

三次元有限要素法による回転機の高 速高精度磁界解析技術の開発

＜プロジェクト責任者＞

中村 雅憲（東洋電機製造株式会社）

＜プロジェクトメンバー＞

河瀬 順洋, 山口 忠, 中野 智仁, 鵜飼真吾（岐阜大学）

西川 憲明（海洋研究開発機構）

野口 孝明（NECシステムテクノロジー）

発表内容

- はじめに
- 背景, 目的
- 領域分割法に基づく並列計算手法
- 電圧源を考慮した並列計算手法
- 数値実験
- まとめ
- おわりに

はじめに

- なぜ、回転機を3次元で磁界解析する必要があるか？
 - 高性能を追求した場合、実機だけでの評価では優位性を判断するのが難しい。
 - 試作機をすべて同じ材質、同じ寸法、同じ磁気特性では製作できない。 → 再現性が保証されない
 - 磁界解析は解析モデルを忠実に解析し、結果も再現性がある。

はじめに

- 実際の回転機はどうなっている？
 - ケイ素鋼板の磁気特性は圧延方向とその直角方向で特性が異なる。 → 通常 of 磁界解析ではこの差異は考慮していない(できない)。
 - 3相の巻線の抵抗値、インダクタンス値などは同一ではない。 → これも考慮していない。
 - 固定子の内径、回転子の外径は真円ではない。また、まったくの同心でもない。 → 考慮せず
- 回転機を対称として解析している

はじめに

- 回転機の磁界解析をどうするか
 - 回転機为非対称性を考慮できるように3次元のフルモデルでの解析を可能とすること。
 - 回転機の磁気回路は非線形であるので、高速で非線形解析ができることが重要。
 - インバータ駆動の解析を可能にするため、電圧入力での解析が可能であること。
- 高速高精度解析に地球シミュレータは最適

背景

- 我々はこれまでに、回転機の磁界解析のための、領域分割法に基づく並列計算手法を開発した。
- しかし、電圧入力解析には対応していなかった。

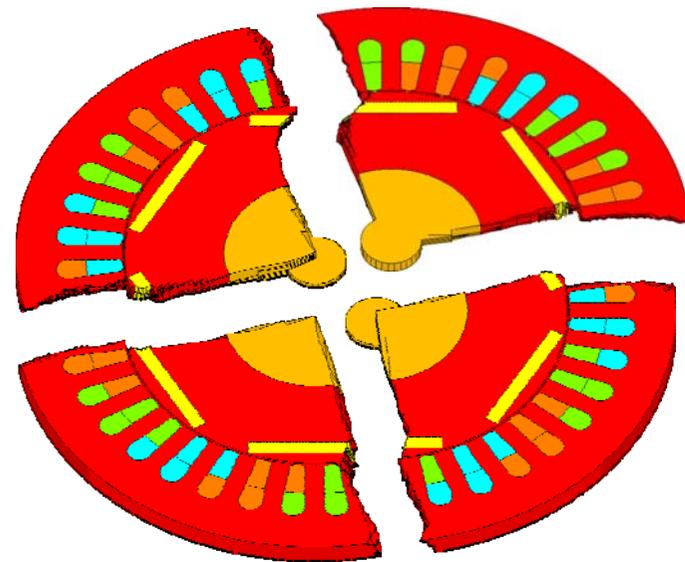
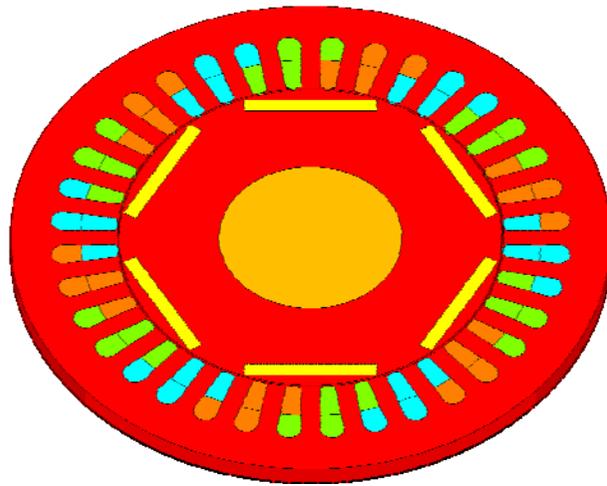
目的

- 回転機の電圧入力解析のための並列計算手法を提案する。
- 地球シミュレータを用いて提案手法による並列計算を行い、その有用性を明らかにする。

領域分割法に基づく並列計算手法

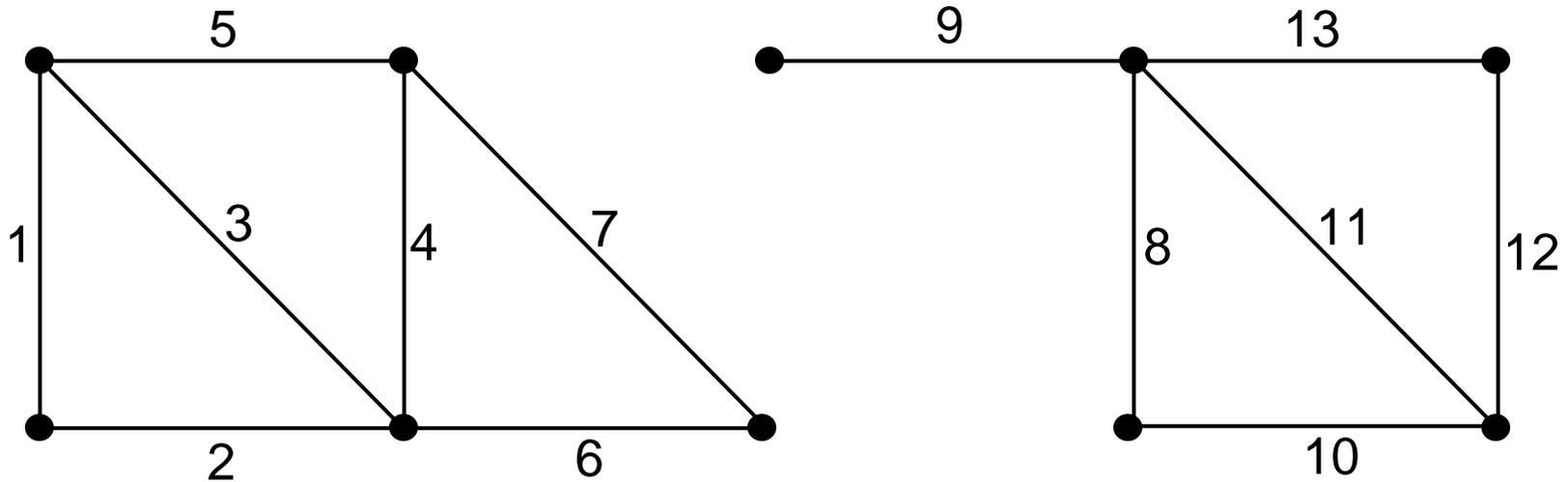
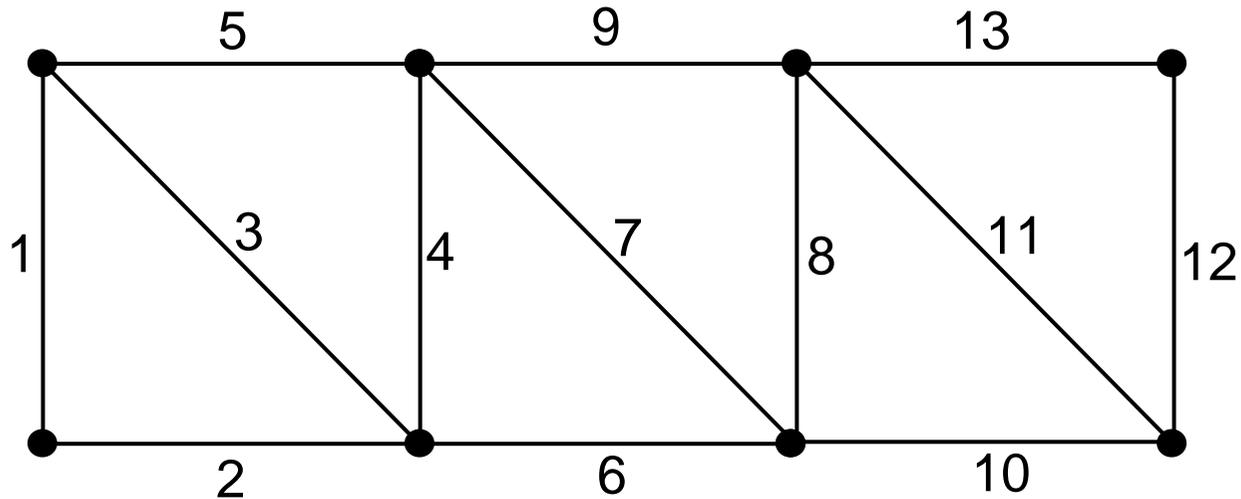
領域分割法に基づく並列計算手法

- 解析領域をいくつかの小領域に分割
- 各プロセッサに小領域を割り当て
並列に計算させる



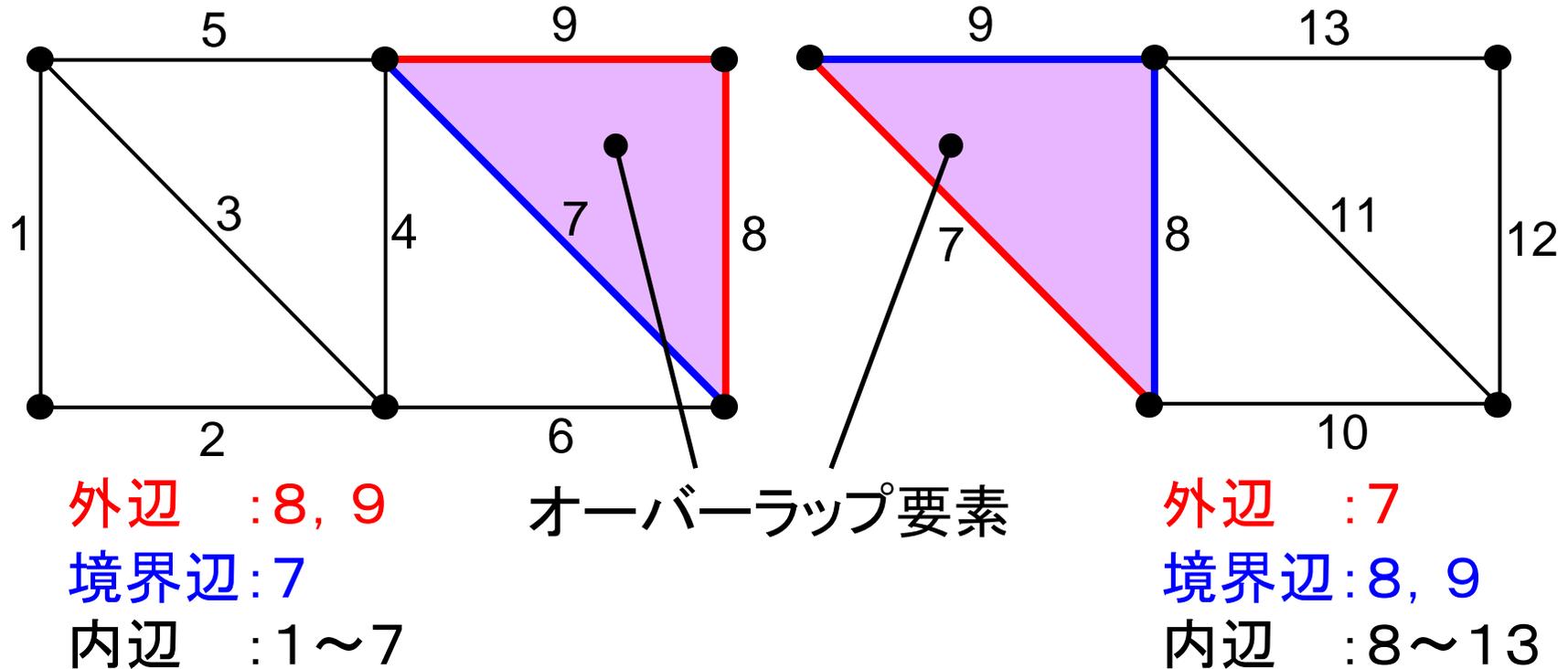
- 線形ソルバ内で反復毎に通信し、
必要なデータを取得

領域分割の手順



辺数がほぼ均等になるように分割

領域分割の手順



マトリクスを作成する際、青色の辺に関する
部分は隣接する小領域のデータが必要



オーバーラップ要素を追加

領域分割法に基づく並列計算手法

- 領域分割:
METIS (マルチレベルグラフ理論に基づく領域分割ソフトウェア)
- 線形ソルバ:
対角スケーリング前処理つきCG法
- CPU, ノード間の通信:
MPI (Message Passing Interface)

電圧源を考慮した並列計算手法

磁界の基礎方程式

$$\text{rot}(\nu \text{rot}A) = \nu_0 \text{rot}M + J_0 + J_e$$

$$J_e = -\sigma \frac{\partial A}{\partial t}$$

ν : 磁気抵抗率

A : 磁気ベクトルポテンシャル

ν_0 : 真空中の磁気抵抗率

M : 永久磁石の磁化

J_0 : 強制電流密度

J_e : 渦電流密度

σ : 導電率

電圧方程式

$$\eta = V_0 - \frac{d\psi}{dt} - RI_0 - L \frac{dI_0}{dt} = 0$$

$$\Psi = \frac{n_c}{S_c} \int \mathbf{A} \cdot \mathbf{n}_s dv, \quad \mathbf{J}_0 = \frac{n_c}{S_c} I_0 \mathbf{n}_s$$

V_0 : 端子電圧

R : 抵抗

I_0 : 電流

Ψ : 総鎖交磁束数

L : 解析領域外のインダクタンス

n_c : コイル巻数

S_c : コイル断面積

\mathbf{n}_s : コイル断面の単位法線ベクトル

電圧源を考慮する際のマトリクス

- 解くべきマトリクス (解析領域全体)

$$\begin{bmatrix} \left[\frac{\partial G}{\partial A} \right] & \left[\frac{\partial G}{\partial I_0} \right] \\ \left[\frac{\partial E}{\partial A} \right] & \left[\frac{\partial E}{\partial I_0} \right] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\delta A\} \\ \{\delta I_0\} \end{Bmatrix} = - \begin{Bmatrix} \{G\} \\ \{V_0\} \end{Bmatrix}$$

電圧源を考慮する際のマトリクス

- 解くべきマトリクス (i 番目の小領域)

$$\begin{bmatrix} \left[\begin{array}{c} \frac{\partial G^{(i)}}{\partial A^{(i)}} \\ \frac{\partial E}{\partial A^{(i)}} \end{array} \right] & \left[\begin{array}{c} \frac{\partial G^{(i)}}{\partial I_0} \\ \frac{\partial E}{\partial I_0} \end{array} \right] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\delta A^{(i)}\} \\ \{\delta I_0\} \end{Bmatrix} = - \begin{Bmatrix} \{G^{(i)}\} \\ \{V_0\} + \sum_{\substack{j=1 \\ (j \neq i)}}^n \{F^{(j)}\} \end{Bmatrix}$$

すべての小領域が
同じ値を保持する

他の小領域からの
影響を考慮

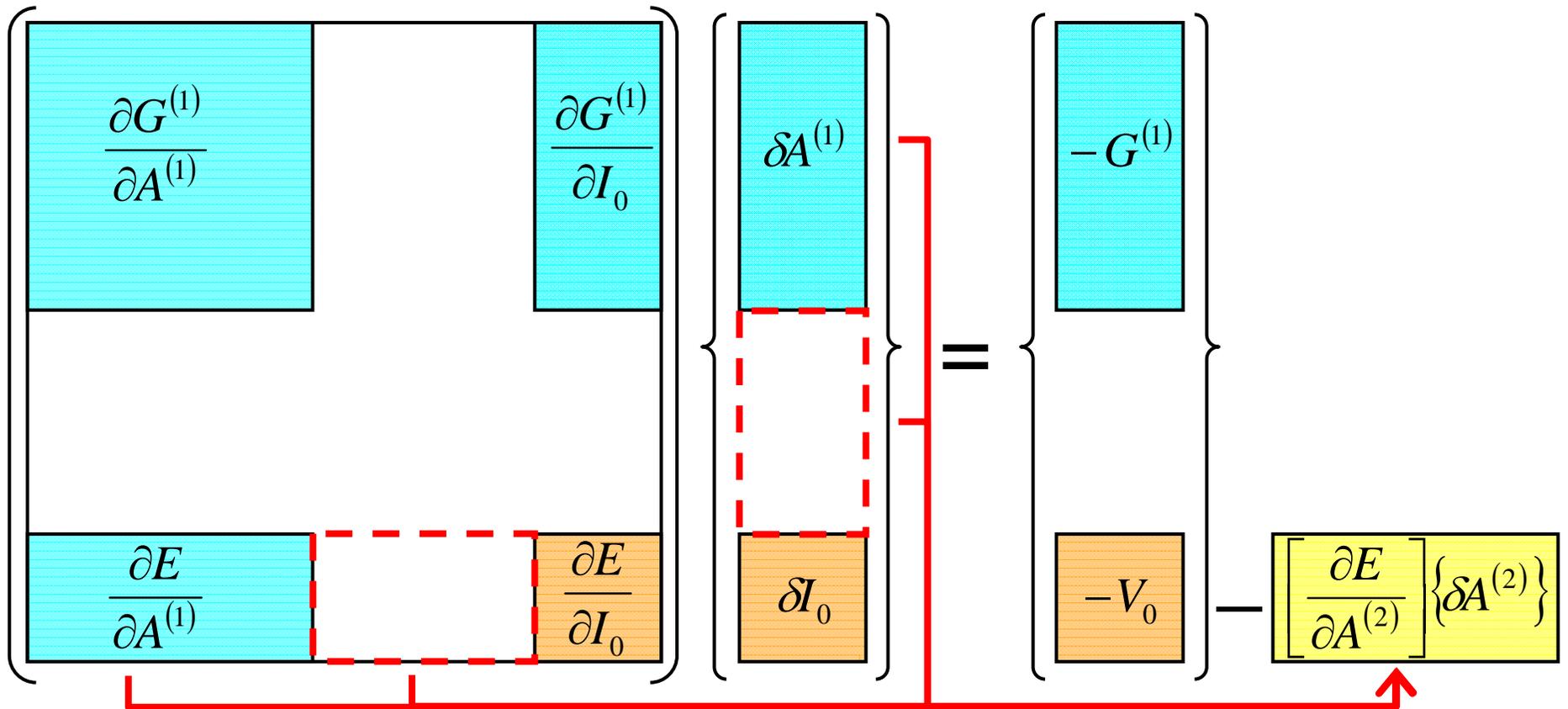
$$\{F^{(j)}\} = \begin{cases} \left[\begin{array}{c} \frac{\partial E}{\partial A^{(j)}} \\ 0 \end{array} \right] \{\delta A^{(j)}\} & \text{(if } j\text{-th subdomain contains coil)} \\ 0 & \text{(otherwise)} \end{cases}$$

電圧源を考慮する際のマトリクス

$$\begin{bmatrix}
 \frac{\partial G^{(1)}}{\partial A^{(1)}} & & \frac{\partial G^{(1)}}{\partial I_0} \\
 & \frac{\partial G^{(2)}}{\partial A^{(2)}} & \frac{\partial G^{(2)}}{\partial I_0} \\
 \frac{\partial E}{\partial A^{(1)}} & \frac{\partial E}{\partial A^{(2)}} & \frac{\partial E}{\partial I_0}
 \end{bmatrix}
 \begin{Bmatrix}
 \delta A^{(1)} \\
 \delta A^{(2)} \\
 \delta I_0
 \end{Bmatrix}
 =
 \begin{Bmatrix}
 -G^{(1)} \\
 -G^{(2)} \\
 -V_0
 \end{Bmatrix}$$

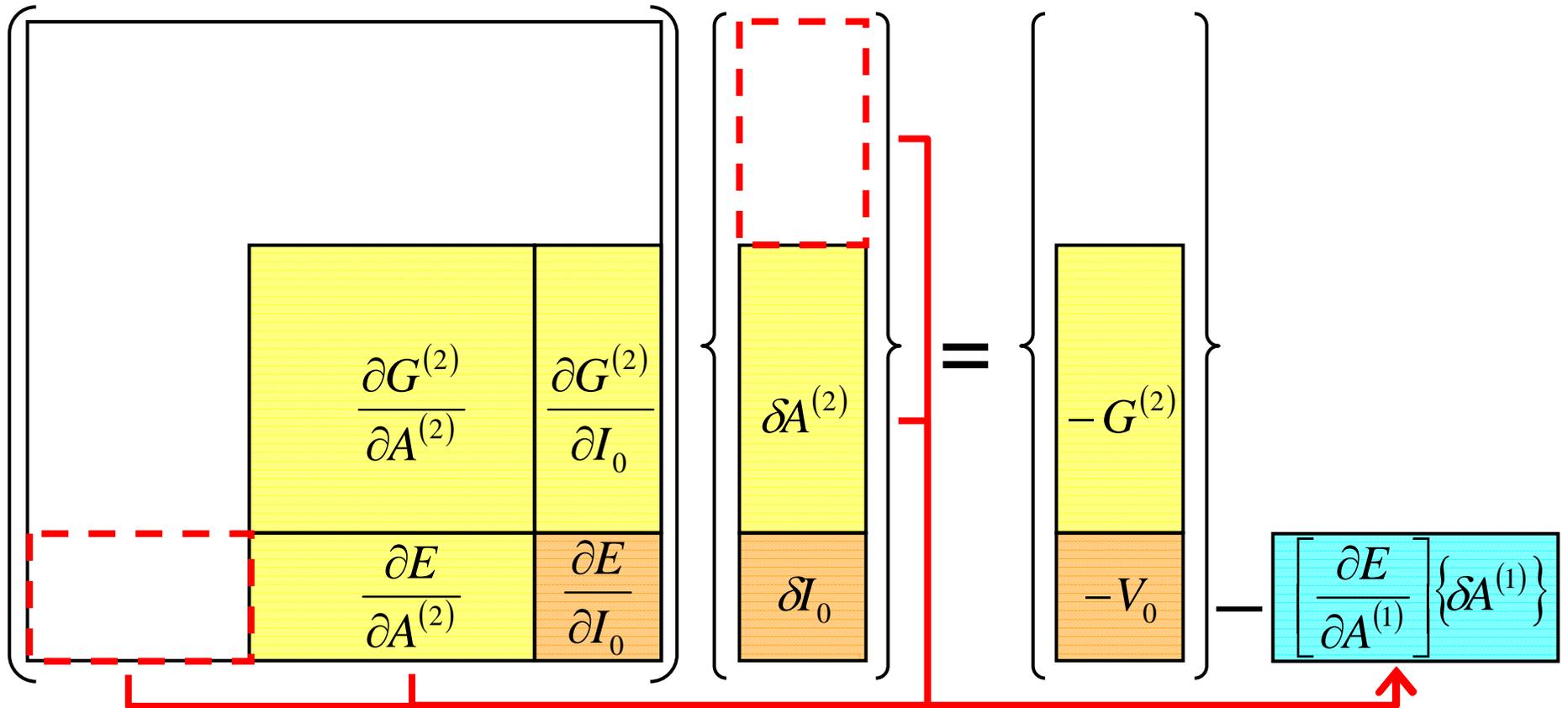
- 1番目の小領域が保持
- 2番目の小領域が保持
- すべての小領域が保持

各小領域でのマトリクス計算



- 1番目の小領域が保持
- 2番目の小領域が保持
- すべての小領域が保持

各小領域でのマトリクス計算

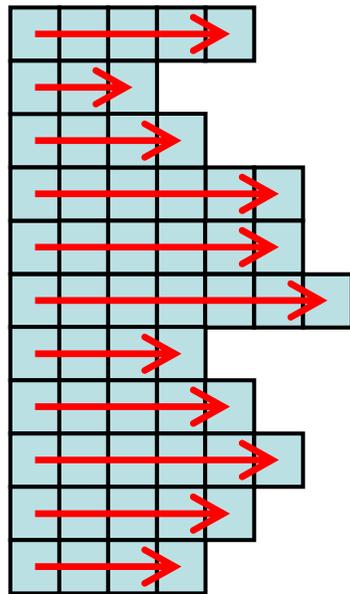


- 1番目の小領域が保持
- 2番目の小領域が保持
- すべての小領域が保持

マトリクスの格納方式

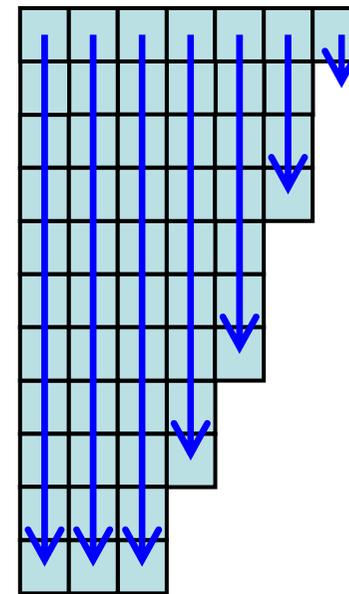
CRS方式

- 各行の非零成分を一次配列に格納。
- メモリの節約が可能。
- ループ長が短い。

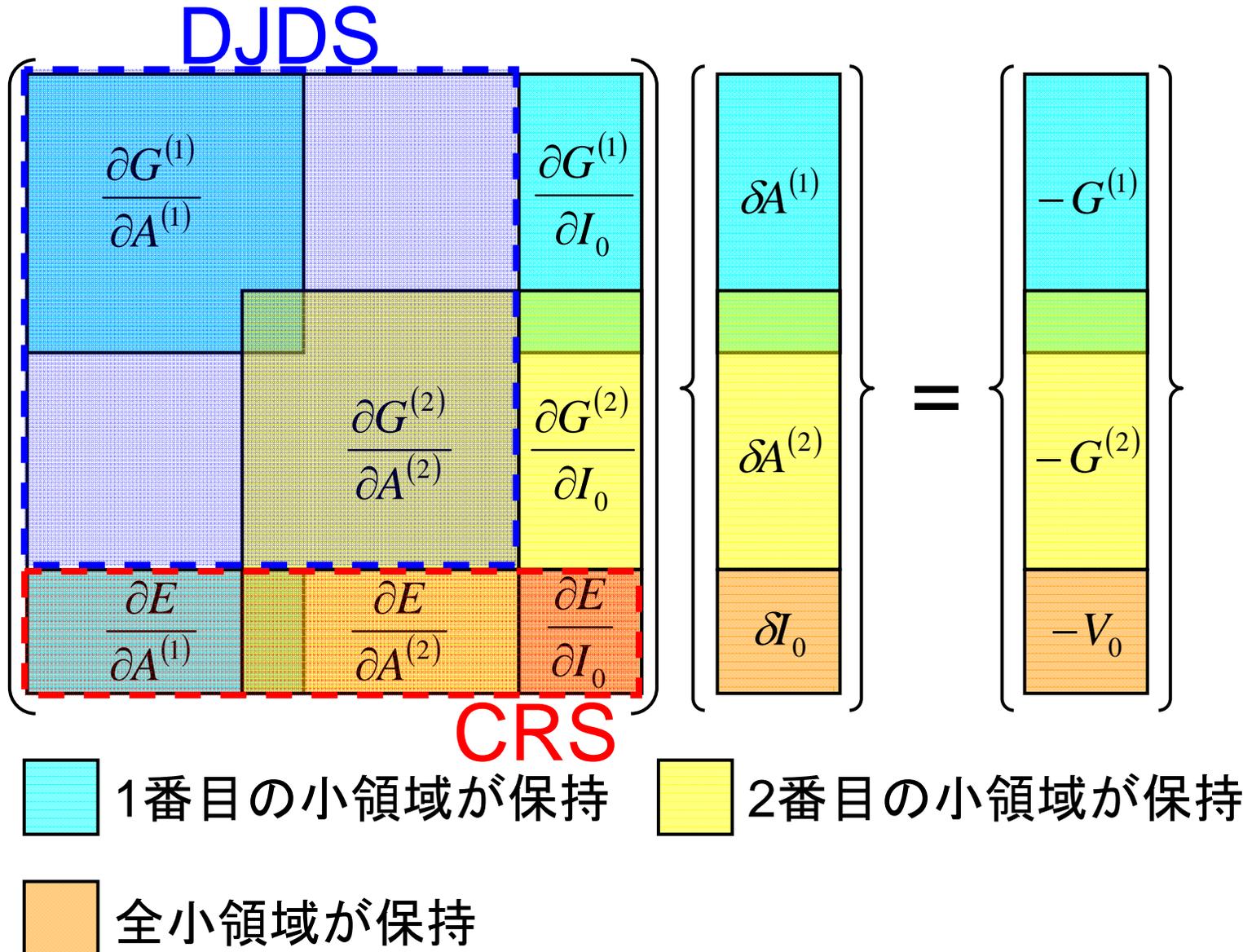


DJDS方式

- 非零成分が多い順に行を並び替え, 縦方向に格納。
- ループ長が長い。

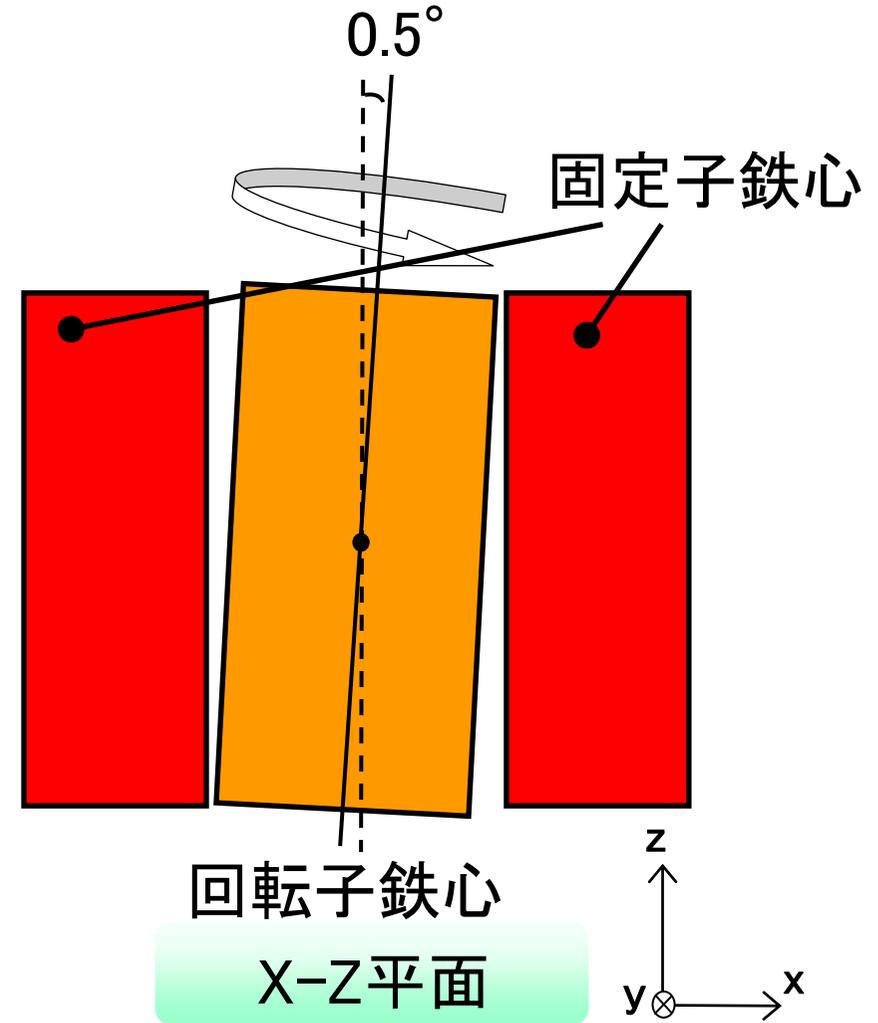
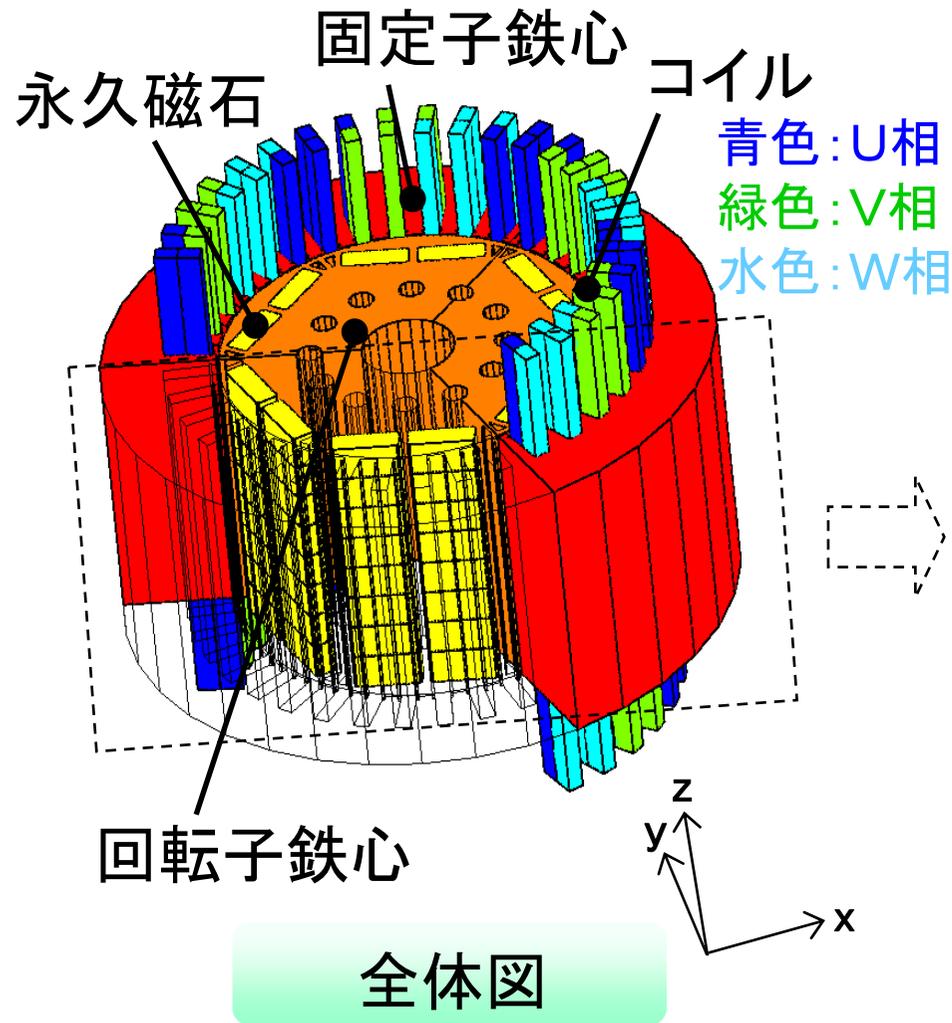


マトリクスの格納方式



数值実験

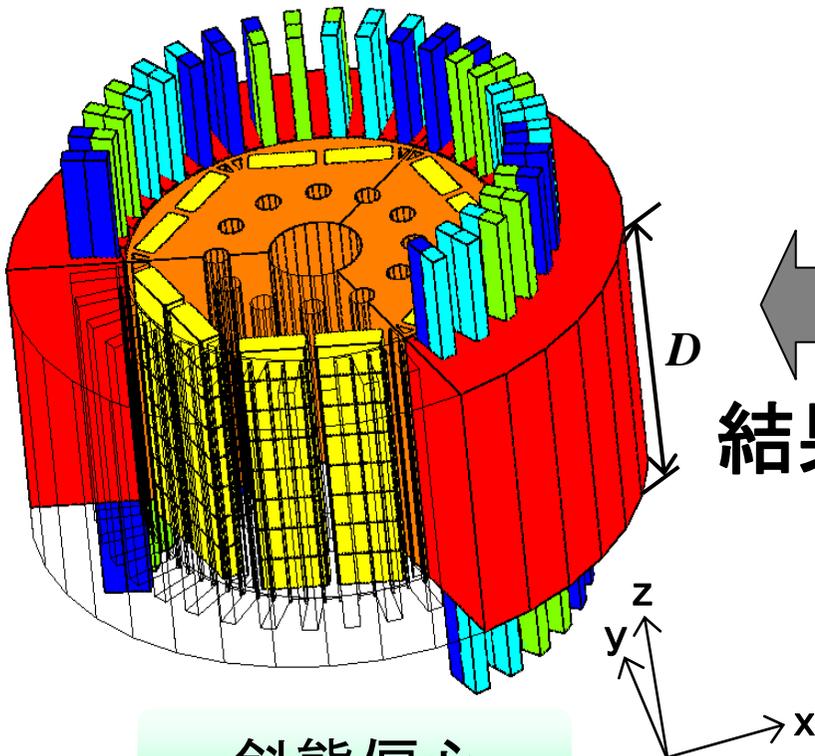
解析モデル(斜態偏心)



解析モデル

1/1領域

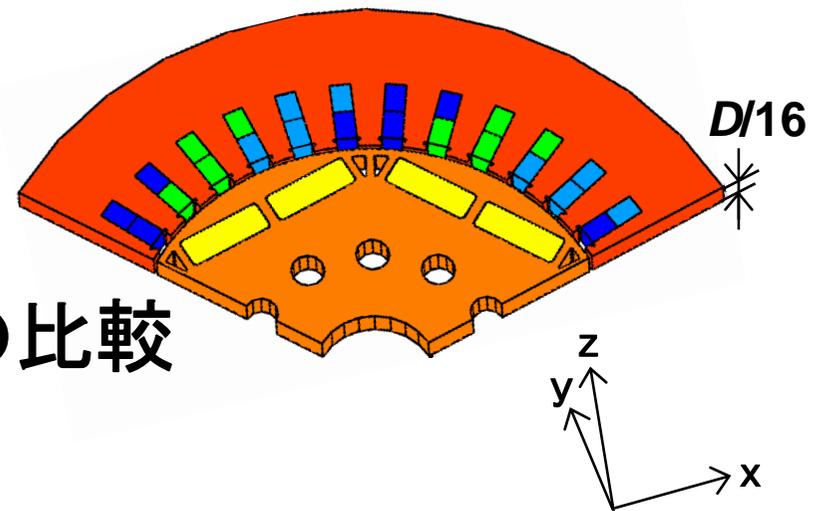
要素数: 5,788,908



斜態偏心

1/48領域

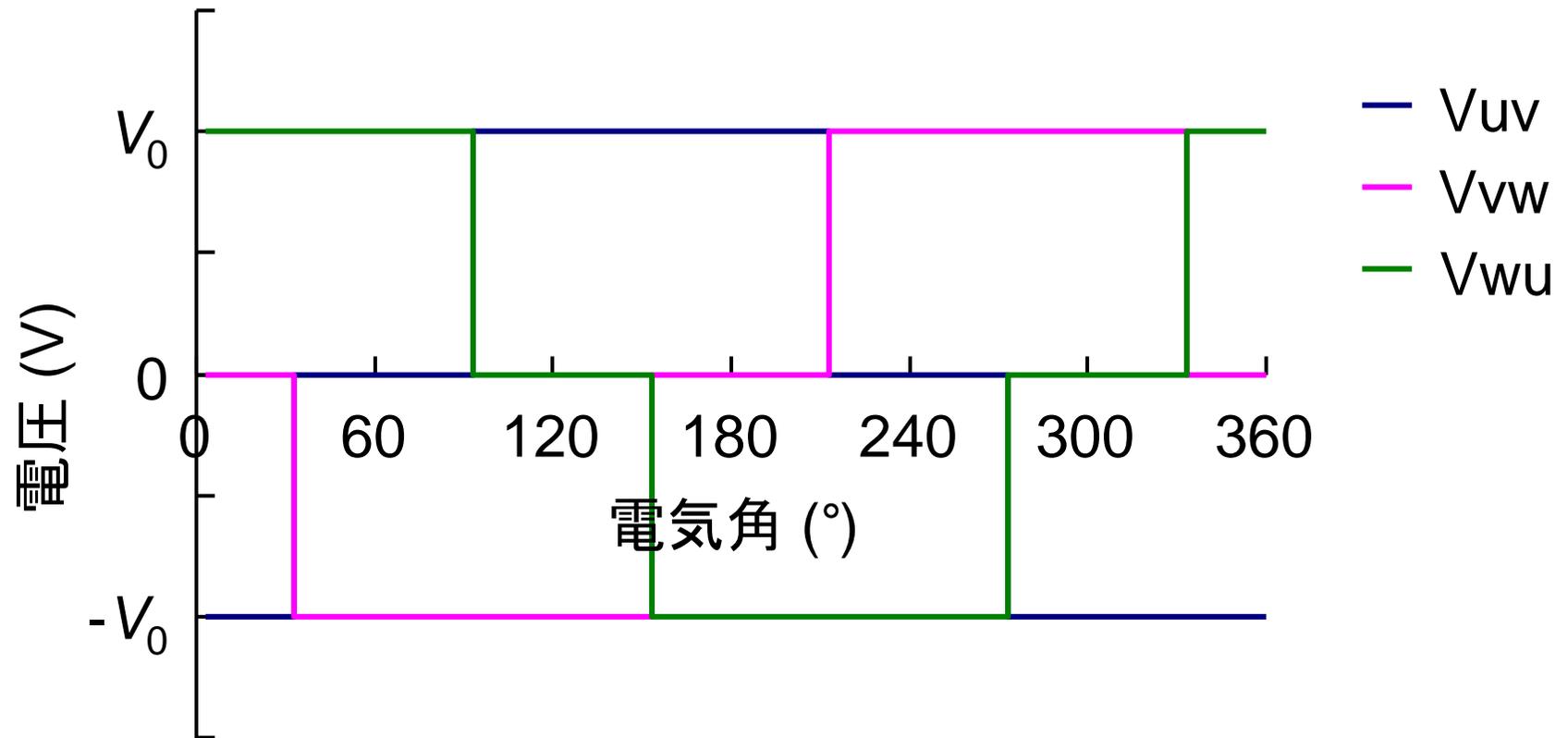
要素数: 134,064



偏心なし

結果の比較

線間電圧波形



解析条件

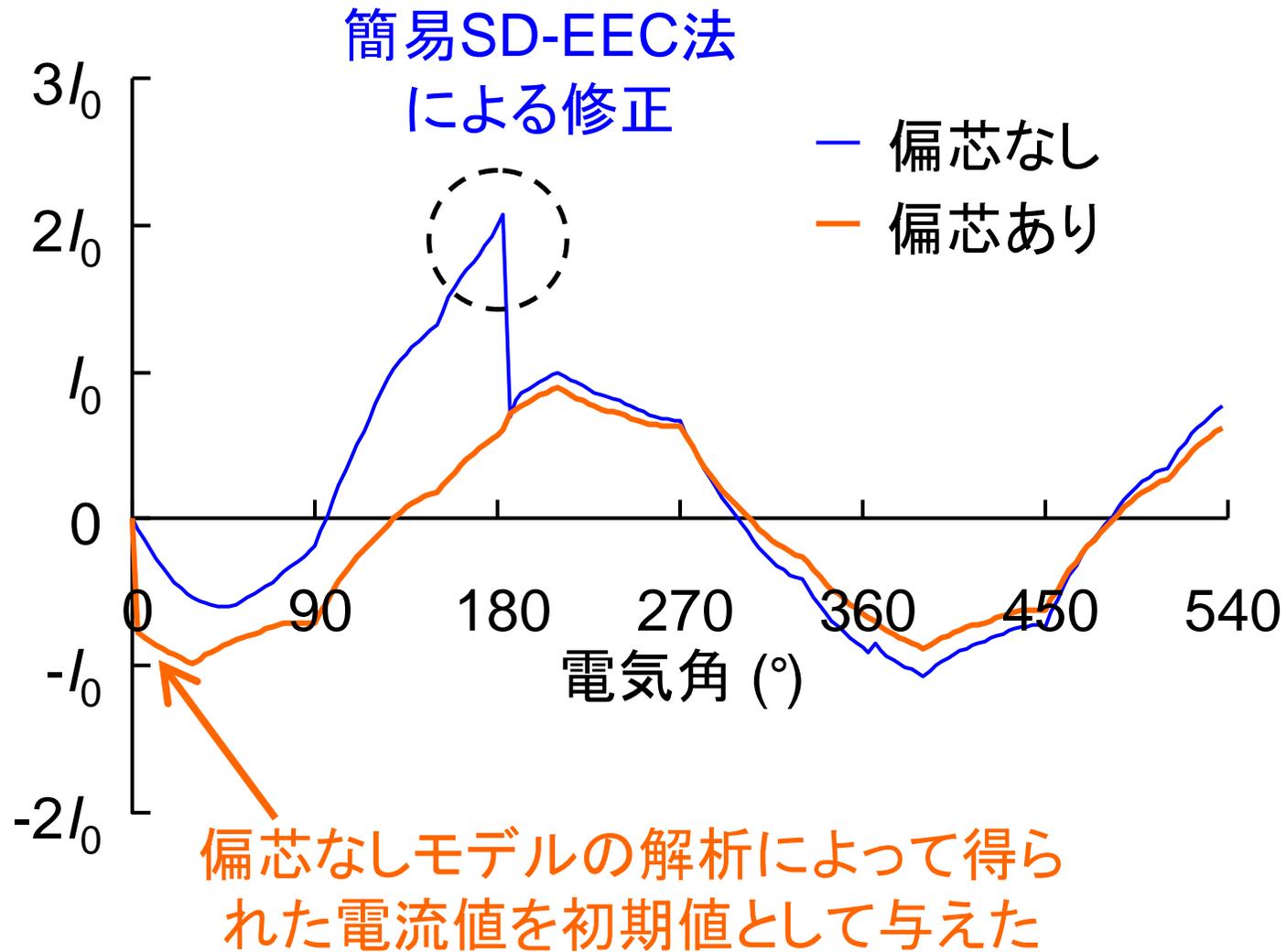
回転速度 (min^{-1})	935
電源周波数 (Hz)	46.75
結線方法	Y結線
コイルの巻き数 (turn)	7
コイル抵抗 (p.u.)	0.038
変調率	0.7
永久磁石の磁化 (T)	1.083

使用計算機

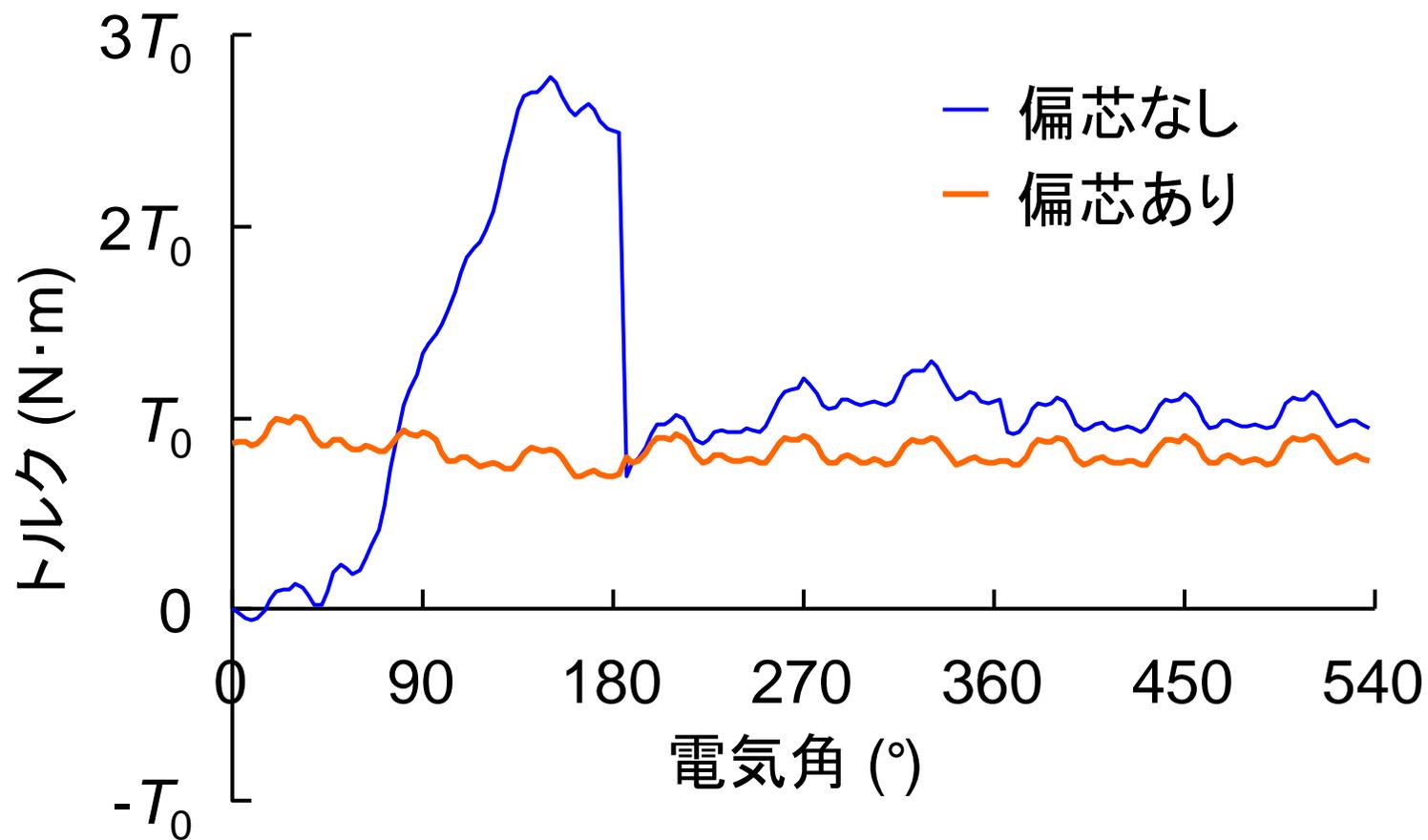
- 2009年3月に新たなシステムに更新された地球シミュレータ(ES2)を用いて並列計算を行った。
- 本計算には8ノード(64CPU)を使用した。



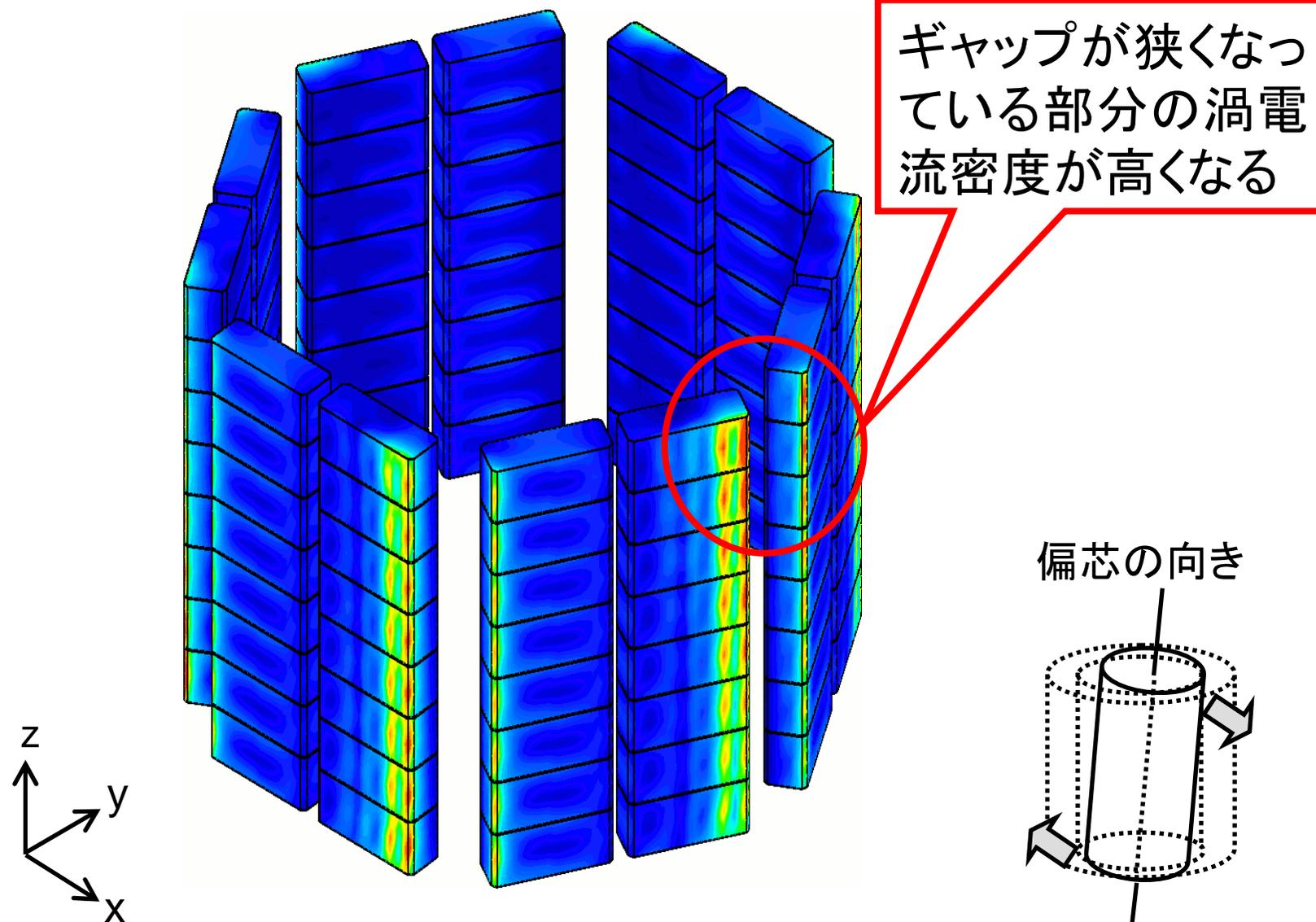
電流波形



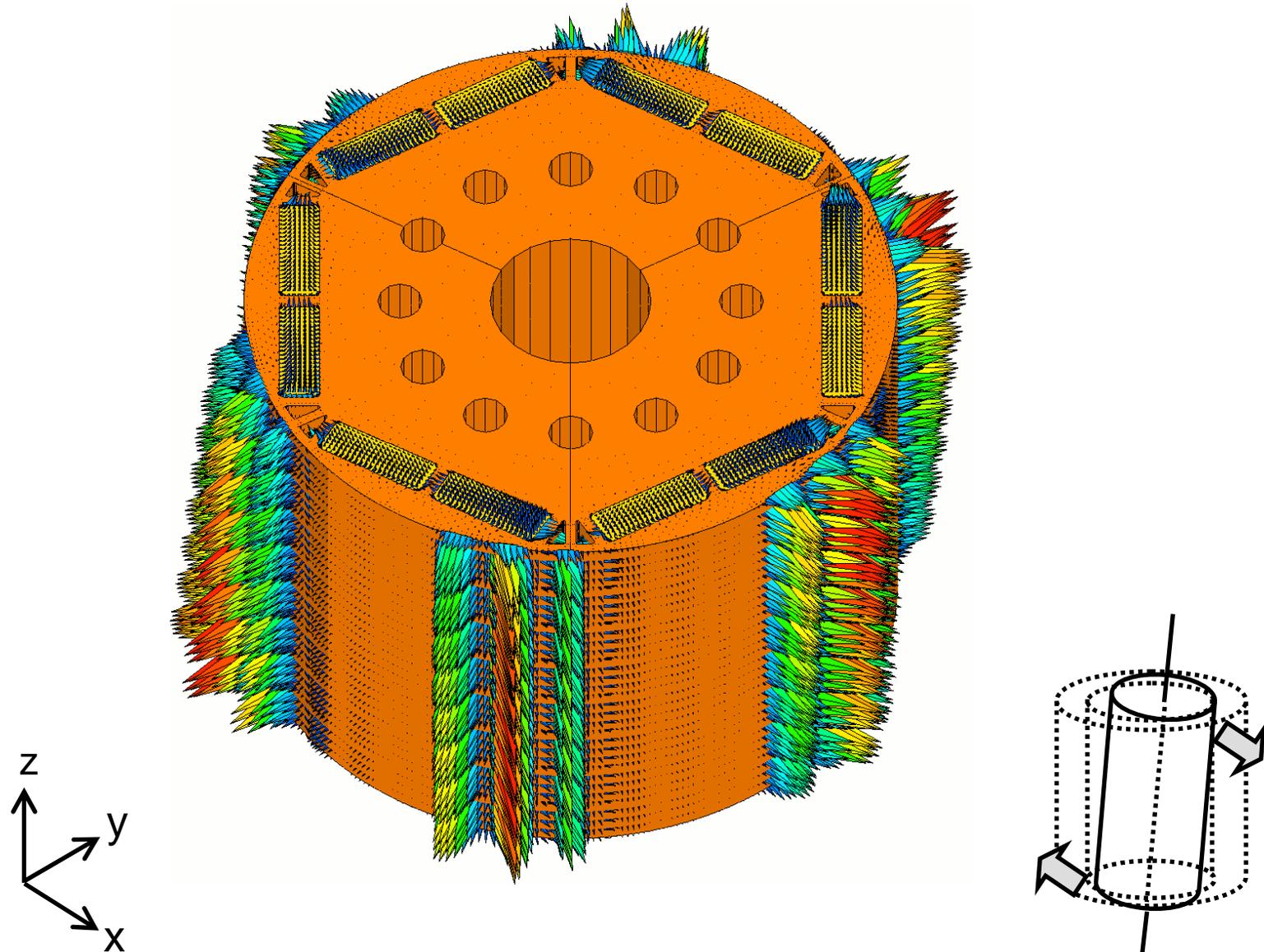
トルク波形



渦電流密度分布(偏芯あり, 永久磁石中)



電磁力分布(回轉子)



計算時間(偏芯あり)

ES2

intel Core 2 Duo (1ステップ) intel Core 2 Duo (180ステップ)

CPU数	64
ステップ数	180
未知数	6,699,762
経過時間 (min./step)	19.4
総経過時間 (hours)	58.0

2.4日

1
1
6,699,762
2,476
41.3

1
180
6,699,762
2,476
7,428.0

310日

まとめ

- 電圧源を考慮した際に現れるマトリクスを効率よく計算するための並列計算手法を提案した。
- ES2を用いて電圧源によって駆動されるIPMモータの大規模な磁界解析を行った。
- 1台のPCでは約310日を要する計算を、ES2を使用して約2.4日で完了させることができた。

今後の予定

- 周期境界
- $A-\phi$ 法の考慮

おわりに

- 地球シミュレータ産業戦略利用プログラムについての要望など
 - 初期段階での無料使用はテーマの導入検討などがしやすく有益。
 - その後の有料化はいいが、上昇率をもう少し下げてもらえるとありがたい。
 - 利用による成果はすぐには期待できないので、公開は期間ではなく、成果が得られた時点であるとやりやすい。
 - ジョブ待ちの削減。
- トップ(一番)を目指さなければ意味はない！

ご清聴ありがとうございました