

# 大規模数値解析による 電気機器高効率化技術の開発

川崎重工業、岐阜大学、海洋研究開発機構

プロジェクト責任者： 澤田正志  
(川崎重工業(株) 技術開発本部 システム技術開発センター)

2012/10/11 地球シミュレータ産業利用シンポジウム2012



## 内容

1. 背景
2. 本プロジェクトの目的
3. 磁界解析(三次元有限要素法)
4. 解析結果・考察
  - リアクトルの銅損にコイルの素線分割数が及ぼす影響
5. まとめ
  - 地球シミュレータ利用による成果

2012/10/11 地球シミュレータ産業利用シンポジウム2012



## 背景

利用分野:「環境負荷を低減する技術開発」

- ◆ エネルギーの有効利用
  - 低温熱源バイナリタービン発電、小水力発電
  - 二次電池による電力の平準化(鉄道、風力発電)
- ◆ 電気機器の高効率化、コンパクト化技術
  - 高効率化: 電力使用量の低減
  - コンパクト化: 資源使用量の低減

2012/10/11 地球シミュレータ産業利用シンポジウム2012



## 背景

電気機器: エネルギーを変換する装置

- ◆ 回転機(回転運動を利用)
  - 電動機(モータ)
  - 発電機(ジェネレータ)
- ◆ 静止器
  - トランス
  - リアクトル
  - コンデンサ
  - 電力変換器

2012/10/11 地球シミュレータ産業利用シンポジウム2012



## 背景

### 川重の電気機器(例)

- ◆ MAGターボ(曝気ブロー)
  - 磁気軸受式高速電動機直結ターボブロー
- ◆ グリーンバイナリタービン
  - 高速発電機の採用により小型化

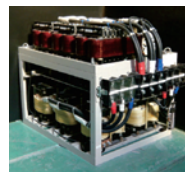


コンバータ/  
インバータユニット

電力変換器含め、自社開発



高速発電機



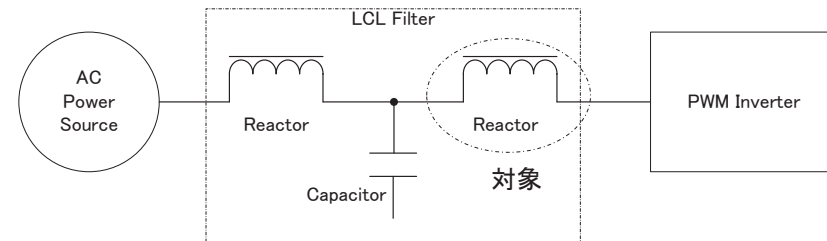
フィルタユニット

2012/10/11 地球シミュレータ産業利用シンポジウム2012

■ Kawasaki

## 本プロジェクトの目的

- ◆ 対象:(PWMインバータに接続した)リアクトル
    - 高周波電流の抑制
    - 磁気エネルギーの蓄積 地球シミュレータ  
で解析
    - 高調波の影響
    - コイルの素線分割数の影響
- ➔ ■ 磁気現象の可視化  
■ 設計技術の向上



2012/10/11 地球シミュレータ産業利用シンポジウム2012

■ Kawasaki

## 磁界解析(三次元有限要素解析)

- ◆ 三次元有限要素法による磁界解析
  - 電磁界の基礎方程式
    - アンペアの周回路の法則
    - ファラデーの電磁誘導の法則
  - 電圧方程式との連立
  - 銅損の算出法

### 有限要素法

解析対象を要素に分割し、  
それぞれの要素の特性を定式化し、  
それらを連立させて解く数値解析手法

2012/10/11 地球シミュレータ産業利用シンポジウム2012

■ Kawasaki

## 電磁界の基礎方程式

$$\text{rot}(\nu \text{rot} \mathbf{A}) = \mathbf{J}_0 + \mathbf{J}_e$$

$$\mathbf{J}_e = -\sigma \left( \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \text{grad} \phi \right)$$

$$\text{div} \mathbf{J}_e = 0$$

$\nu$  : 磁気抵抗率

$\mathbf{A}$  : 磁気ベクトルポテンシャル

$\mathbf{J}_0$  : 強制電流密度

$\mathbf{J}_e$  : 渦電流密度

$\nu_0$  : 真空中の磁気抵抗率

$M$  : 永久磁石の磁化

$\sigma$  : 導電率

$\phi$  : 電気スカラーポテンシャル

2012/10/11 地球シミュレータ産業利用シンポジウム2012

■ Kawasaki

## 電圧方程式との連立

$$E = V_0 - \frac{d\psi}{dt} - RI_0$$

$$\psi = \frac{n_c}{S_c} \int \mathbf{A} \cdot \mathbf{n}_s dv$$

$$\mathbf{J}_0 = \frac{n_c}{S_c} I_0 \mathbf{n}_s$$

$V_0$  : コイルの端子電圧     $n_c$  : コイルの巻数  
 $R$  : コイルの実効抵抗     $S_c$  : コイルの断面積  
 $I_0$  : コイルの励磁電流     $\mathbf{n}_s$  : コイル断面の単位法線ベクトル  
 $\psi$  : コイルの鎖交磁束     $dv$  : コイル領域の微小体積

2012/10/11 地球シミュレータ産業利用シンポジウム2012



## 銅損の計算

$$W_{Cu} = \frac{1}{\tau} \int_0^\tau \left\{ \int_{V_c} \frac{(\mathbf{J}_0 + \mathbf{J}_e)^2}{\sigma} dV \right\} dt$$

$\tau$  : 周期  
 $V_c$  : コイルの体積  
 $\sigma$  : 導電率  
 $\mathbf{J}_0$  : 強制電流密度  
 $\mathbf{J}_e$  : 渦電流密度

2012/10/11 地球シミュレータ産業利用シンポジウム2012



## 解析

リアクトルの銅損にコイルの素線分割数が及ぼす影響

PWMインバータに直結するリアクトル



PWM: パルス幅変調

キャリア周波数の影響大



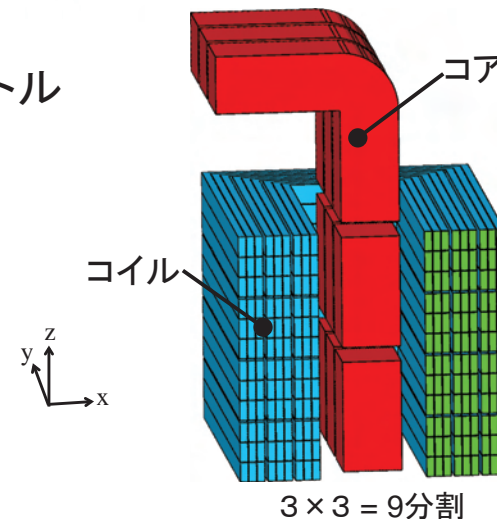
高周波数帯域におけるコイルの素線の太さとの関係を調べる必要がある  
(表皮効果、近接効果など)

2012/10/11 地球シミュレータ産業利用シンポジウム2012



## 解析モデル

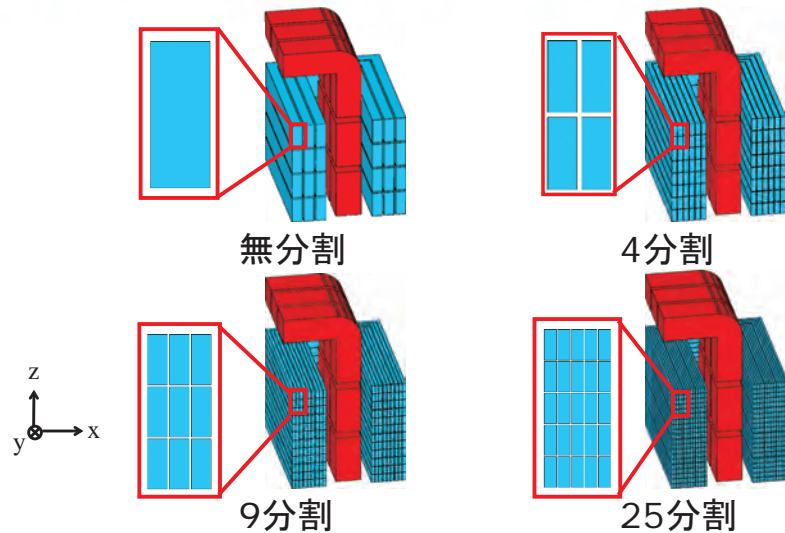
リアクトル



2012/10/11 地球シミュレータ産業利用シンポジウム2012



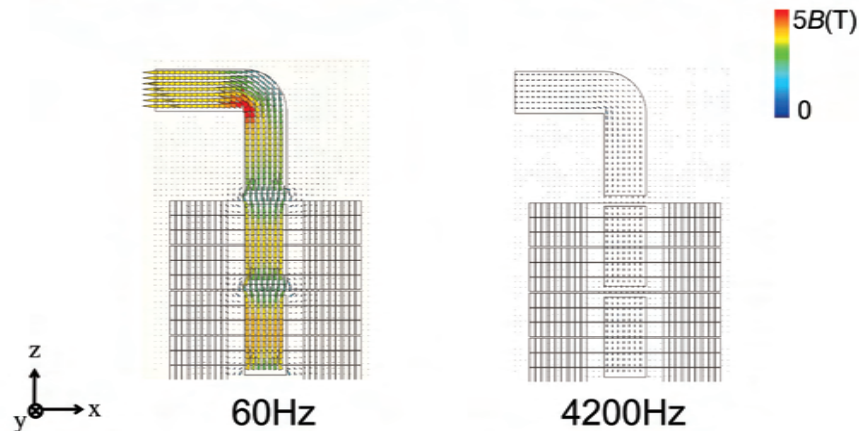
## 解析モデル:コイル分割パターン



2012/10/11 地球シミュレータ産業利用シンポジウム2012

Kawasaki

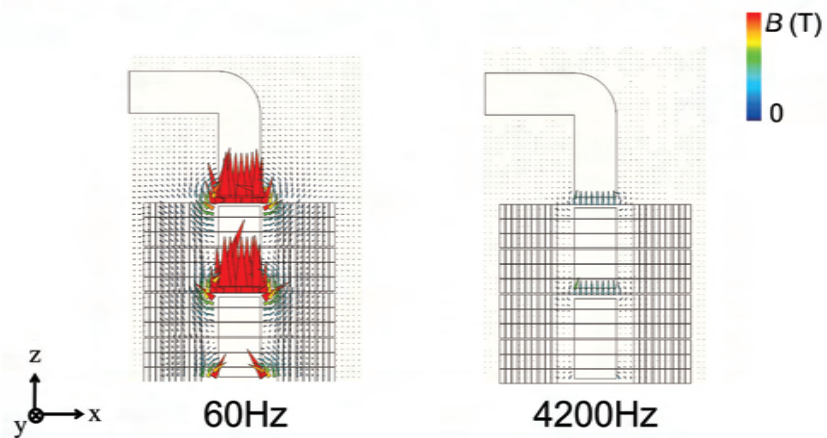
## 解析結果:磁束密度ベクトル分布



2012/10/11 地球シミュレータ産業利用シンポジウム2012

Kawasaki

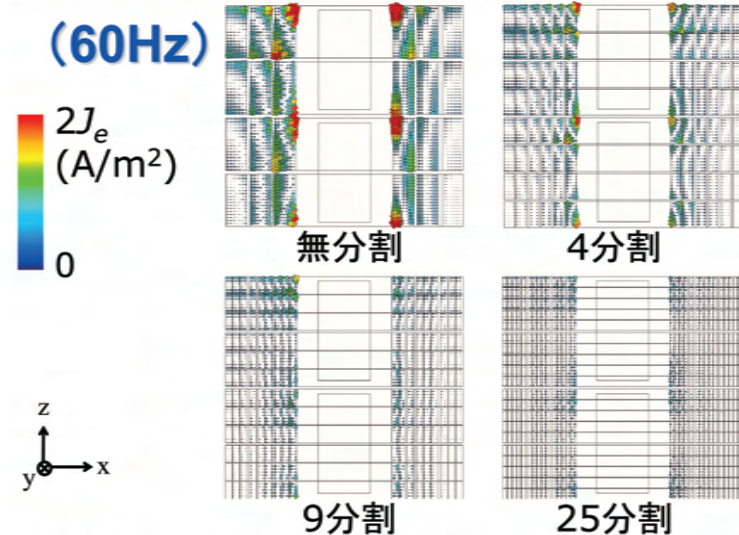
## 解析結果:磁束密度ベクトル分布



2012/10/11 地球シミュレータ産業利用シンポジウム2012

Kawasaki

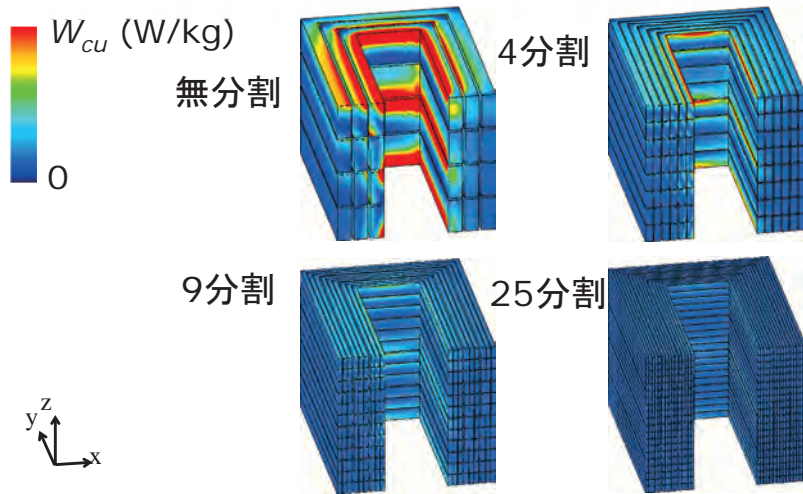
## 解析結果:渦電流密度ベクトル分布



2012/10/11 地球シミュレータ産業利用シンポジウム2012

Kawasaki

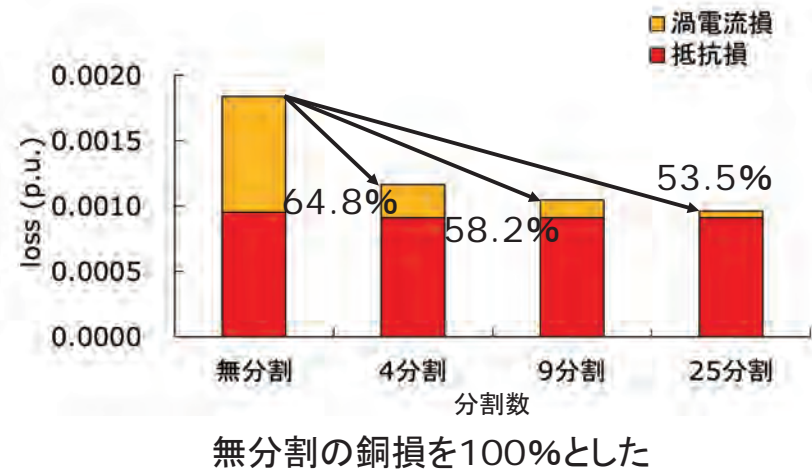
### 解析結果:銅損解析結果(60Hz)



2012/10/11 地球シミュレータ産業利用シンポジウム2012



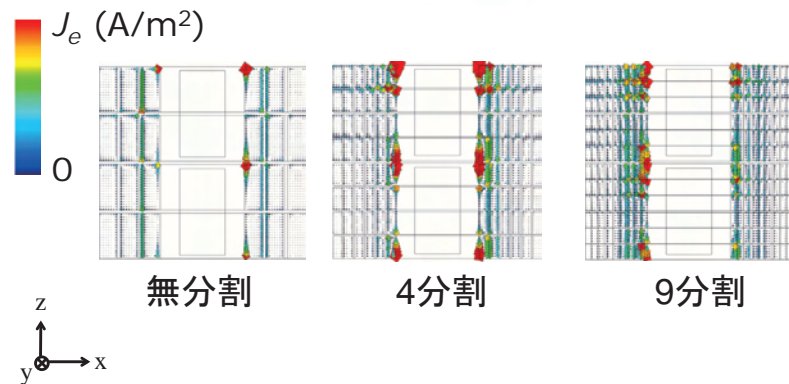
### 解析結果:銅損解析結果(60Hz)



2012/10/11 地球シミュレータ産業利用シンポジウム2012



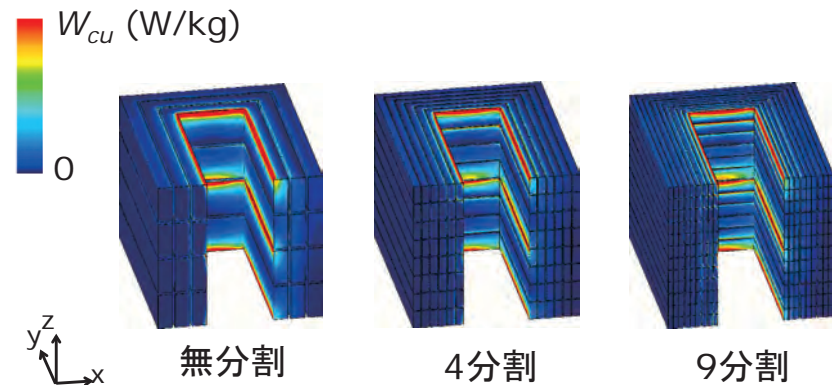
### 解析結果:渦電流密度ベクトル分布(4200Hz)



2012/10/11 地球シミュレータ産業利用シンポジウム2012



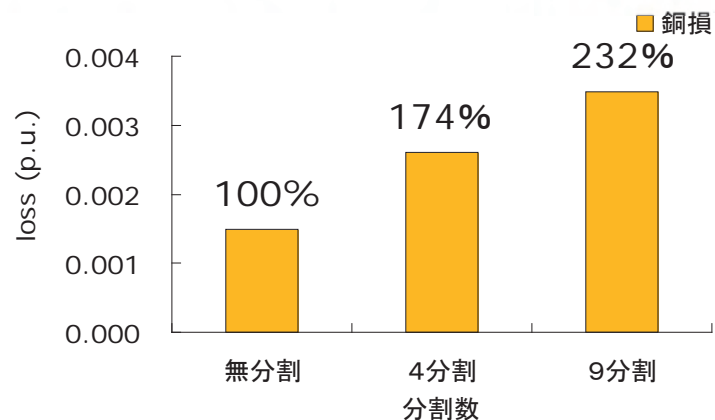
### 解析結果:銅損解析結果(4200Hz)



2012/10/11 地球シミュレータ産業利用シンポジウム2012



## 解析結果:銅損解析結果(4200Hz)



無分割4,200Hzの銅損を100%とした

2012/10/11 地球シミュレータ産業利用シンポジウム2012



## 解析結果:パフォーマンス

銅線分割数	1×1	2×2	3×3		5×5
周波数(Hz)	4200	4200	60	4200	60
要素数(万)	4,075	4,068	1,032	8,007	1,968
収束判定値	1.0E-15	1.0E-13	1.0E-13		
解析方法	A法	A-φ法	A法		
計算時間(min.)	152.6 <sup>*1</sup>	51.64 <sup>*1</sup>	120.0 <sup>*2</sup>	430.8 <sup>*1</sup>	273.9 <sup>*1</sup>
ベクトル演算率(%)	99.608	99.285	99.563	99.717	99.669
MFLOPS	6938.7	4553.9	5886.8	7605.4	7324.2

<sup>\*1</sup>16ノード(128CPU)使用 <sup>\*2</sup>2ノード(16CPU)使用

2012/10/11 地球シミュレータ産業利用シンポジウム2012



## 考察と今後の方針

- ◆ パルス幅変調に関する高周波数域での影響評価
  - 表皮効果、近接効果の影響が大きくなる
  - 4200Hzでは、解析した範囲では、素線分割数を大きくすると損失も大きくなった。しかし、さらに分割数を小さくすると、損失は再び小さくなると考えられる。
- ◆ 今後の解析
  - さらに細いコイルでの解析
  - コイルのアスペクト比の影響評価

2012/10/11 地球シミュレータ産業利用シンポジウム2012



## まとめ (地球シミュレータの利用による成果)

- ◆ これまで困難であったリアクトルのコイル分割の定量的評価が可能となった。
  - 大規模数値解析が可能である
  - 実験では見えない磁束、渦電流の可視化
  - 設計技術へのフィードバック
- ◆ 利用の際のサポートの充実
  - 解析実施における課題解決に、一緒に取り組んでいただいた

2012/10/11 地球シミュレータ産業利用シンポジウム2012

