

地球シミュレータ産業利用シンポジウム2013
成果報告

高効率非接触エネルギー伝送のための 高精度解析技術開発

2013年 10月 10日

太田智浩、二畠康、加田恭平、森田智彦（パナソニック）
河瀬順洋、山口忠、中野智仁、片桐弘雄、太田信治（岐阜大学）
平田勝弘（大阪大学）
西川憲明（海洋研究開発機構）

1. プロジェクト概要

2. H24年度成果

高効率非接触エネルギー伝送のための 高精度解析技術開発

利用分野

安全・安心な社会を実現する技術開発
(環境負荷を低減する技術開発)

目的

ここちよく環境に配慮した暮らしの実現に向けて、高効率ワイヤレス電力伝送技術を開発することで**快適**と**エコ**を両立した**生活空間**を提供する。

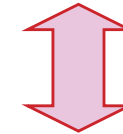
本プロジェクトでは、三次元有限要素法による磁界解析をベースとして**ワイヤレス電力伝送システム**の動作特性を**地球シミュレータ**上で解析し、**損失を高精度に求める**ことを目的として、低損失な巻線や磁性体形状を得るための指針とする。

ユビキタス社会の到来により、ネットワークはワイヤレス化
今後は**電源線もワイヤレス化**へ



電動歯ブラシ

- ・金属端子レスによる信頼性向上
- ・電源コードレスによる利便性向上
- ・充電電池レスによる小型化・高容量化



スマートフォン

高効率化技術(発熱低減、結合向上)
高度化技術(大電力、長距離、大面積、薄型)
安全性技術(金属検知、2次側認証、EMC)

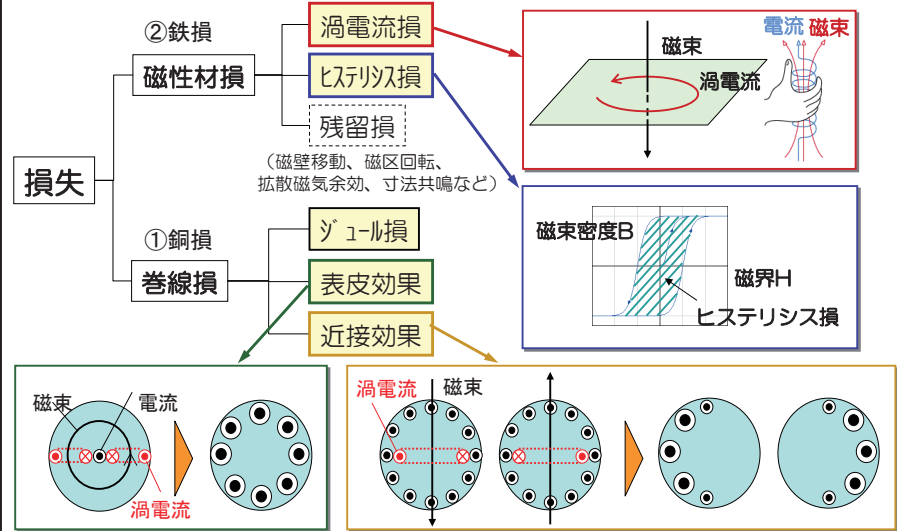
今後はさらなる高出力化が期待されており、**高効率化(発熱)**が課題である。



■ Wireless Power Consortium (WPC)
82団体が加盟 (2011年4月現在)

Qi

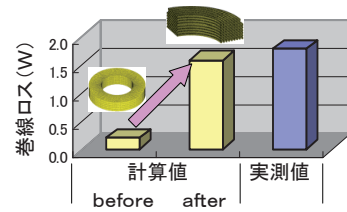
読み方:「Qi(チー)※1」
このロゴが付いている機器同士で相互利用が可能です。



損失を精度良く計算するためには、巻線や磁性体の厳密なモデルが必要

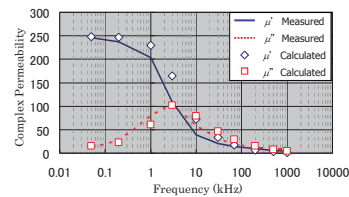
① 巻線解析(表皮と近接効果)

- 未知数 ϕ の境界条件設定
- 表皮深さを考慮したモデル化



② 磁性材解析(渦損とヒス損)

- 複素透磁率の周波数特性計測
- 複素透磁率のモデル化
- 非線形複素透磁率解析手法



複素透磁率の周波数特性

巻線や磁性材の高精度解析手法を開発し、原理モデルで精度検証済み

① 計算時間短縮のため未知数を複素数化で計算メモリ2倍

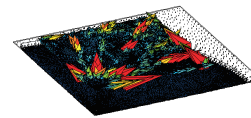
$$\begin{cases} \text{rot}(\dot{v} \text{rot} \vec{A}) = \vec{j}_0 + \vec{j}_e = \vec{j}_0 - \sigma(j\omega \vec{A} + \text{grad} \phi) \\ \text{div}\{-\sigma(j\omega \vec{A} + \text{grad} \phi)\} = 0 \end{cases}$$

メモリ16GB搭載PCでは
2000万要素は計算困難

② 巻線や磁性材表面に集中して流れる電流や磁束分布を再現するにはメッシュは数千万以上必要で計算メモリ大



2000万要素以下では巻線内部の
詳細な損失の計算困難



数百万要素では、メッシュが粗すぎて
磁束分布が収束せず、磁性材損の
計算精度低下

実際のモデルを解析するには、大規模計算が必要(約1億要素)

■ 大規模FEMプログラム開発
(約1億メッシュ)

■ ワイヤレス電力伝送高精度モデルにおいて
損失低減効果と計算資源の検証
(10ターン以上)

1. プロジェクト概要

2. H24年度成果

$$\begin{aligned} \text{rot}(\nu \text{rot} \dot{\mathbf{A}}) &= \dot{\mathbf{J}}_0 + \dot{\mathbf{J}}_e \\ \dot{\mathbf{J}}_e &= -\sigma(j\omega \dot{\mathbf{A}} + \text{grad} \dot{\phi}) \\ \text{div} \dot{\mathbf{J}}_e &= 0 \end{aligned}$$

※ただし、ドット(・)は複素数を表す

ν : 磁気抵抗率

σ : 導電率

$\dot{\mathbf{A}}$: 磁気ベクトルポテンシャル

$\dot{\phi}$: 電気スカラーポテンシャル

$\dot{\mathbf{J}}_0$: 強制電流密度

$\dot{\mathbf{J}}_e$: 渦電流密度

$$\dot{E} = \dot{V}_0 - R\dot{I}_0 - j\omega\dot{\psi} = 0$$

$$\dot{\psi} = \frac{n_c}{S_c} \int (\int \dot{\mathbf{A}} \cdot \mathbf{n}_s ds) dS, \quad \dot{\mathbf{J}}_0 = \frac{n_c}{S_c} \dot{I}_0 \mathbf{n}_s$$

※ただし、ドット(・)は複素数を表す

\dot{V}_0 : 端子電圧

n_c : コイル巻数

R : 抵抗

S_c : コイル断面積

\dot{I}_0 : 電流

\mathbf{n}_s : コイル断面の単位法線ベクトル

$\dot{\psi}$: 総鎖交磁束数

ds : 電流の流れる方向に沿った微小線分

dS : コイル断面における微小面積

$$\dot{Z} = R + jX$$

$$\dot{Z} = \frac{\dot{V}}{\dot{I}}$$

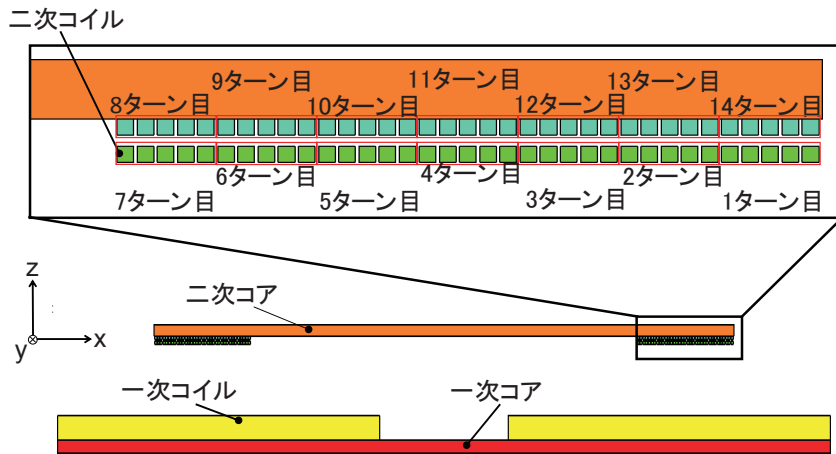
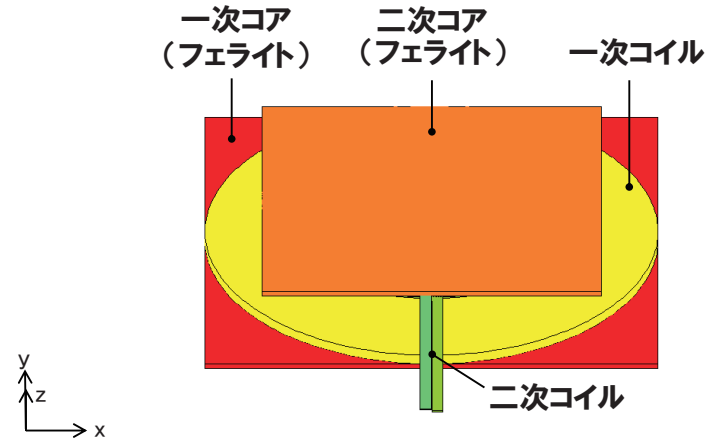
$$R = \text{Real}(\dot{Z}) = \text{Real}\left(\frac{\dot{V}}{\dot{I}}\right)$$

※ただし、ドット(・)は複素数を表す

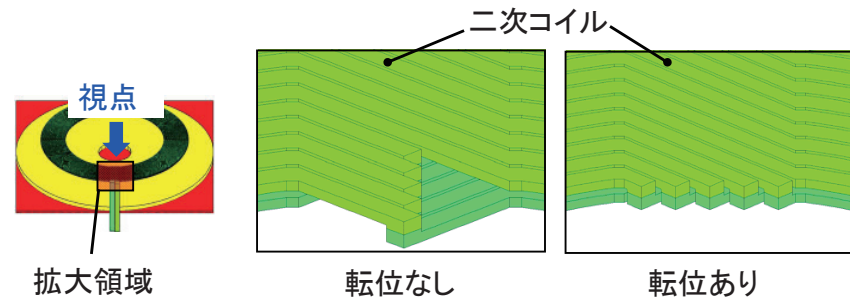
\dot{I} : 複素電流

\dot{V} : 複素電圧

\dot{Z} : 複素インピーダンス



巻線損失を低減する方法として、巻線を**転位構造**にすることによりコイルの素線にまたがる循環電流を抑えることで、巻線損失を低減させることが考えられる。



解析モデル(転位なし、転位あり)

17

拡大領域

二次コイル(転位なし) 二次コイル(転位あり)

Panasonic Analysis Center, Panasonic Corporation パナソニック㈱ 解析センター

解析モデル(転位なし、転位あり)

18

視点

拡大領域

二次コイル(転位なし) 二次コイル(転位あり)

Panasonic Analysis Center, Panasonic Corporation パナソニック㈱ 解析センター

三次元分割図(全体図)

19

二次コア 一次コア

一次コイル 二次コイル

要素数: 7,077万(転位なし)
7,069万(転位あり)

Panasonic Analysis Center, Panasonic Corporation パナソニック㈱ 解析センター

一次側励磁、二次側開放

20

電源電圧

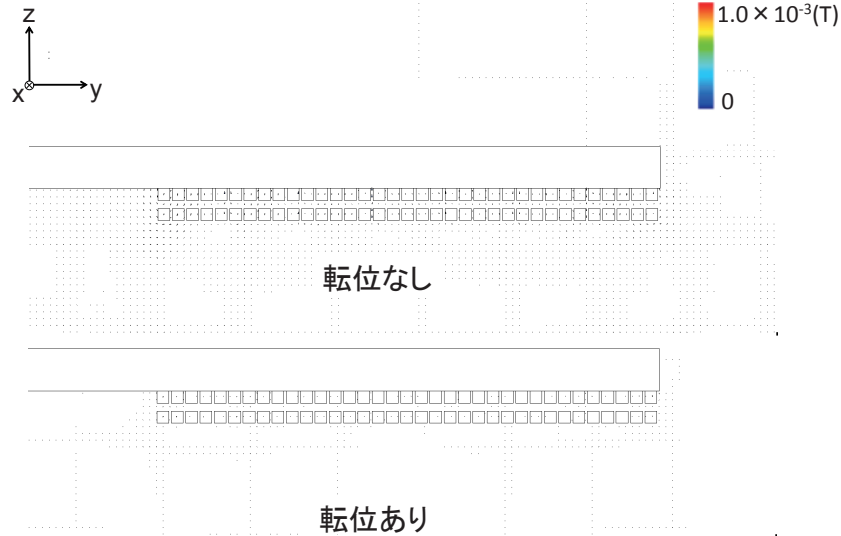
一次コイル 二次コイル

open

Panasonic Analysis Center, Panasonic Corporation パナソニック㈱ 解析センター

磁束密度ベクトル分布(空気領域、y-z断面 (x=0mm))

21



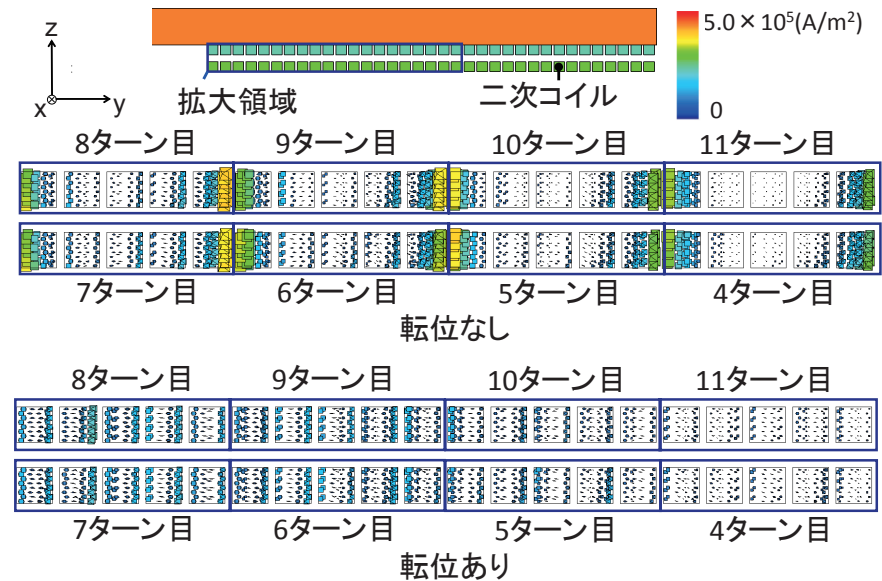
Panasonic

Analysis Center, Panasonic Corporation

パナソニック㈱ 解析センター

渦電流密度ベクトル分布(y-z断面 (x=0mm))

22



Panasonic

Analysis Center, Panasonic Corporation

パナソニック㈱ 解析センター

インダクタンスと交流抵抗

23

| | 転位なし | 転位あり |
|----------------------------|------|-------------|
| 一次側自己 インダクタンス (p.u.) | 0.99 | 0.99 (1.00) |
| 一次コイルの 交流抵抗 (p.u.) | 1.87 | 1.13 (1.48) |

40%減少

※括弧内の値は実測値

Panasonic

Analysis Center, Panasonic Corporation

パナソニック㈱ 解析センター

解析諸元

24

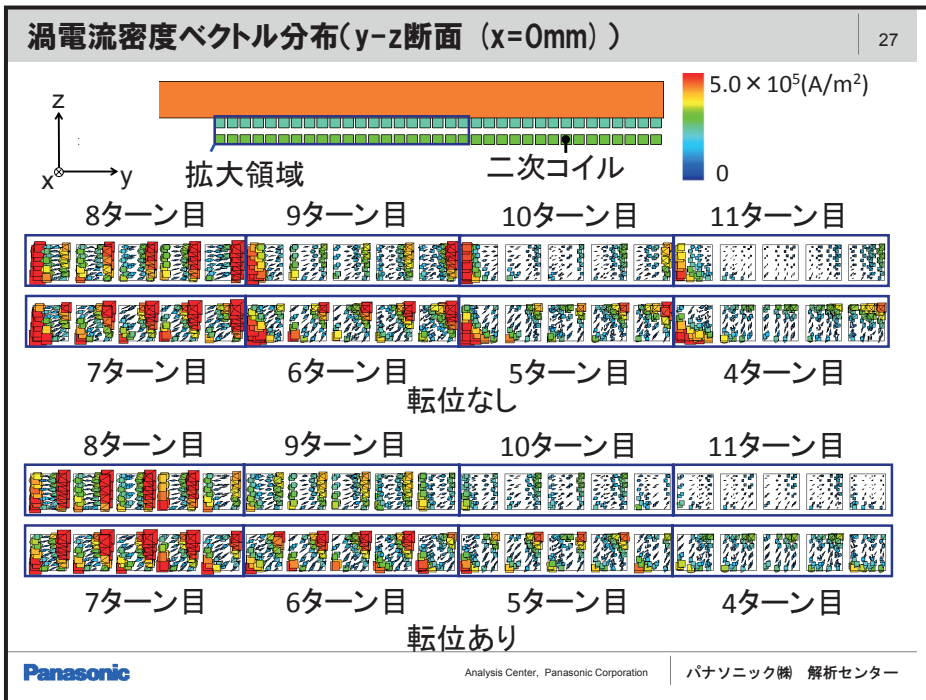
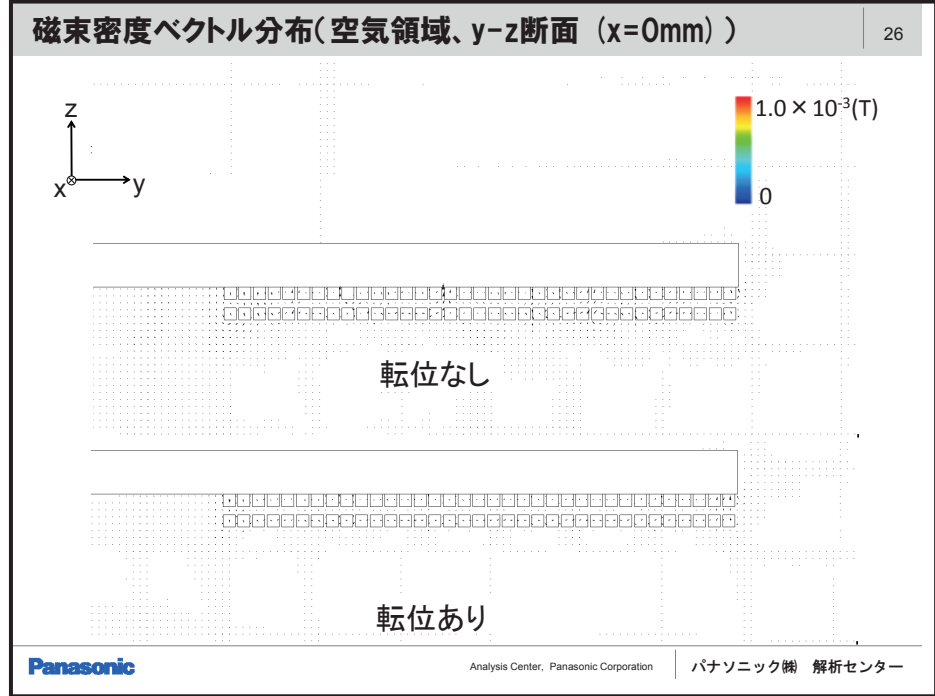
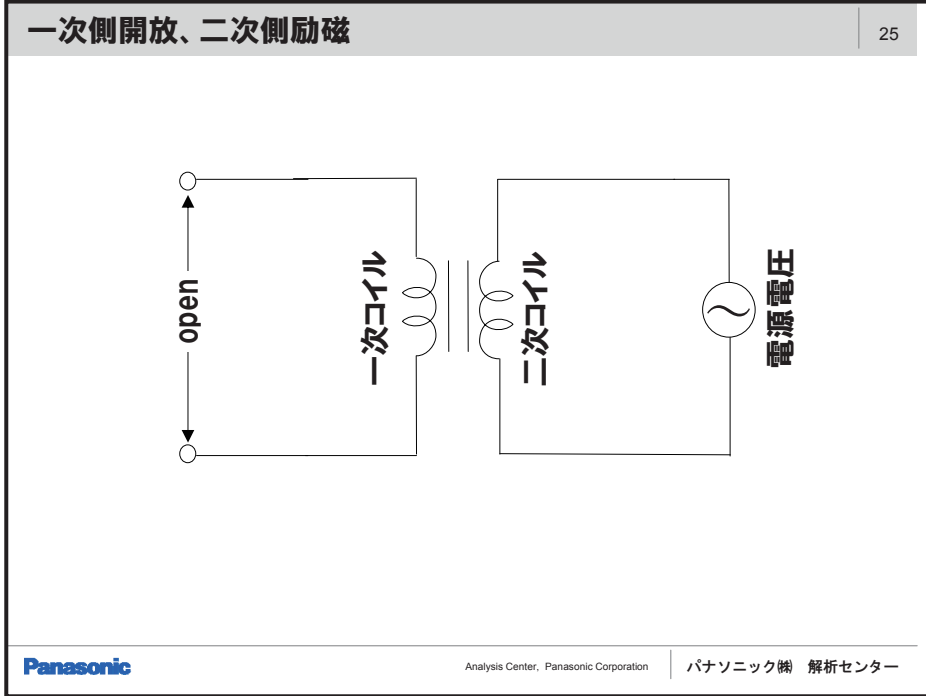
| 解析モデル | 転位なし | 転位あり |
|-----------------|------------|------------|
| 要素数 | 70,771,650 | 70,697,850 |
| 節点数 | 12,035,388 | 12,022,842 |
| 未知数 | 81,847,116 | 81,761,755 |
| ステップ数 | 1 | |
| CG反復回数 | 762,967 | 719,820 |
| 計算時間 (hours) | 5.94 | 5.65 |
| ベクトル演算率 (%) | 99.738 | 99.671 |
| MFLOPS | 8,004 | 7,362 |

地球シミュレータ13ノード(104CPU) 使用

Panasonic

Analysis Center, Panasonic Corporation

パナソニック㈱ 解析センター



インダクタンスと交流抵抗

28

| | 転位なし | 転位あり |
|---------------------|------|-------------|
| 二次側自己インダクタンス (p.u.) | 1.02 | 1.02 (1.00) |
| 二次コイルの交流抵抗 (p.u.) | 1.67 | 1.43 (1.36) |

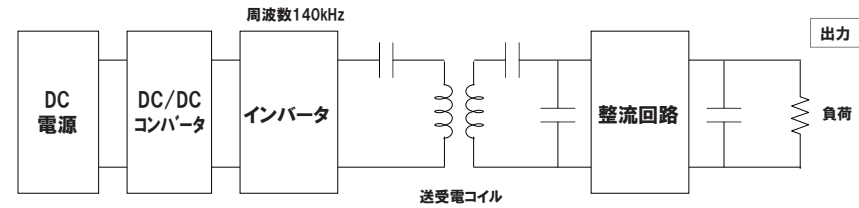
15%減少

※括弧内の値は実測値

Panasonic Analysis Center, Panasonic Corporation パナソニック㈱ 解析センター

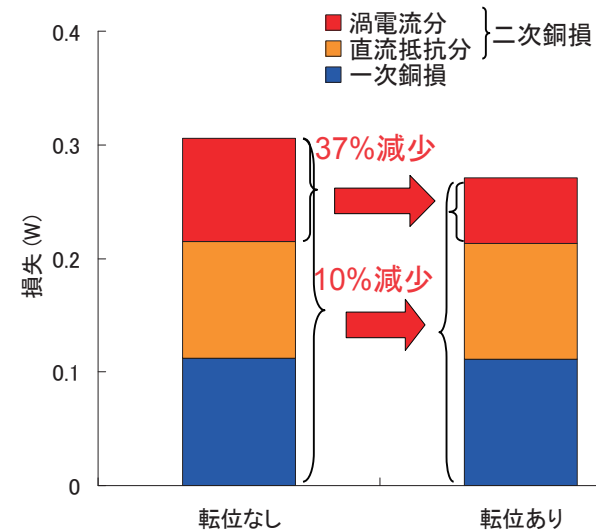
| 解析モデル | 転位なし | 転位あり |
|--------------|------------|------------|
| 要素数 | 70,771,650 | 70,697,850 |
| 節点数 | 12,035,388 | 12,022,842 |
| 未知数 | 81,847,116 | 81,761,755 |
| ステップ数 | 1 | |
| CG反復回数 | 763,035 | 762,303 |
| 計算時間 (hours) | 5.94 | 5.97 |
| ベクトル演算率 (%) | 99.740 | 99.673 |
| MFLOPS | 8,032 | 7,359 |

地球シミュレータ13ノード(104CPU)使用



コンバータ、インバータ、整流回路は簡易的に損失モデルとして計算

| | 実測値 | 計算値 |
|-----------|------|------|
| 出力 (p.u.) | 0.84 | 0.79 |
| 入力 (p.u.) | 1.00 | 0.95 |
| 効率 (%) | 83.7 | 83.7 |



1. 電磁界並列計算プログラム未知変数の複素数化
2. 14ターンモデルで転位モデルの損失低減効果確認
(磁気回路損失10%減少)
3. 14ターンモデルに必要な計算資源確認
(要素数は約7000万以上)

Thank you for your kind attention