

2014/4/25

先駆的科学計算に関するフォーラム2014

(Forum on Advanced Scientific Computing 2014)

～先端的計算科学研究プロジェクト成果報告～

並列有限要素法に基づく人体 内部の高周波電磁界の大規 模シミュレーション

武居 周（苫小牧高専 電気電子工学科）



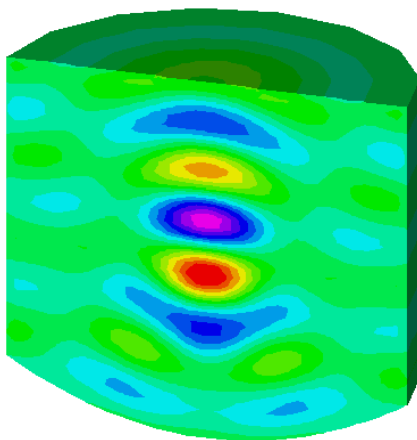
目次

- イントロ, 目的
- 基礎式, 有限要素定式化, 方程式の性質, 領域分割法
- 解析: 数値人体モデルを用いた人体内部の電波伝搬解析
- 性能評価
- まとめ

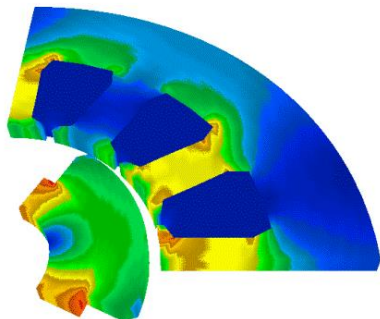
イントロ：電磁界シミュレーション

アンテナ設計，電気機器設計，
電磁環境問題の評価などに適用

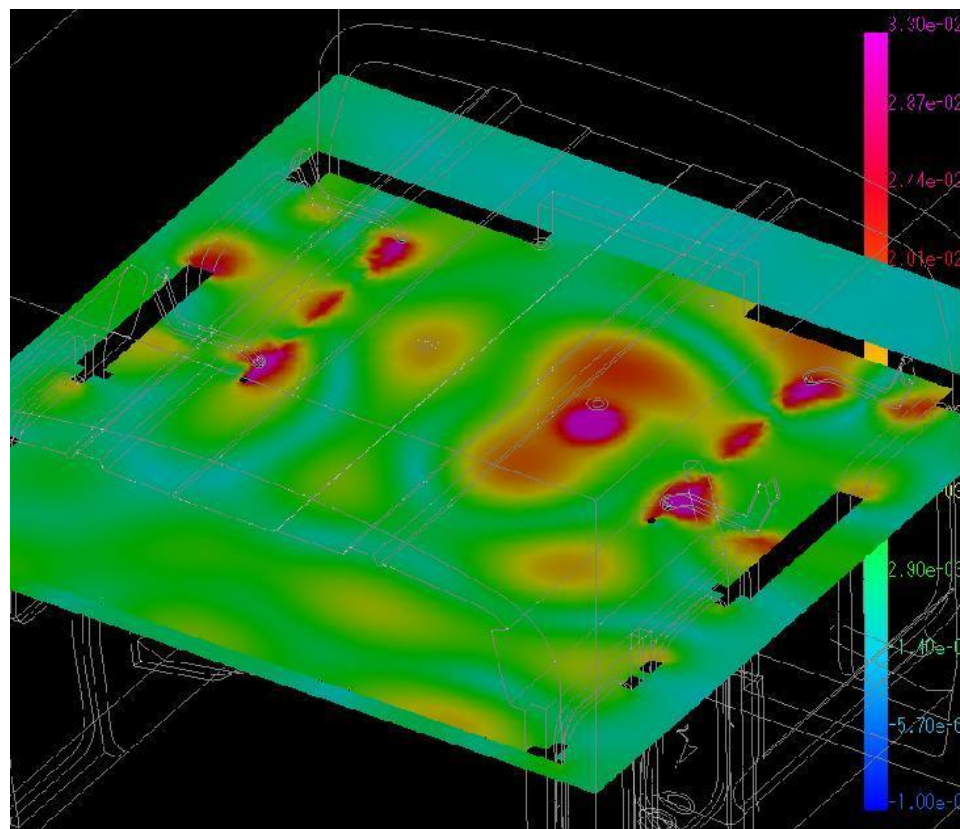
- 国内における研究例



パラボラアンテナのシミュレーション
(株式会社フォトン)



モーターのシミュレーション
(北海道大学)



鉄道車内において携帯電話を使用した
電磁界解析 (苫小牧高専：本研究による成果のひとつ)

イントロ：電磁界シミュレーション

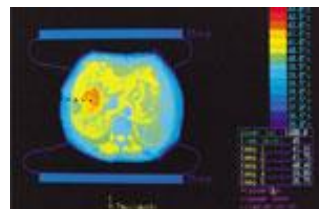


ETCシステムやキーレス
エントリーシステムなど
自動車車内および周辺において



通勤電車などの公共の場
における携帯電話の使用

本研究において
着目する対象



電磁界温熱治療予測技術向上に
向けた人体内部の電波伝搬解析
(出典：山本ビニターHP: <http://www.vinita.co.jp/>)

生活環境中全体にわたる微弱な高周波電磁界の評価手法，電磁界を利用する医療技術等への適用の要求の高まりに対応したい



本研究の目的

- 人体内部などの大規模かつ複雑なモデルによる高精度な計算が可能な高周波電磁界解析手法の検討

本研究のねらい:

階層型領域分割法を用いる高周波電磁界の大規模

解

析手法の研究・開発推進, および環境モデルや人体モデルをはじめとする実用的な数値モデルを用いる手法の実証

基礎式

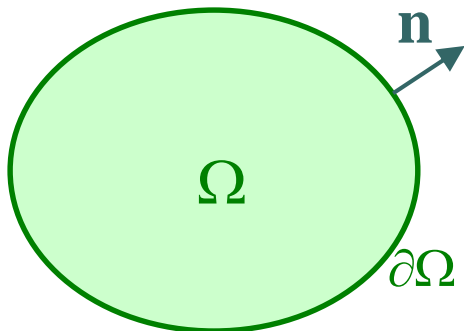
- 変位電流を含むMaxwell方程式より導かれる電界 \mathbf{E} を未知数とするベクトル波動方程式を基礎式とする

$$\text{curl}\left(m^{-1} \text{curl}\mathbf{E}\right) - \omega^2 e\mathbf{E} - j\omega S\mathbf{E} = j\omega\mathbf{J} \quad \text{in } W$$

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

$$\left(\text{curl}\mathbf{E}\right) \times \mathbf{n} - j\omega\sqrt{e_0 / m_0} \left(\mathbf{E} \times \mathbf{n}\right) \times \mathbf{n} = \mathbf{0} \quad \text{on } \partial W_{ABC}$$

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



解くべき領域

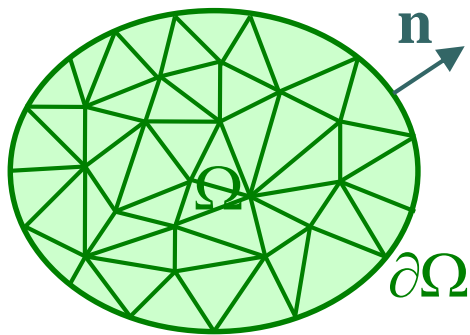
Notice:

- \mathbf{E} [V/m] : 電界 (未知数), $\hat{\mathbf{E}}$ [V/m] : 既知節点値
- $\omega=2\pi f$ [rad/s] : 角周波数 (f [Hz] : 周波数)
- ϵ_0 [F/m] : 真空の誘電率, ϵ_r : 比誘電率
- μ_0 [H/m] : 真空の透磁率, μ_r : 比透磁率
- \mathbf{J} [A/m²] : 電流密度, σ [S/m] : 導電率

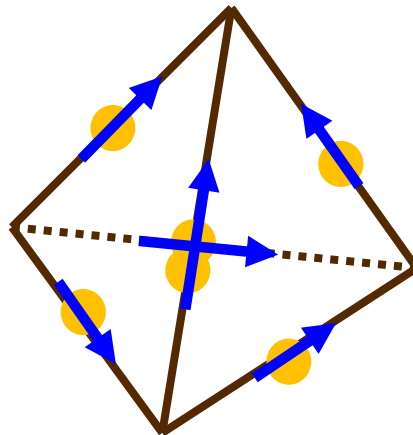
E法による有限要素定式化

- 電界 \mathbf{E} を未知数とするベクトル波動方程式の弱形式を導き、辺要素によって以下の有限要素方程式を得る

$$\iiint_{\Omega} m^{-1} \operatorname{curl} \mathbf{E}_h \cdot \operatorname{curl} \mathbf{E}_h^* dv - \omega^2 \epsilon \iiint_{\Omega} \mathbf{E}_h \cdot \mathbf{E}_h^* dv - j\omega S \iiint_{\Omega} \mathbf{E}_h \cdot \mathbf{E}_h^* dv + j\omega \sqrt{\epsilon_0 / m_0} \iint_{\partial \Omega_{ABC}} (\mathbf{E}_h \times \mathbf{n}) \cdot (\mathbf{E}_h^* \times \mathbf{n}) dS = j\omega \iiint_{\Omega} \mathbf{J}_h \cdot \mathbf{E}_h^* dv,$$



● 自由度



Notice:

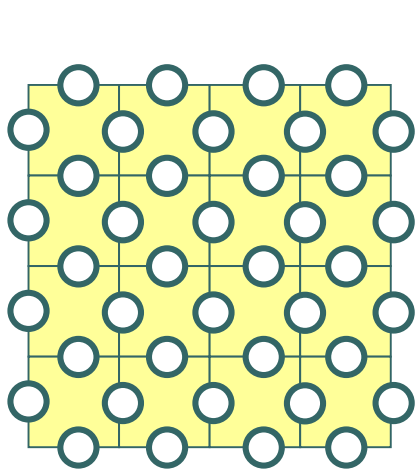
\mathbf{E}_h : \mathbf{E} の有限要素近似

\mathbf{E}_h^* : $\mathbf{E}_h^* \times \mathbf{n} = \mathbf{0}$ となる任意の試験関数

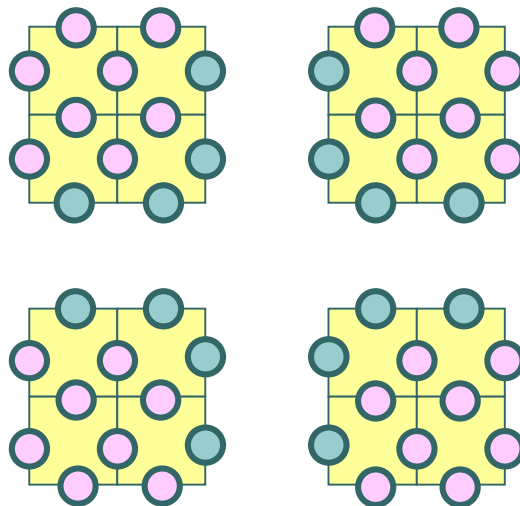
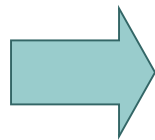
\mathbf{J}_h : \mathbf{J} の有限要素近似

領域分割法による並列化

- 領域分割法(Domain Decomposition Method: DDM)
 - 解析領域（要素分割された有限要素モデル）を空間的にサブ領域（部分領域）に分割することで、演算を**部分領域の独立領域**と**部分領域間の袖領域**に分けて実行する手法



有限要素モデル



領域分割モデル

領域分割は要素ベースで行う
部分領域で要素の重なりはない



有限要素



辺自由度



領域独立辺



袖領域辺

DDMアルゴリズム

解くべき行列式 $ku = f$ の分割

内部(I), 内部境界(B)で自由度を並び替えた式

$$\begin{array}{ccccccc}
 K_{II}^{(1)} & \dots & 0 & K_{IB}^{(1)} R_B^{(1)} & u_I^{(1)} & f_I^{(1)} & \\
 \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \\
 0 & \dots & K_{II}^{(N)} & K_{IB}^{(N)} R_B^{(N)} & u_I^{(N)} & f_I^{(N)} & \\
 R_B^{(1)} K_{II}^{(N)T} \dots & R_B^{(N)} K_{IB}^{(N)T} & \mathring{a} \sum_{i=1}^N R_B^{(i)T} K_{BB}^{(i)} R_B^{(i)} & u_B & \mathring{a} \sum_{i=1}^N R_B^{(i)} f_B^{(i)} & &
 \end{array}$$



部分領域内部と領域間境界に行列方程式を分割

(1) 領域間境界上自由度に関する式 (インターフェース問題)

$$\boxed{M^{-1} S u_B = M^{-1} g,} \quad S = \mathring{a} \sum_{i=1}^N R_B^{(i)T} S^{(i)} R_B^{(i)}, \quad S^{(i)} = K_{BB}^{(i)} - K_{IB}^{(i)T} (K_{II}^{(i)})^{-1} K_{IB}^{(i)}$$

$$g = \sum_{i=1}^N R_B^{(i)} \left\{ f_B^{(i)} - K_{IB}^{(i)T} (K_{II}^{(i)})^{-1} f_I^{(i)} \right\}$$

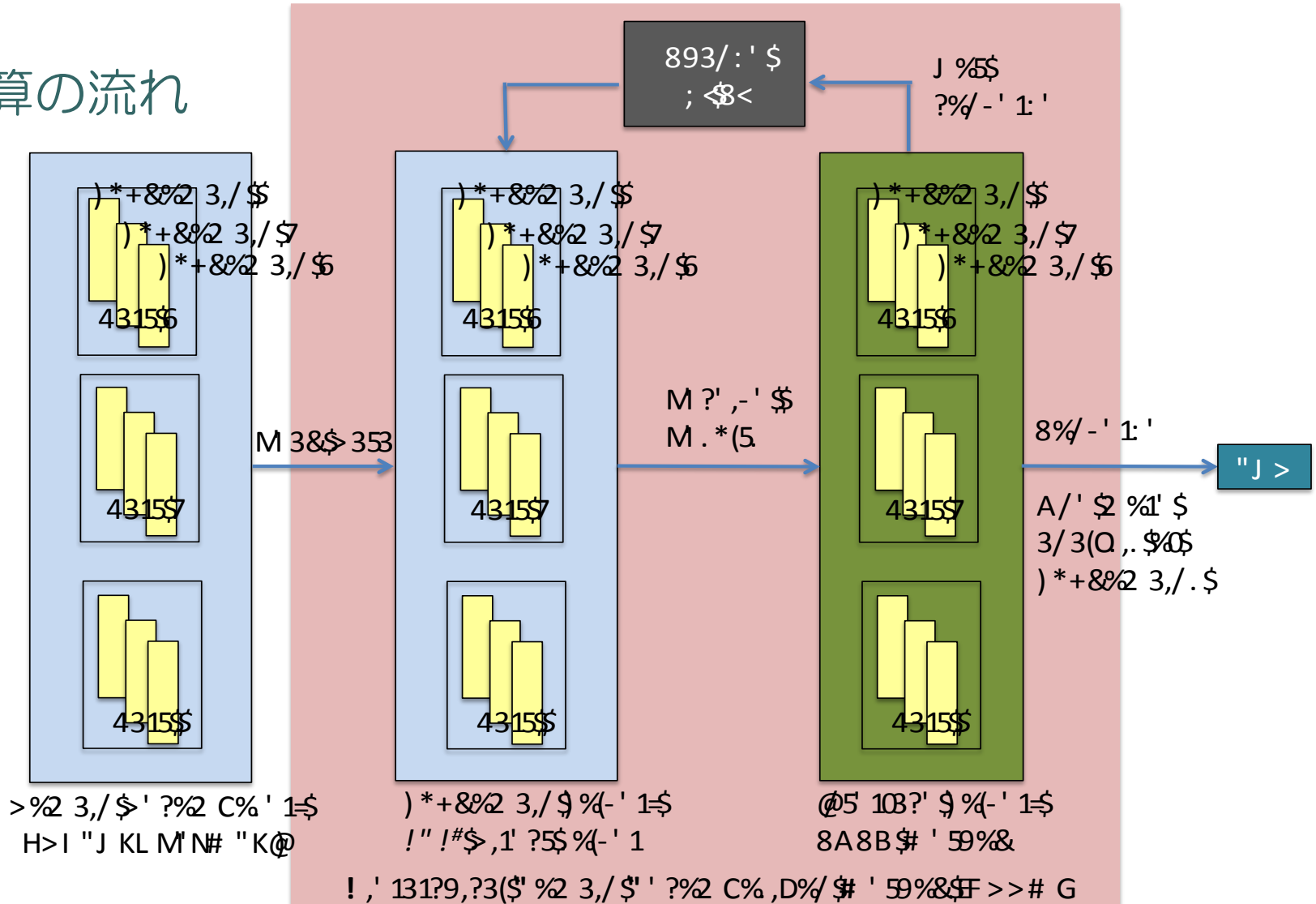
(2) 部分領域内部自由度に関する式

$$\boxed{K_{II}^{(i)} u_I^{(i)} = f_I^{(i)} - K_{IB}^{(i)} u_B,} \quad i = 1, \dots, N$$

(1) を解き, 求めた u_B を用いて
 (2) を解き, 全体の解 u を求める

DDMアルゴリズム

○ 計算の流れ



NICT数値人体モデルを用いた 人体内部の電波伝搬解析

- 癌温熱治療装置の治療計画立案に役立てることを目的とする，NICT数値人体モデルを用いた人体内部の電波伝搬解析
- これらのモデルをNICT（情報通信研究機構）が主導し開発
- 人体（組織・臓器）の形状を微小のボクセルで表現
- 日本人成人男女の平均身長と平均体重に合致したボランティアのMRIデータに基づき、2mmの空間分解能、51の組織・臓器を有する
- 無償（非営利目的）で公開
- ボクセル数，四面体分割時の要素数・辺数
 - 320x160x866(TARO) = 4,400万 voxels
 - 320x160x804(HANAKO) = 4,100万 voxels
 - 全てを四面体にすると、2.2億 tetras
 - 辺の総数は、2.6億 (267,437,186)



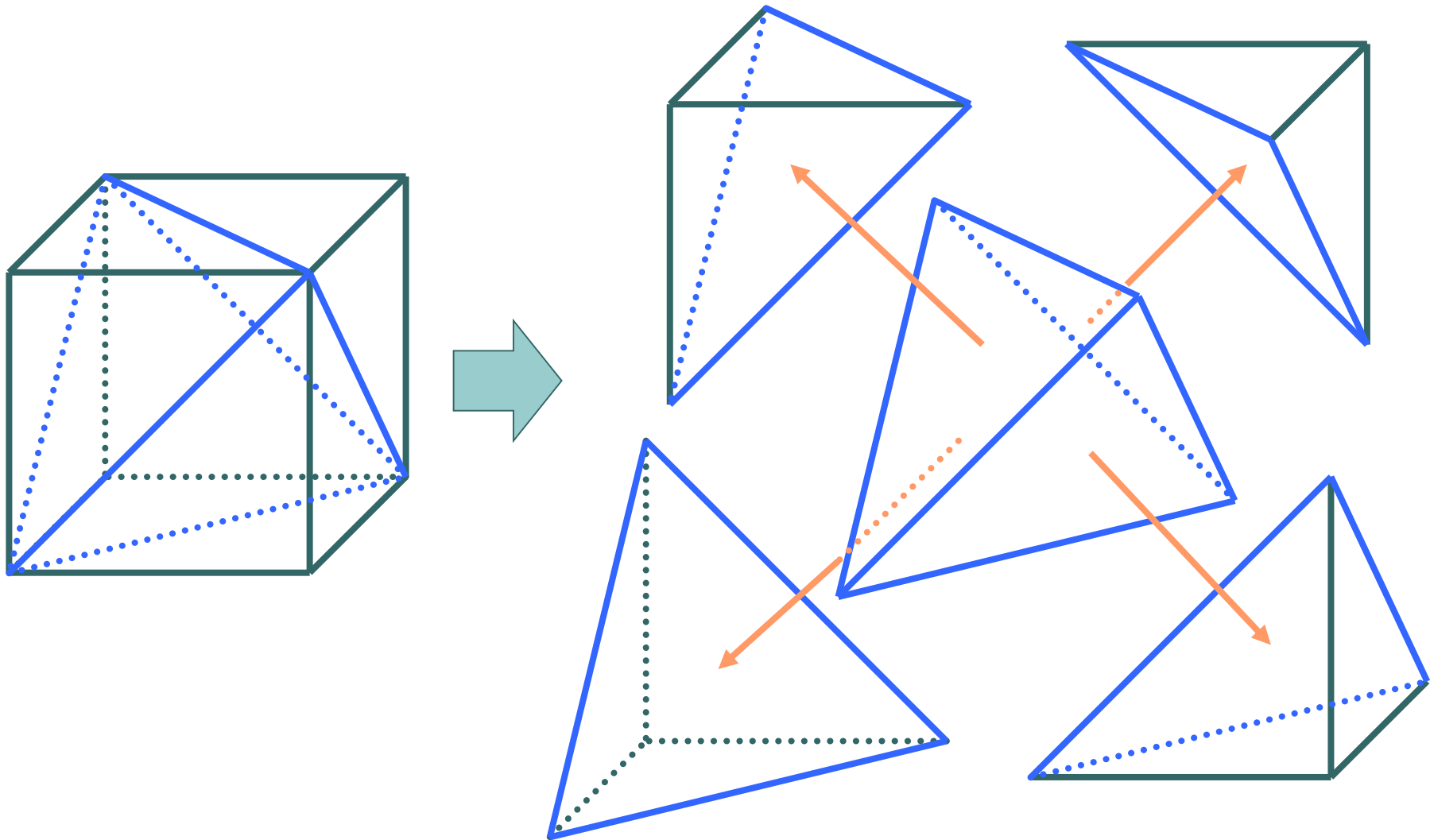
右: 男性モデル(TARO), 左: 女性モデル(HANAKO)
出典: 情報通信研究機構(NICT) Homepage
http://emc.nict.go.jp/bio/model/model01_1.html

 National Institute of
Information and Communications Technology

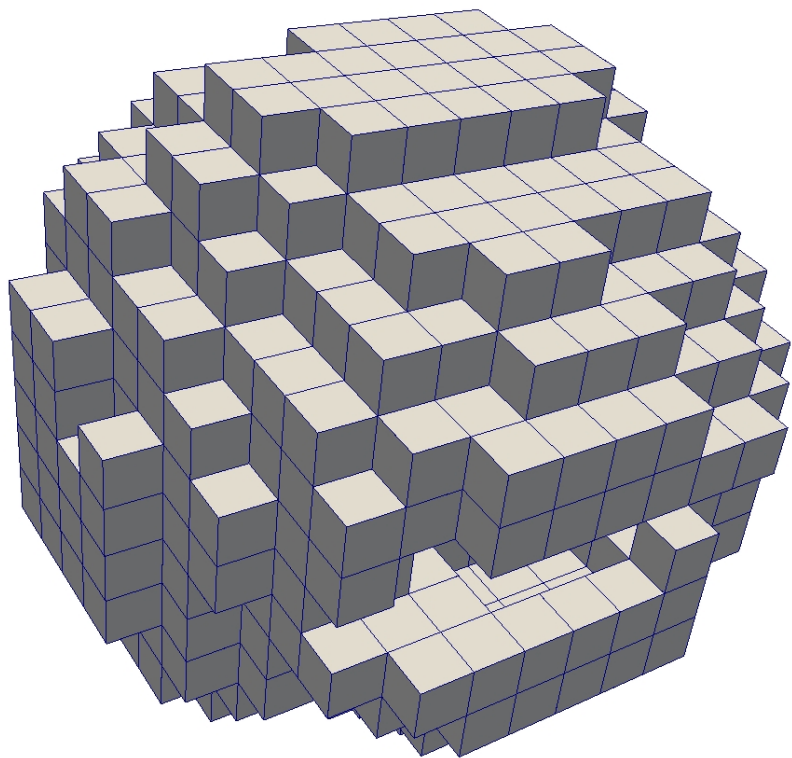
Electromagnetic
Compatibility
Laboratory

Biomedical EMC

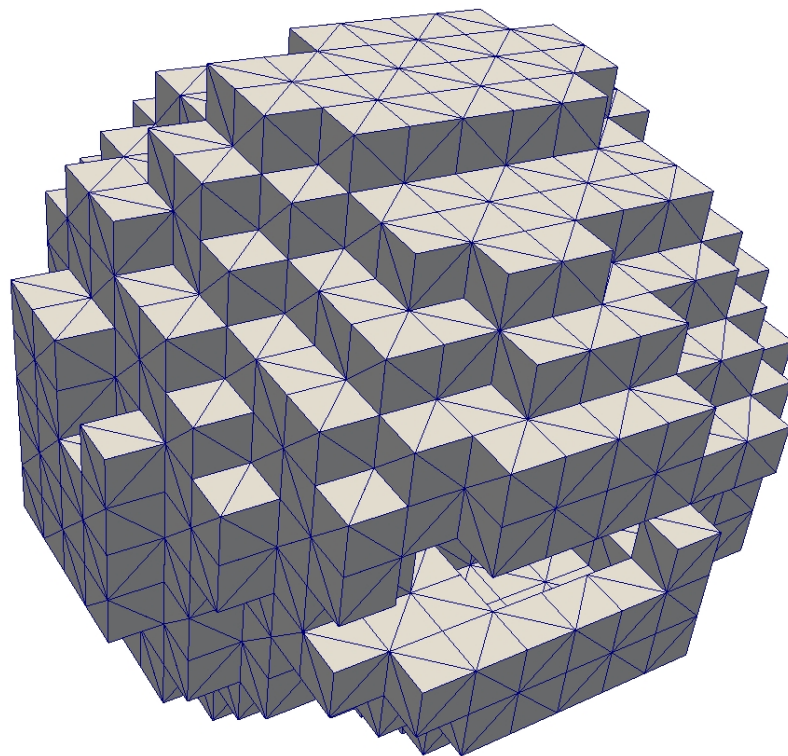
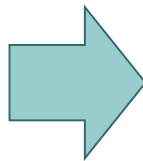
ボクセルを四面体に分割



ボクセルを四面体に分割



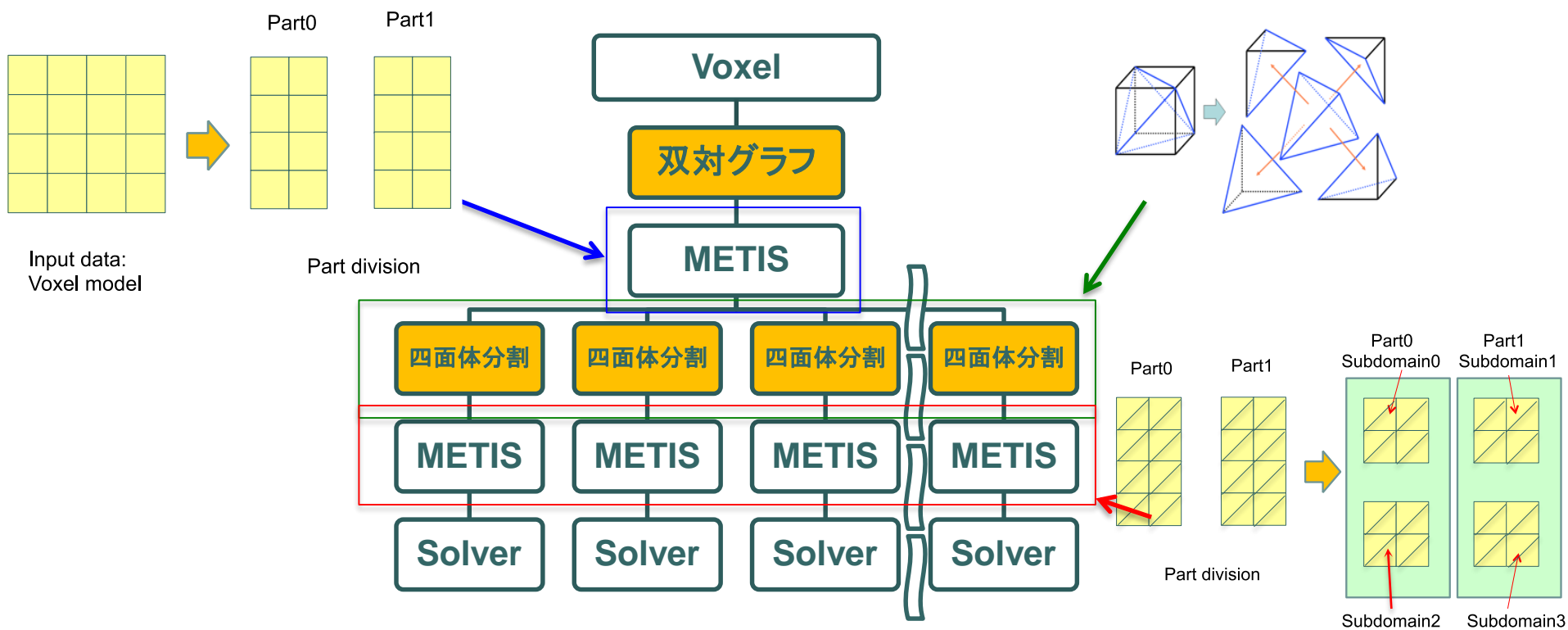
四面体に
分割



ボクセルデータからHDDM 有限要素メッシュを生成するツール

メッシュ生成アルゴリズム

1. 数値人体データ（ボクセル）の読み込み，双対グラフの作成
2. part分割後に，各partのボクセルを四面体分割
3. 各partにおいてsubdomain分割

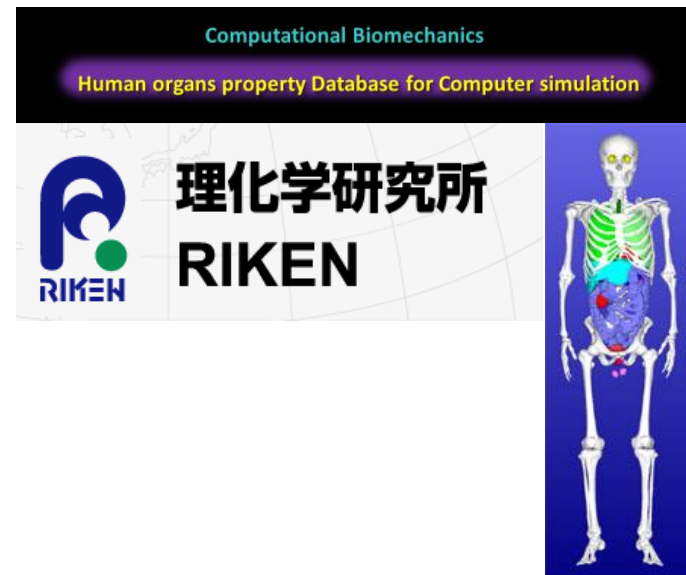


数値例

● 人体モデルに適用する生体物性パラメータ

- (独) 理化学研究所 生体力学シミュレーション身体組織物性値データベース
<http://cfd-duo.riken.go.jp/cbms-mp/index.htm>

材料ID	臓器名	導電率 σ [S/m]	比誘電率 ϵ_s
1	小脳	0.826	58.155
2	脳脊髄液	2.144	70.4
3	角膜	1.069	57.842
4	-		
5	眼球	1.445	67.711
6	灰白質	0.348	41.281
7	視床下部	0.595	56.444
8	水晶体	0.346	37.825
9	松果体	0.809	60.543
10	下垂体	0.809	60.543
11	唾液腺	0.809	60.543
12	視床	0.595	56.444
13	舌	0.693	56.523
14	白質	0.348	41.281
15	副腎	0.809	60.543
16	膀胱	0.3	19.331
17	乳房脂肪 ^{※1}		
18	大腸	0.716	61.121
19	大腸の内容物 ^{※2}	0.4	80
20	十二指腸	0.919	66.279
21	食道	0.919	66.279



※1で示したものは女性(Hanako)用の生体物性パラメータであり、数値モデルに存在しないID4, 37, 42とあわせて対象から除外してある

※2で示した血液および臓器の内容物に関して、本データベースに無いため、生理食塩水と同等程度の導電率および比誘電率とした

数値例

● 人体モデルに適用する生体物性パラメータ

- (独) 理化学研究所 生体力学シミュレーション身体組織物性値データベース

22	胆汁 ^{※2}	0.4	80
23	胆嚢	1.042	60.735
24	心臓	1.019	63.549
25	腎臓	0.857	67.508
26	肝臓	0.52	50.153
27	肺	0.452	38.254
28	卵巣 ^{※1}		
29	膵臓	0.809	60.543
30	前立腺	0.809	60.543
31	小腸	1.701	65.79
32	脾臓	0.844	62.585
33	胃	0.919	66.279
34	胃の内容物	0.4	80
35	腱	0.037	5.531
36	睾丸	0.934	62.064
37	-		
38	甲状腺	0.809	60.551
39	気管	0.565	43.185
40	尿、膀胱の中 ^{※2}	0.4	80
41	子宮 ^{※1}		
42	-		
43	空気(体内空間)	0	1
44	血液 ^{※2}	0.4	80
45	皮質骨	0.104	14.169
46	骨髄-海綿骨 ^{※2}	0.4	80
47	軟骨	0.493	44.559
48	脂肪	0.037	5.531
49	筋肉	0.747	56.932
50	神経(脊髄)	0.36	34.749
51	皮膚	0.541	47.93
52	歯	0.104	14.169
53	靭帯	0.747	56.932
54	小腸の内容物 ^{※2}	0.4	80
55	横隔膜	0.747	56.931
56	精嚢	0.809	60.543
57	海綿体	1.256	62.9
58	膣 ^{※1}		

※1で示したものは女性(Hanako)用の生体物性パラメータであり、数値モデルに存在しないID4, 37, 42とあわせて対象から除外してある

※2で示した血液および臓器の内容物に関して、本データベースに無いため、生理食塩水と同等程度の導電率および比誘電率とした

HPC環境における性能評価

○ 数値モデル

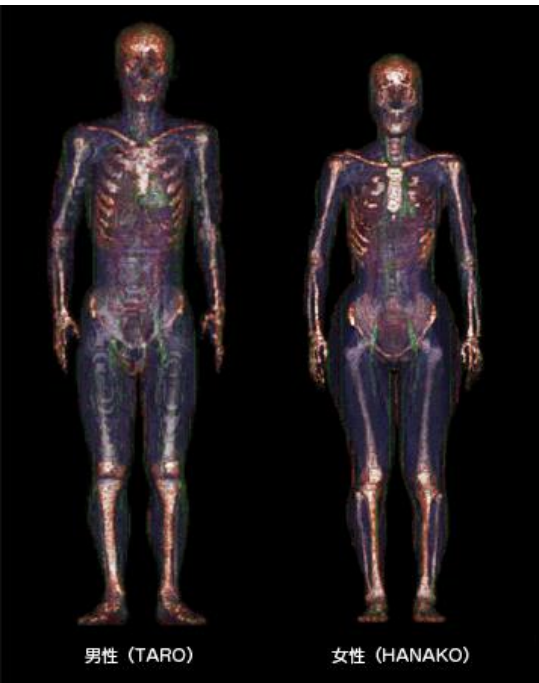
○ NICT数値人体モデル (TARO, 全身)

→Mesh 2: 4mmピッチで分割したモデル
2,771万要素

3,190万複素自由度

→Mesh 4: 2mmピッチで分割したモデル
2.2億要素

2.6億複素自由度



男性 (TARO)

女性 (HANAKO)

右: 男性モデル(TARO)

左: 女性モデル(HANAKO)

出典: 情報通信研究機構(NICT) Homepage

http://emc.nict.go.jp/bio/model/model01_1.html



National Institute of
Information and Communications Technology

Electromagnetic
Compatibility
Laboratory

Biomedical EMC

HPC環境における性能評価

○ HPC環境

- 九州大学情報基盤センターFX10
 - Fujitsu PRIMEHPC FX10 x 8 racks
 - 768 ノード, 181.6 PFlops
 - 6次元メッシュ/トーラスTofuインターコネクト
 - プロセッサ:SPARC64 lx-fx
 - ノード :
 - 16 cores of 1.848 Ghz and 32 GB memory



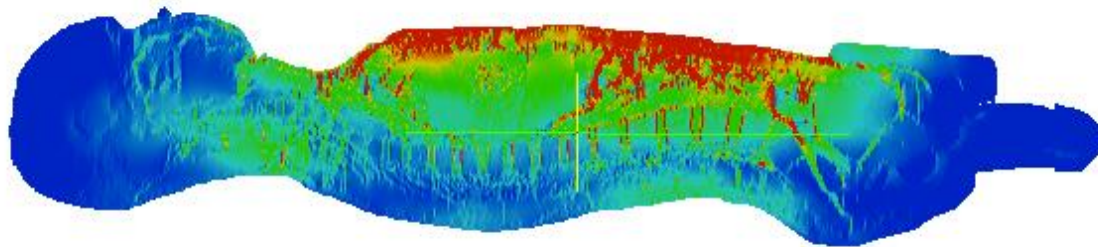
HPC環境における性能評価

- FX10における，実用モデル（NICT数値人体モデル）によるDDM-COCCGの性能評価 I

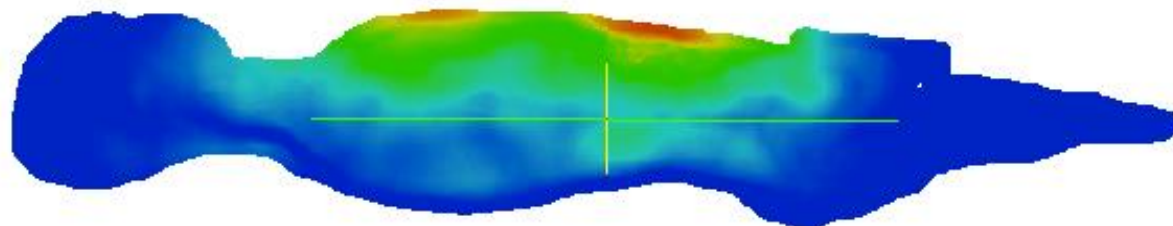
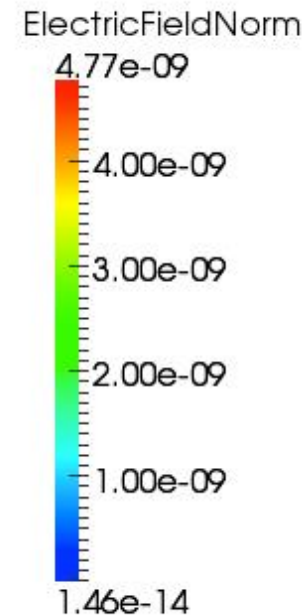
Calculation Time and Average Memory Requirement

Model	Complex DOFs	Memory size / node (MByte)	Num. of Cores	Frequency (MHz)	Iteration counts	Calculation time (hour)
Mesh 2	27.21 M	160	320, 20node	1	2,875	2.7
				8	1,641	1.4
				70	2,199	1.9
				300	9,684	8.5
Mesh 4	260 M	160	320, 20node	1	9,028	7.7
				8	4,817	4.5
				70	7,411	6.3
				300	18,306	15.6

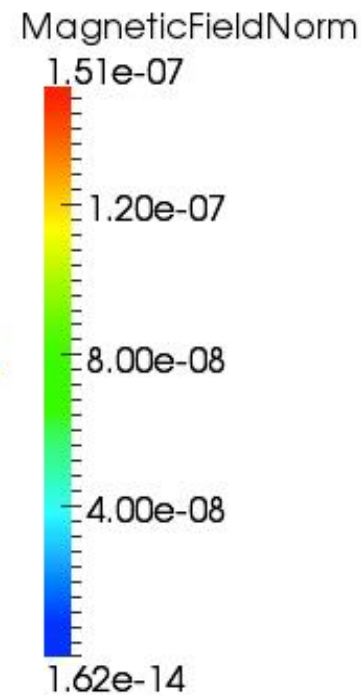
解析結果の可視化例



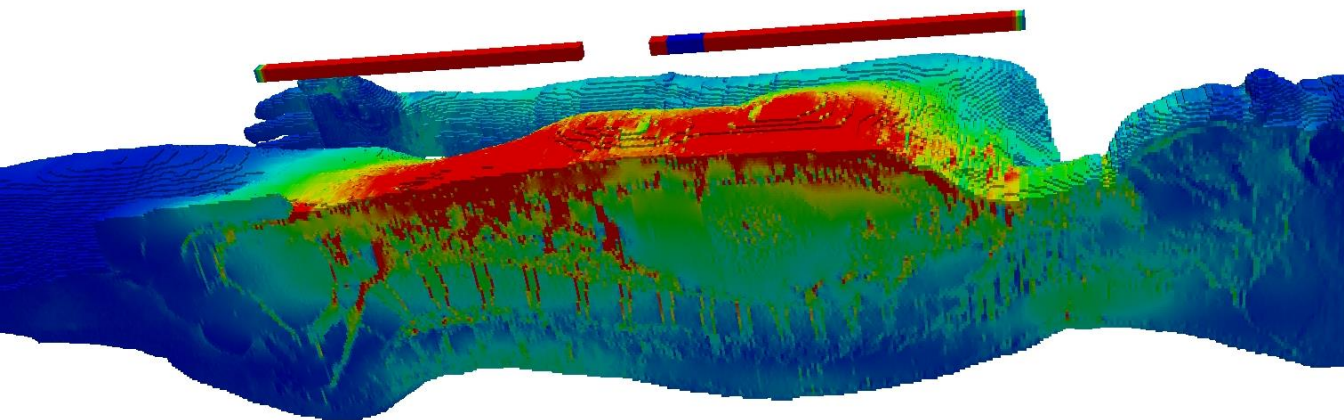
人体内部の電界E[V/m]



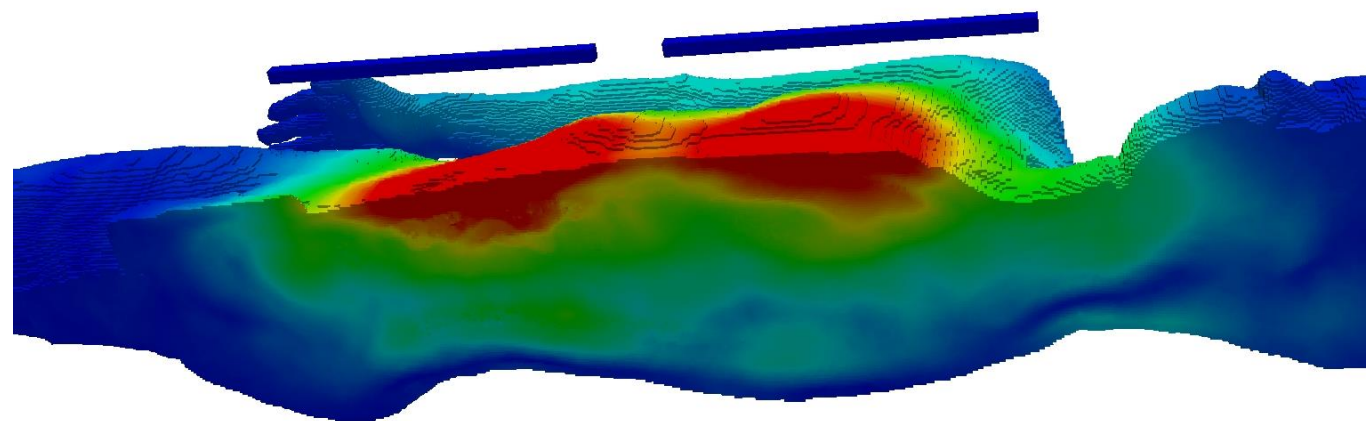
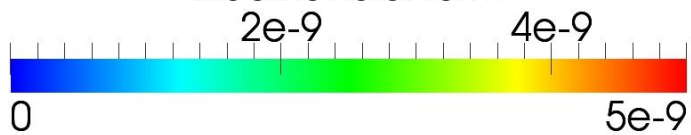
人体内部の磁界H[A/m]



Mesh4の解析結果の可視化(300[MHz])

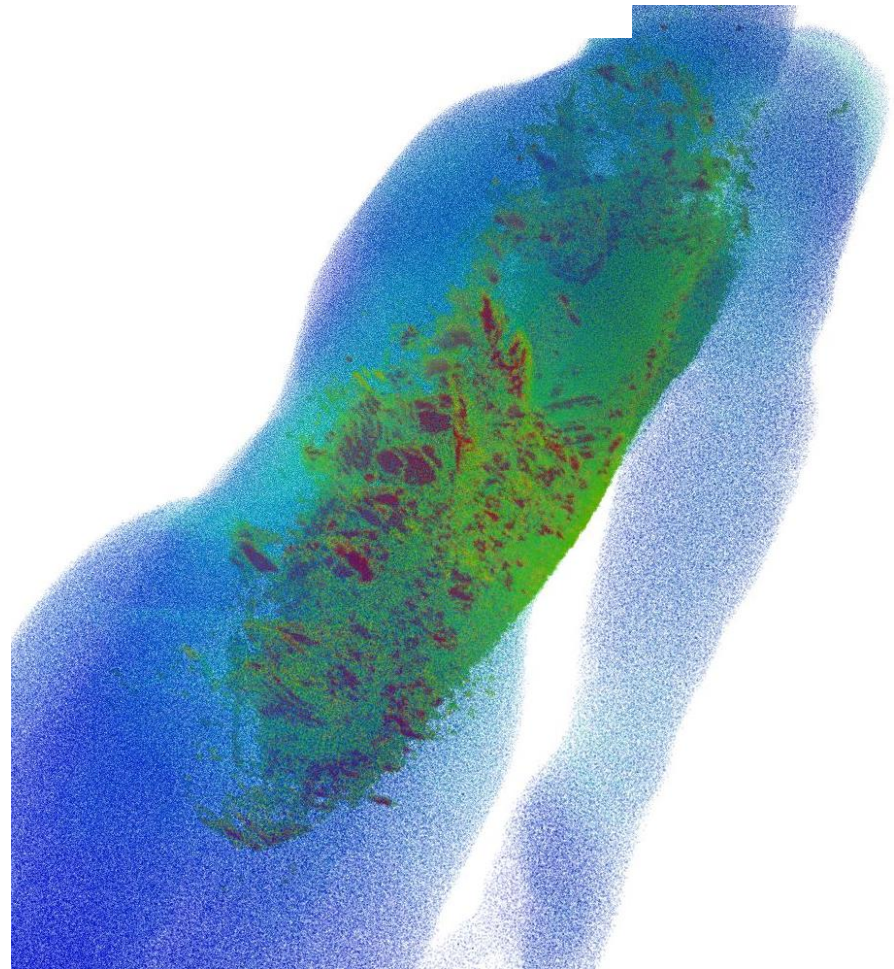
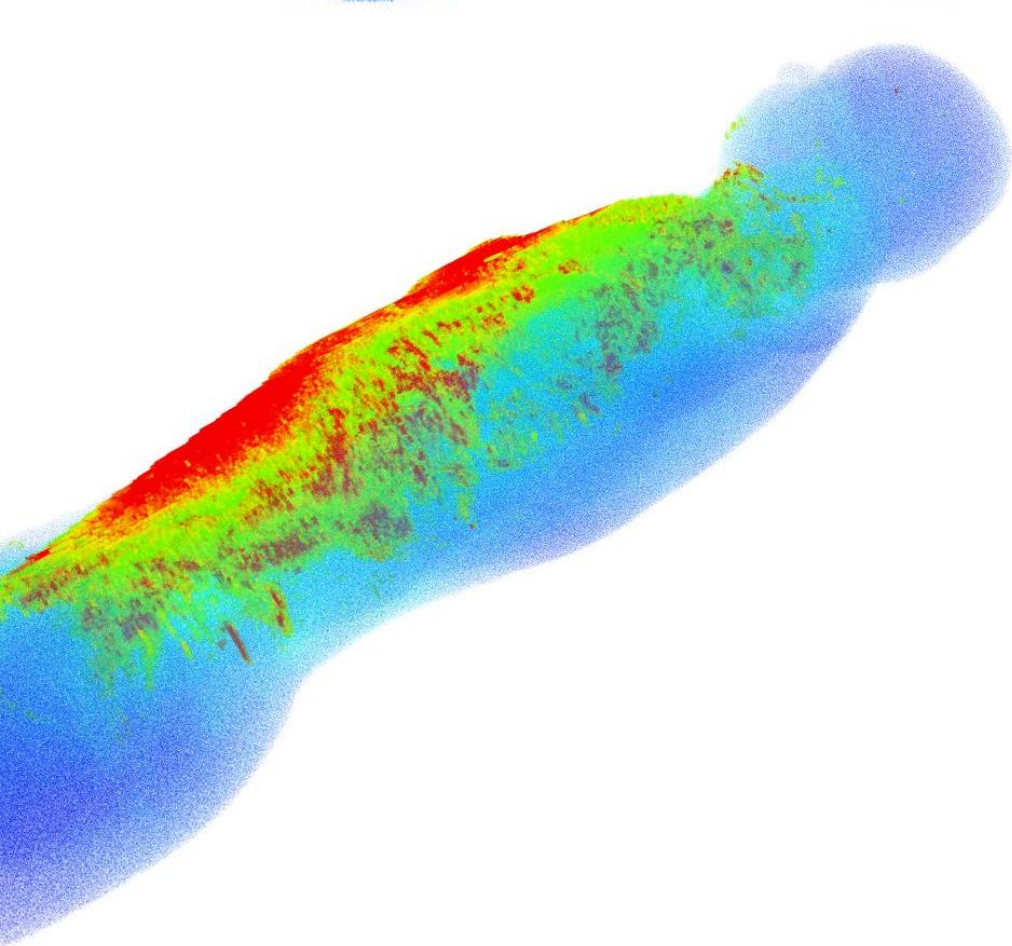
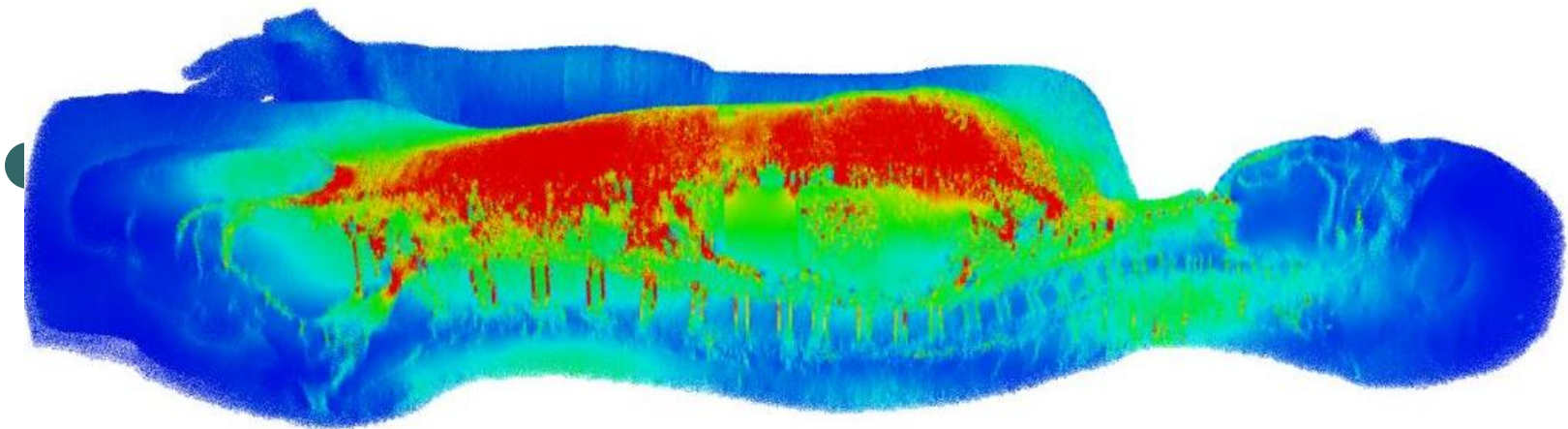


ElectricFieldNorm



MagneticFieldNorm





HPC環境における性能評価

- FX10における，実用モデル（NICT数値人体モデル）によるDDM-COCCGの性能評価Ⅱ

Strong Scaling of the HDD Mesh of 4mm (Mesh 2)

Model	Num. of parts (=Cores)	HDDM loop (sec)	Speed up	Ideal speed up
Mesh 2 -1	320	227	1.000	1
-2	640	144	1.576	2
-3	1280	102	2.225	4
-4	2560	66	3.439	8
-5	5120	42	5.405	16

ノード数2倍
で1.575倍の
高速化

HPC環境における性能評価

- FX10における，実用モデル（NICT数値人体モデル）によるDDM-COCGの性能評価Ⅱ

Strong Scaling of the HDD Mesh of 2mm (Mesh 4)

Model	Num. of parts (=Cores)	HDDM loop (sec)	Speed up	Ideal speed up
Mesh4 -1	320	2195	1.000	1
-2	640	1293	1.698	2
-3	1280	866	2.535	4
-4	2560	548	4.005	8
-5	5120	365	6.014	16

ノード数2倍
で1.698倍の
高速化

Mesh 2よりも問題規模が大きいMesh 4の方が、スピードアップ率が高い。

PCクラスタ (Core i7, 80core) を使用した計算例

Model	Num. of tet. elements	Memory size [G Byte]	PE	Num. of Subdomain per a Part	Analysis frequency [MHz]	Iteration counts	Calc. time[h]
Mesh 2	27.7 M	0.1	80	4,000	1	2,875	1.5
					8	1,641	0.8
					70	2,199	1.1
					300	9,684	4.8
Mesh 4	220 M	0.1	80	23,000	1	9,028	20.4
					8	4,817	11.0
					70	7,411	16.8
					300	18,306	41.4

- もっとも計算時間を要するMesh 4の300MHzにおいて41.4[h]で計算が完了
- 数億要素規模では, PCクラスタの方が有利

➡ HPC環境向けチューニングが必要(実施中)



複素数実装の検討

- 複素数を扱うHDDMでの新たな実装方法を検討
 - データの表現方法
 - 構造体(struct Complex { double re; double im; })
 - double complex型(C99)
 - 四則演算の実装方法
 - 関数
 - マクロ
- 従来の実装と比べて, **4倍の高速化**



データの表現方法

- 高周波電磁界解析コードにおける従来の表現方法

- 構造体“Complex”

```
struct Complex {  
    double re ; /* 実部 */  
    double im ; /* 虚部 */  
};
```

- 新たな表現方法

- C99規格(ISO/IEC 9899:1999)で定められている“double complex”型

四則演算の実装方法

“Structure & functions”

```
void ComplexPlus
( Complex *x, Complex a, Complex b )
{
    (*x).re = a.re + b.re ;
    (*x).im = a.im + b.im ;
} /* addition */
```

```
void ComplexMulti
( Complex *x, Complex a, Complex b )
{
    (*x).re = a.re*b.re - a.im*b.im ;
    (*x).im = a.im*b.re + a.re*b.im ;
} /* multiplication */
```

“Structure & macros”

```
#define ComplexPlus( __x, __a, __b ) { ¥
    (*__x).re = __a.re + __b.re ; ¥
    (*__x).im = __a.im + __b.im ; }
#define ComplexMulti( __x, __a, __b ) { ¥
    double __re = __a.re*__b.re - __a.im*__b.im ; ¥
    (*__x).im = __a.im*__b.re + __a.re*__b.im ; ¥
    (*__x).re = __re ; }
```

“double complex & macros”

```
#define ComplexPlus( __x, __a, __b ) ¥
    { *__x = __a + __b ; }
#define ComplexMulti( __x, __a, __b ) ¥
    { *__x = __a * __b ; }
```



計算条件

○ 計測

- 計算時間[s], ピーク性能比[%]
- 計測はプログラム全体で行う
 - データの入力, 解析, 結果出力など

○ 比較

- old: “structure & functions”
- new: “structure & macros”
- C99: “double complex & macros”

HPC環境向けチューニング

old: “structure & functions” (構造体＋四則演算等の関数)

new: “structure & macros” (構造体＋関数のインライン展開)

C99: “double complex & macros” (double complex型の利用)

ピーク性能比 [%]

Nodes	old	new	C99	Speed-up	
				new	C99
12	1.191	5.010	7.244	4.21	6.08
24	1.185	4.957	7.169	4.18	6.05
48	1.171	4.818	6.868	4.12	5.87
96	1.148	4.599	6.619	4.01	5.76

- インライン展開によって、ピーク性能比が改善
- double complex型が構造体に比べて45%高い



まとめ

- 高周波電磁界コード
 - 大規模解析手法の開発を継続的に実施することが必要
- 基礎式，有限要素定式化，領域分割法
 - E法によるベクトル波動方程式
- 解析例：人体内の電波伝搬解析
 - 2.2億要素の全身モデルの解析に成功
 - HPC環境における性能改善が課題



まとめ

○ 今後の予定（展望を含む）

● HPC環境向けにコードを改良（実施中）

- 本解析コードを利用し，少なくとも100億要素程度の高周波電磁界解析が可能なコード開発を目指す
- 本解析コードのチューニングにより，ピーク性能比をさらにあげてゆく

● 人体シミュレーション機能の，癌温熱治療シミュレータ構築に向けた高機能化開発（実施中）

- 熱効果を表現するための熱問題との連成機能（開発・検証）
- ボクセル形状に起因するノイズ除去のためのメッシュスムージング機能（開発中）
- 呼吸運動を表現するための構造問題との連成機能（検討中）
- 血流冷却モデルの導入（検討中）

T h a n k y o u

ご清聴ありがとうございました。



Furano town, Hokkaido , Japan