

高性能磁場解析システム REVOCAP_Magnetic

九州大学大学院
金山 寛



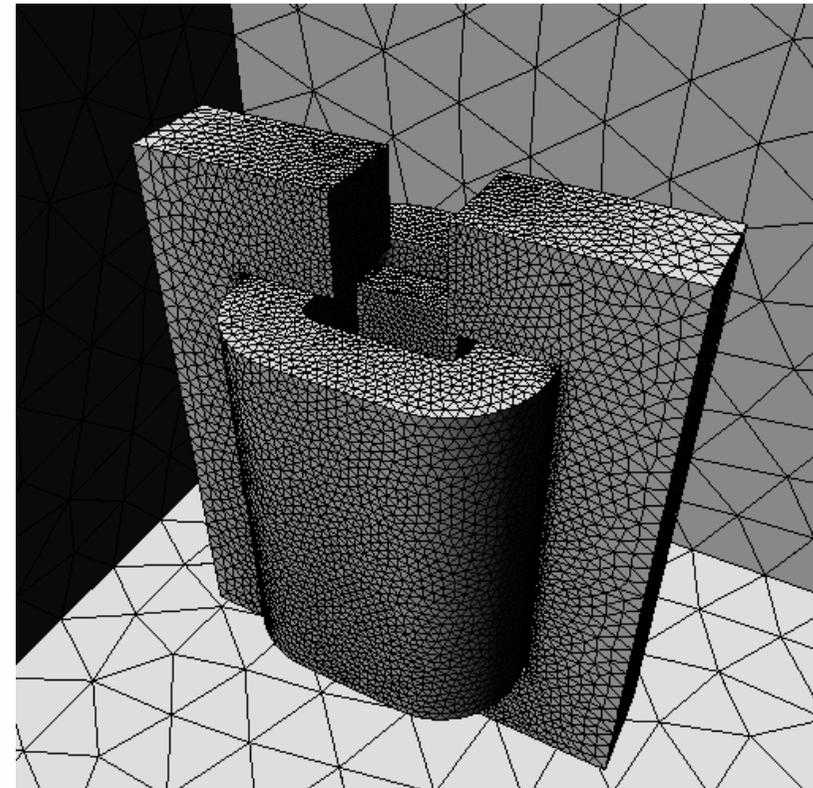
REVOCAP_Magnetic Ver.0.2b

■ 特徴

- 非線形静磁場問題 および 時間調和渦電流問題の有限要素解析
- 階層型領域分割法(Hierarchical Domain Decomposition Method: HDDM)による, 負荷分散を行った並列処理
- 大規模解析
 - 5,000万自由度の非線形静磁場解析が約8時間半(32並列)
 - 4,400万複素自由度(実質約9,000万自由度)の時間調和渦電流解析が5時間弱(32並列)

REVOCAP_Magnetic Ver.0.2b (機能)

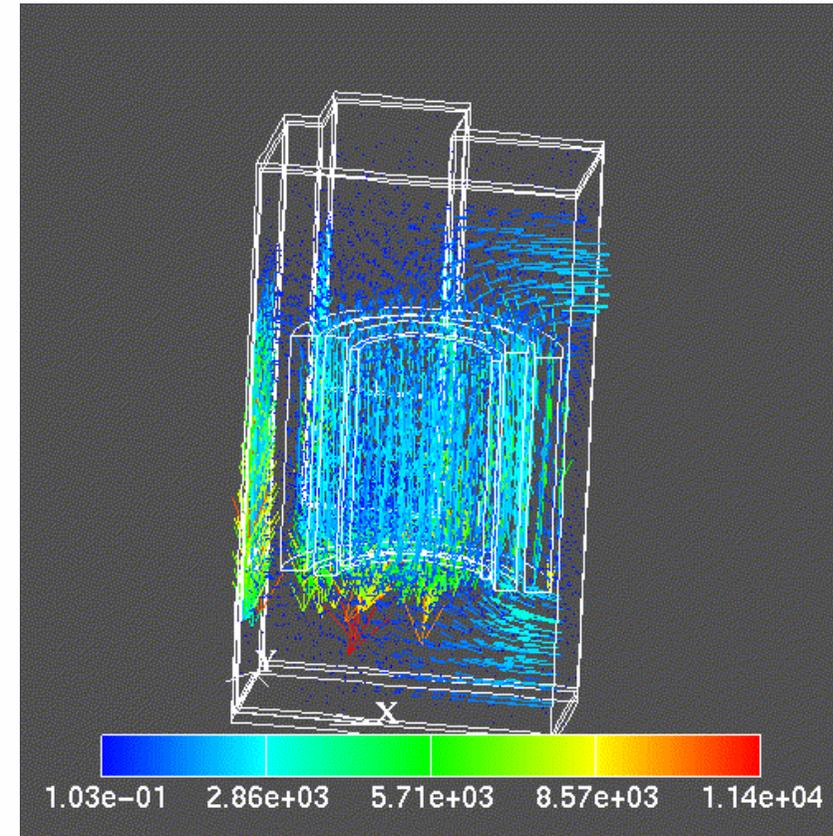
- 非線形静磁場解析
 - 強磁性体の非線形特性を考慮
 - 定式化
 - A法
 - 非線形反復手法
 - Newton法
 - Picardの逐次近似法
 - 結果出力
 - 磁束密度 B ([T] or [G])または磁場 H ([A/m] or [A/mm])



TEAM Workshop Problem 20
メッシュ図

REVOCAP_Magnetic Ver.0.2b (機能)

- 時間調和渦電流解析
 - 交流電流を扱うことに特化した手法
 - 定式化
 - A法
 - A- ϕ 法
 - 結果出力
 - 磁束密度 B ([T] or [G])または磁場 H ([A/m] or [A/mm])
 - 渦電流密度 J_e ([A/m²] or [A/mm²])



3相変圧器1/6モデル
磁束密度・実部

REVOCAP_Magnetic Ver.0.2b (機能)

- 階層型領域分割法

(Hierarchical Domain Decomposition Method:
HDDM)

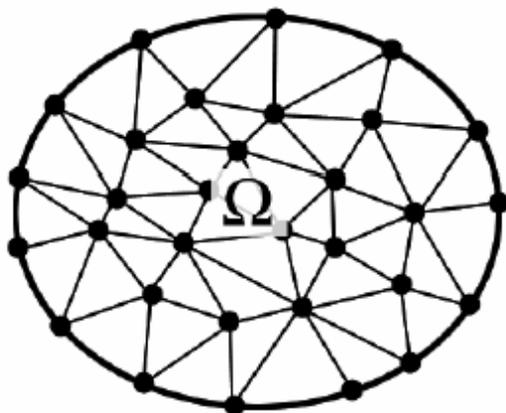
- インターフェース問題
- 反復型領域分割法
(Iterative Domain Decomposition Method)
- 階層型領域分割法

REVOCAP_Magnetic Ver.0.2b (機能)

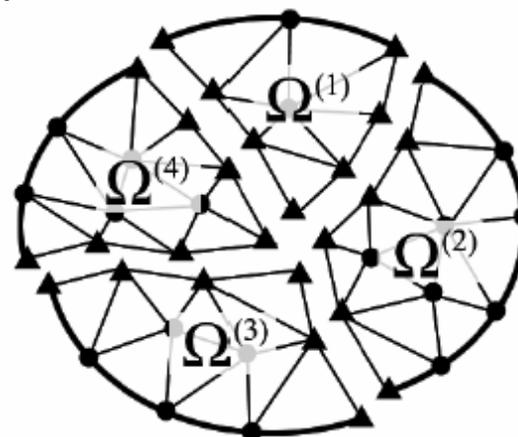
■ インターフェース問題

$$Ku = f$$

K : 係数行列(対称)
 u : 未知ベクトル
 f : 既知ベクトル



● ... Degree of freedom



● ... Degree of freedom in the interior
 ▲ ... Degree of freedom on the interface

$$\Omega = \bigcup_{i=1}^N \Omega^{(i)}, \quad \gamma^{(i)} : \text{領域} \Omega^{(i)} \text{に関する領域間境界}$$

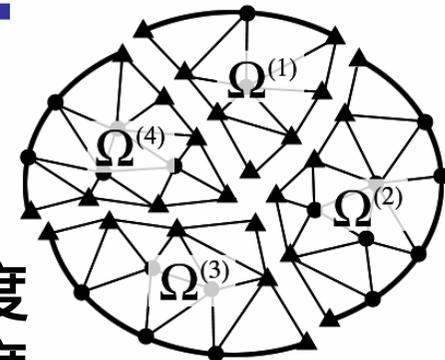
REVOCAP_Magnetic Ver.0.2b (機能)

■ インターフェース問題

$$u^{(i)} = \begin{bmatrix} u_I^{(i)} \\ u_B^{(i)} \end{bmatrix}$$

I : 部分領域内部自由度

B : 領域間境界上自由度



● ... Degree of freedom in the interior
▲ ... Degree of freedom on the interface

$$K^{(i)} = \begin{bmatrix} K_{II}^{(i)} & K_{IB}^{(i)} \\ K_{IB}^{(i)T} & K_{BB}^{(i)} \end{bmatrix}, \quad f^{(i)} = \begin{bmatrix} f_I^{(i)} \\ f_B^{(i)} \end{bmatrix}, \quad R^{(i)} = \begin{bmatrix} R_I^{(i)} & 0 \\ 0 & R_B^{(i)} \end{bmatrix}$$

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

REVOCAP_Magnetic Ver.0.2b (機能)

- インターフェース問題
 - 領域間境界上自由度について

$$Su_B = g$$

➡ 反復法で解く

$$S^{(i)} = K_{BB}^{(i)} - K_{IB}^{(i)T} \left(K_{II}^{(i)} \right)^{\dagger} K_{IB}^{(i)}$$

:ローカルシュアコンプリメント行列

$$S = \sum_{i=1}^N R_B^{(i)} S^{(i)} R_B^{(i)T} \quad : \text{シュアコンプリメント行列}$$

REVOCAP_Magnetic Ver.0.2b (機能)

■ 反復型領域分割法(ex:CG法)

for $n = 0, 1, \dots;$

Choose $u_B^0;$

In each subdomain

Compute $u_I^{(i)0}$ by

$$K_{II}^{(i)} u_I^{(i)0} = f_I^{(i)} - K_{IB}^{(i)} R_B^{(i)T} u_B^0;$$

$$r^{(i)0} = K_{IB}^{(i)T} u_I^{(i)0} + K_{BB}^{(i)} R_B^{(i)T} u_B^0 - f_B^{(i)}$$

$$r^0 = \sum_{i=1}^N R_B^{(i)} r^{(i)0};$$

$$p^0 = r^0;$$

In each subdomain

Compute $p_I^{(i)n}$ by

$$K_{II}^{(i)} p_I^{(i)n} = -K_{IB}^{(i)} R_B^{(i)T} p^n;$$

$$q^{(i)n} = K_{IB}^{(i)T} p_I^{(i)n} + K_{BB}^{(i)} R_B^{(i)T} p^n;$$

$$q^n = \sum_{i=1}^N R_B^{(i)} q^{(i)n};$$

$$\alpha^n = (r^n)^H r^n / (p^n)^H q^n ;$$

$$u_B^{n+1} = u_B^n - \alpha^n p^n ;$$

$$r^{n+1} = r^n - \alpha^n q^n ;$$

If $\|r^{n+1}\| < \delta \|r^0\|$, break;

$$\beta^n = (r^{n+1})^H r^{n+1} / (r^n)^H r^n ;$$

$$p^{n+1} = r^{n+1} + \beta^n p^n ;$$

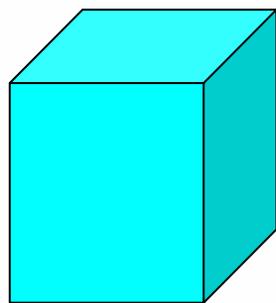
end;

の部分は各部分領域で独立に計算可能であり、並列化が容易
この部分の計算が全体の9割以上を占めるため、高い並列化効率を得やすい

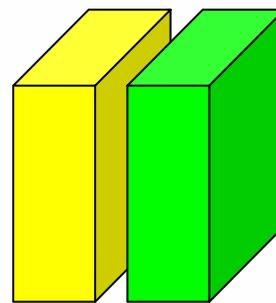
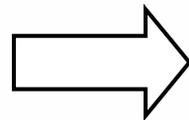
REVOCAP_Magnetic Ver.0.2b (機能)

■ 階層型領域分割法

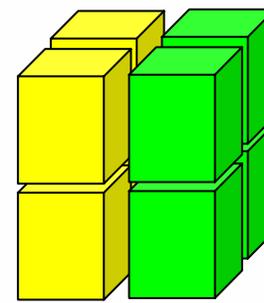
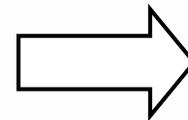
- 反復型領域分割法を効率よく並列計算機環境に実装するための手法
- 計算対象を2段階の階層型に分割する
- 最適分割数を取りやすい
- 部分領域数がプロセッサ数より十分に大きくなるので、負荷分散が容易



Whole domain



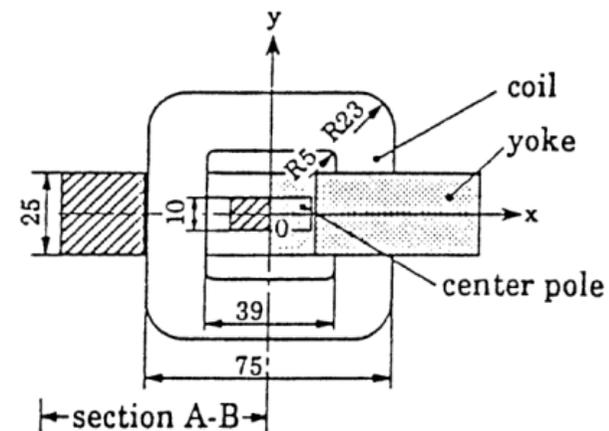
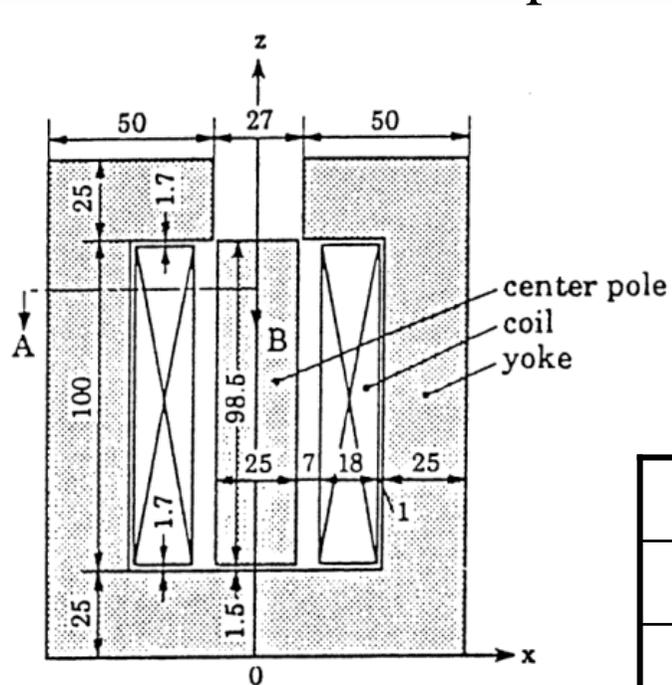
Parts



Subdomains

REVOCAP_Magnetic Ver.0.2b

- 大規模非線形静磁場解析
 - TEAM Workshop Problem 20



Yoke	SS400
Center pole	
Coil	ポリイミド電線を341ターン巻いたもの

REVOCAP_Magnetic Ver.0.2b

- 大規模非線形静磁場解析
 - TEAM Workshop Problem 20

	elements	DOF	subdomains	DOF on interface
team20(1)	4,412,706	5,174,146	32 x 1,400	2,232,789
team20(2)	8,802,084	10,298,638	32 x 2,800	4,464,623
team20(3)	17,931,856	20,941,837	32 x 5,600	9,067,744
team20(4)	26,813,542	31,286,845	32 x 8,400	13,592,967
team20(5)	34,917,602	40,722,854	32 x 11,200	17,782,606
team20(6)	43,141,979	50,295,288	32 x 14,000	22,063,800

REVOCAP_Magnetic Ver.0.2b

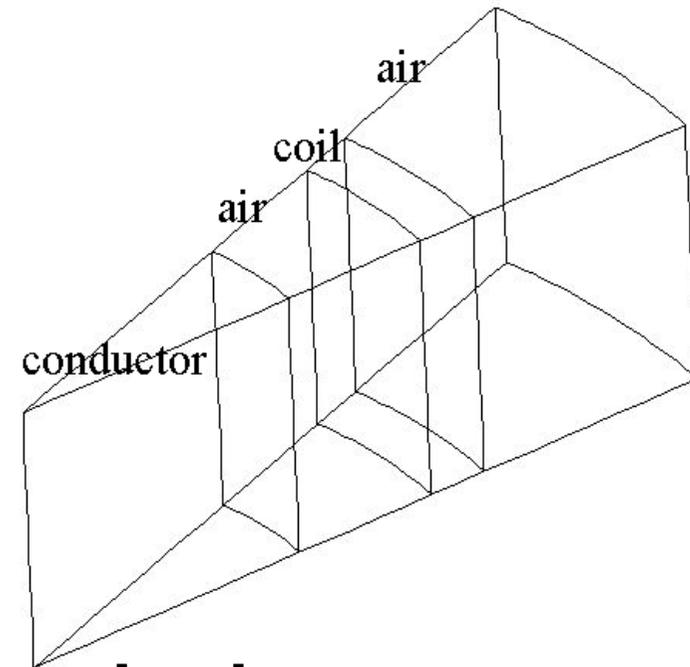
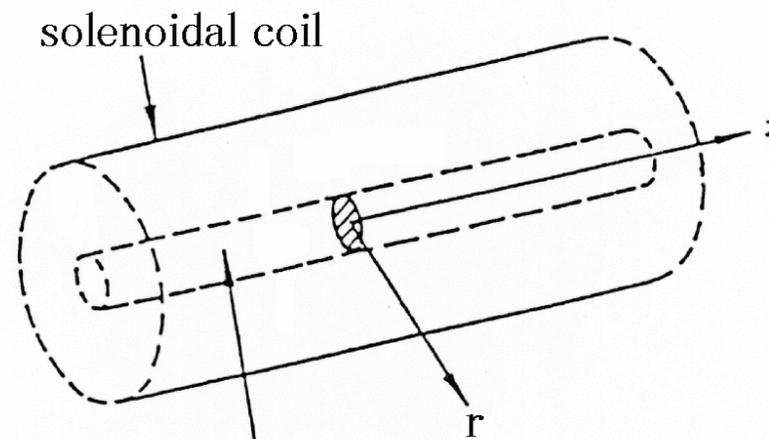
- 大規模非線形静磁場解析
 - TEAM Workshop Problem 20

	iteration counts (Newton method)	CPU time [s]	Memory per CPU [MB]
team20(1)	2	2,048	64.9
team20(2)	2	4,348	129
team20(3)	2	9,826	262
team20(4)	2	16,441	392
team20(5)	2	23,337	512
team20(6)	2	31,111	633

PC cluster : Pentium 4 3.0GHz x 32 13

REVOCAP_Magnetic Ver.0.2b

- 大規模時間調和渦電流解析
 - ケーキモデル



Excitation current density

$$: |\vec{J}| = 50.0 [\text{A/m}^2]$$

Magnetic reluctivity

$$: \nu = 1 / (4\pi \times 10^{-7}) [\text{m/H}]$$

Conductivity (conductor)

$$: \sigma = 7.7 \times 10^6 [\text{S/m}]$$

Angular frequency

$$: \omega = 2\pi \times 60 [\text{rad/s}]$$

REVOCAP_Magnetic Ver.0.2b

- 大規模時間調和渦電流解析
 - ケーキモデル

	elements	DOF	subdomains	DOF on interface
cake(1)	4,310,648	5,472,186	32 x 1,250	2,360,218
cake(2)	8,788,303	11,098,344	32 x 2,500	4,812,371
cake(3)	17,065,354	21,470,601	32 x 5,000	9,449,410
cake(4)	25,917,735	32,537,036	32 x 7,500	14,323,419
cake(5)	34,814,775	43,546,445	32 x 10,000	19,110,895

REVOCAP_Magnetic Ver.0.2b

- 大規模時間調和渦電流解析
 - ケーキモデル

	iteration counts	CPU time [s]	Memory per CPU [MB]
cake(1)	460	1,210	115
cake(2)	570	2,898	233
cake(3)	735	6,789	512
cake(4)	891	12,400	685
cake(5)	935	17,228	913

PC cluster : Pentium 4 3.0GHz x 32

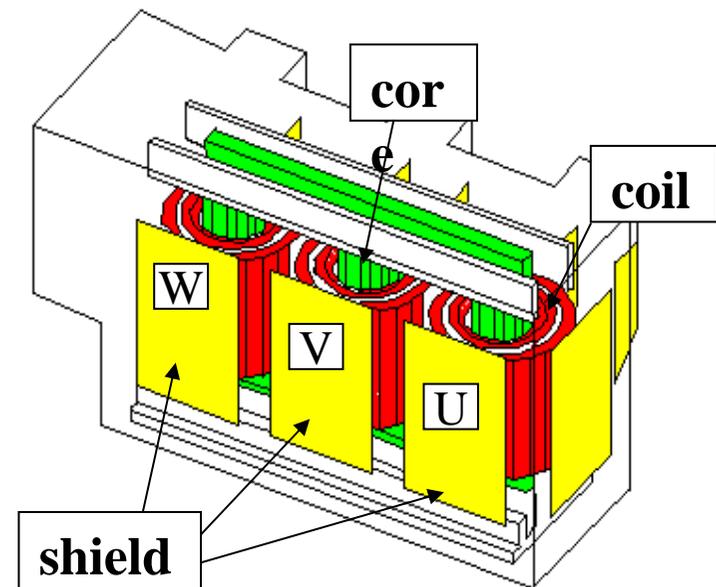
REVOCAP_Magnetic Ver.0.2b

■ 熱との連成問題

- 解析対象: 変圧器全体
- コイル(U相,V相,W相), 鉄心, シールド, タンクより構成
- コイル: 各相流れる電流の大きさ, 方向が異なる三重の巻き線から成り, 各相において電流の総和は0[A]

コイル電流 [$\times 10^3$ A]

	U相	V相	W相
内側	$-159.3+0.0i$	$79.7-138.0i$	$79.7+138.0i$
中側	$-303.6+0.0i$	$151.8-262.9i$	$151.8+262.9i$
外側	$462.9+0.0i$	$-231.5+400.9i$	$-231.5-400.9i$

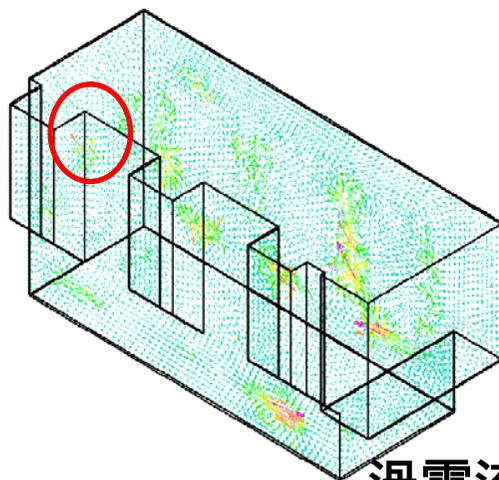


REVOCAP_Magnetic Ver.0.2b

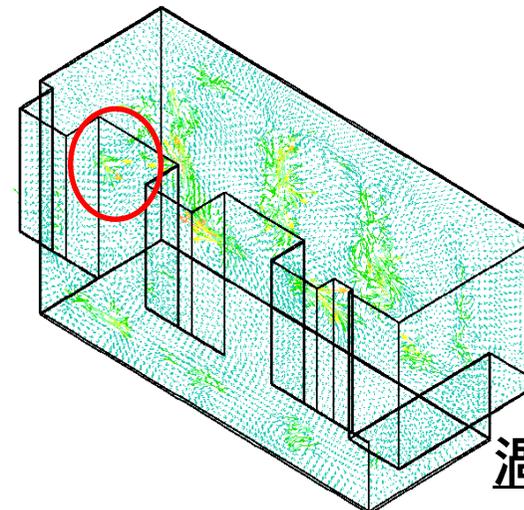
■ 熱との連成問題

■ 時間調和渦電流解析

- シールド間の隙間に対応する部分に発生
- 「ポケット部」の角にも比較的大きな渦電流が発生
- 渦電流密度の最大値 : 9.699×10^3 [A/m²]



渦電流密度(実部)



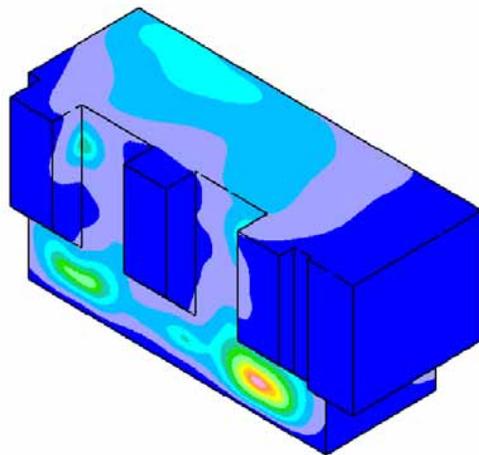
渦電流密度(虚部)

REVOCAP_Magnetic Ver.0.2b

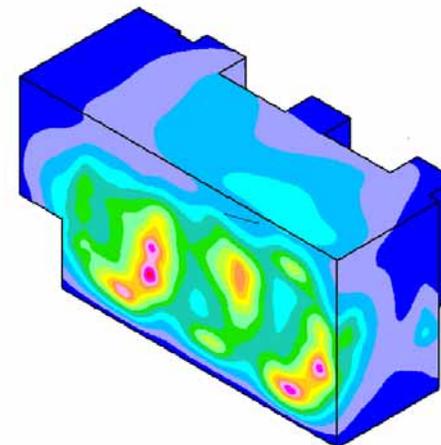
■ 熱との連成問題

■ 熱伝導解析

- 温度の高い部分と電流密度の高い部分が対応
- シールド間の隙間に対応する部分に高温部分
- 「ポケット」部の渦電流に対応した部分にも高温部



温度分布(1)



温度分布(2)

終わりに

- 機能拡張・高速化を順次行っていく
- 磁場解析以外の解析ソフトウェアとのインターフェース整備
- 実証問題を使った連成解析