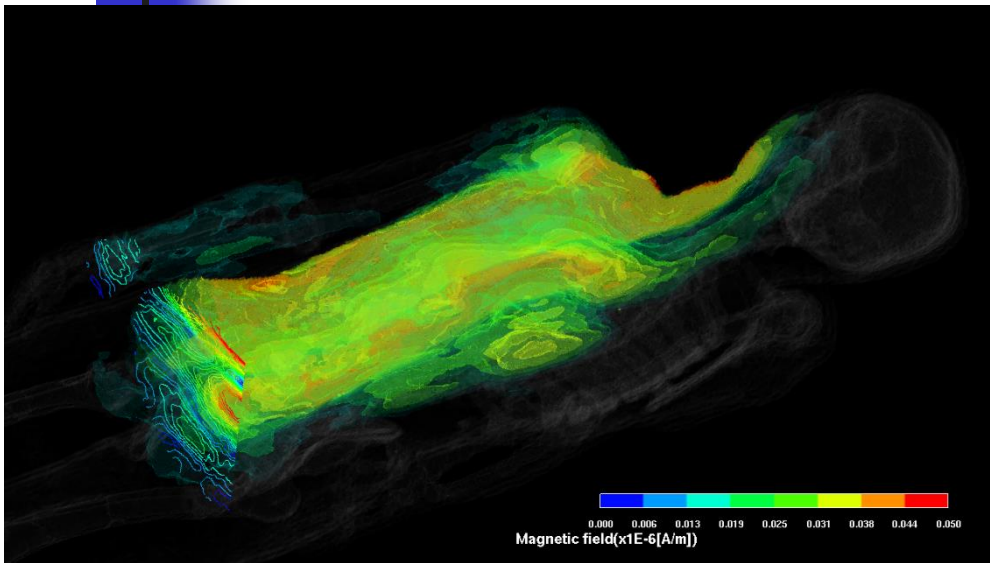
メッシュ表面

臓器表面

断面24枚



全身の可視化



(上) 右上半身の磁場の等値面(GFA約2.2 GB)
(右) 右上半身の磁場の等高線(GFA約49 MB)

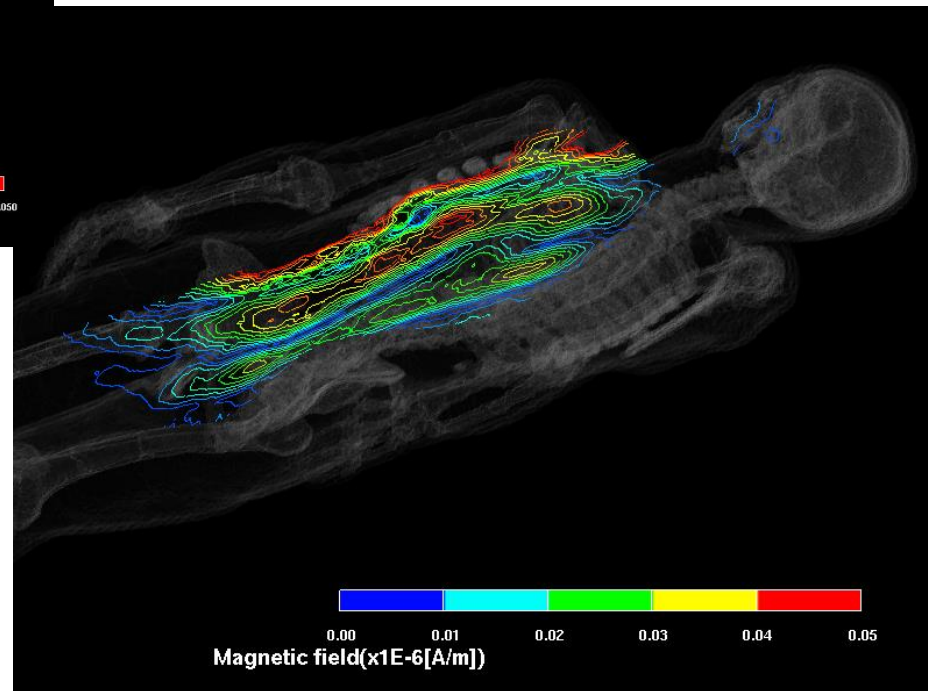
HDF5ファイル: 約88 GB

空気領域の除去(UCD)

2段階の変換

UCD -> 分割HDF5: メッシュ, 磁場(実部)

分割HDF5 -> HDF5





おわりに

- 160億自由度数値人体モデルの大規模可視化
 - 名古屋大学情報基盤センター 大規模可視化システム
 - ファイル数2万弱, ファイル容量4 TB弱
 - 治療効果の検討という観点から可視化に必要な情報を選別
 - 適切なファイル形式に変換
 - デスクトップパソコン上で可視化
- 今後の課題
 - スムージングを用いたボクセルの階段形状の除去による精度向上
 - 高周波電磁界解析の結果を用いた熱伝導解析と可視化
 - さらに細分割した1,000億自由度規模の解析と可視化



謝辞

- 本研究で用いた計算機リソースの一部は東京大学情報基盤センターのFX10スーパーコンピュータシステム「大規模HPCチャレンジ」より提供された.
- 本研究の一部はJSPS科研費15K17499, 17H02829, 17H03256, および独立行政法人 科学技術振興機構の戦略的研究推進事業CRESTの助成を受けて実施された.
- AVSを使用するに当たってサイバネットシステム株式会社 汎用可視化技術グループの皆様の支援を受けた.
- ここに記し, 感謝の意を示す.