

大規模数値解析による コイル損失低減技術の開発

伊藤 一洋、井田 浩一（東光株式会社）
河瀬 順洋、山口 忠、加藤 大地（岐阜大学）
河合 良祐（元岐阜大学）
福井 義成、西川 憲明（海洋研究開発機構）

1/23



発表内容

1. 会社概要
2. 背景
3. プロジェクト概要
4. 平成25年度成果
5. まとめ

2/23



会社概要

Corporate Information

【商号】

東光株式会社

【英文商号】

TOKO, INC.

【創立】

1955年(昭和30年)8月9日

【連結売上高】

327億円(2013年12月期)

【従業員数】

連結: 10,823人 単独: 440名(2013年12月31日現在)

現在の主力商品

メタルアロイ®パワーインダクタ



3/23



背景

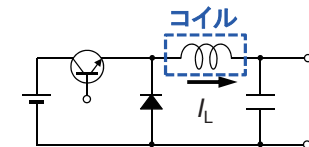
- 近年、電源回路の高周波化が進んでいる
- 渦電流損失は周波数の2乗に比例
→高周波におけるコイル損失低減が重要課題となっている



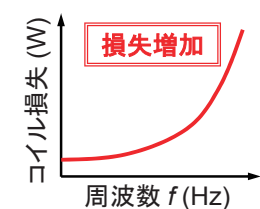
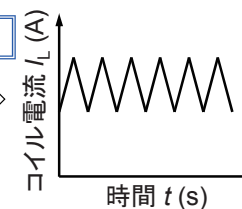
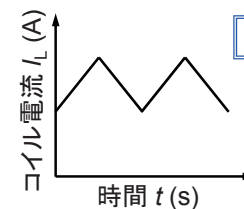
スマートフォン



タブレット端末



電源回路の例
(降圧型DC-DCコンバータ)



4/23



プロジェクト概要(1/2)

利用分野 「環境負荷を低減する技術開発」

◆目的

■コイルの低損失化技術の開発

■コイル損失のメカニズム解明と製品設計へのフィードバック

- 電流および磁界分布を可視化し、損失低減のヒントを探る
- 解析簡略化方法を確立し、PCレベルシミュレーションに展開

5/23



プロジェクト概要(2/2)

◆経緯

- 2011年4月 岐阜大学 河瀬・山口研究室と事前協議・検討開始
- 2013年7月 正式に共同研究開始
- 2013年8月 追加公募課題に選定、トライアルユース開始
 - 通常、大規模計算の実施には多額の費用が必要
 - チャレンジ性が高い課題の場合、予算獲得は容易ではない
 - 無償で効果を事前評価できるトライアルユースは良い制度

◆プロジェクト体制

岐阜大学 河瀬・山口研究室	プログラム作成・チューニング 計算実行 プリ・ポスト処理
東光 研究開発センター	モデル・メッシュデータ作成 実機試作・測定

6/23



平成25年度成果

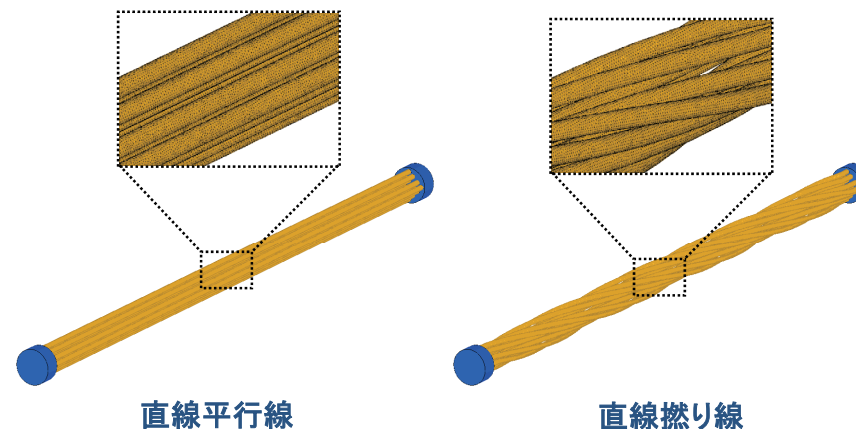
(利用期間：平成25年8月7日～平成26年8月6日)

7/23



直線平行線・撚り線の解析モデル

- プログラム動作確認の一環として実施
 - 数百万要素規模であり、PC単体で計算が可能
- 撚りの影響を確認するため、平行線と撚り線の2種類を比較



直線平行線

直線撚り線

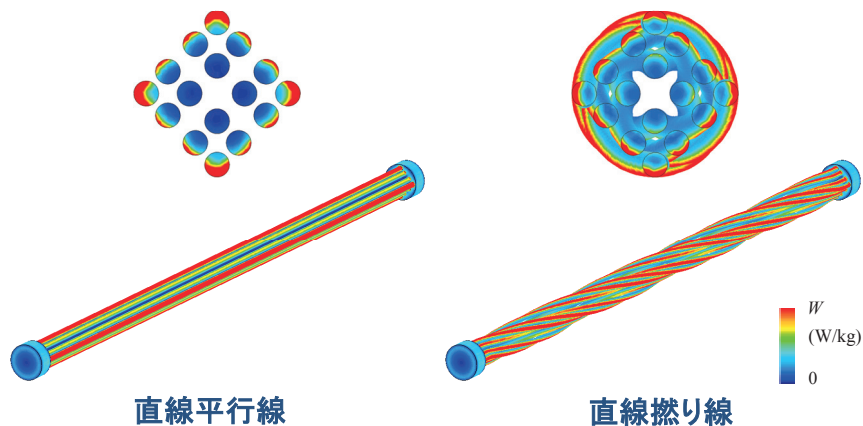
8/23



直線平行線・撚り線の銅損分布

- 平行線は外側の素線に銅損が集中、撚り線は銅損集中が緩和
→ 想定通りの結果であり、プログラムの正常動作を確認

周波数: 1MHz

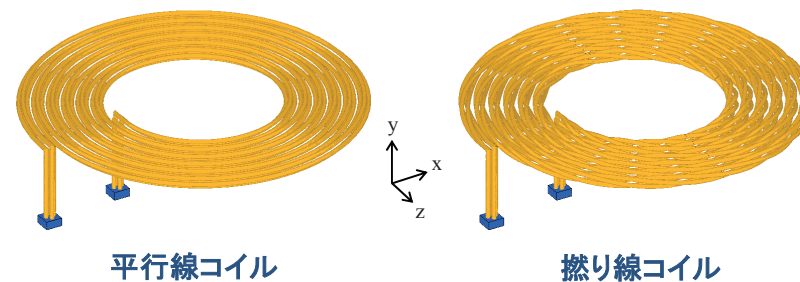


9/23

TOKO

4本撚りコイルの解析モデル

- 大規模解析の第1段階として4本撚り6ターンコイルの解析を実施
→ 実機を簡略化したモデルだが、2600万要素規模となった
→ PCでは計算が困難
- 撚りの影響を確認するため、平行線と撚り線の2種類を比較



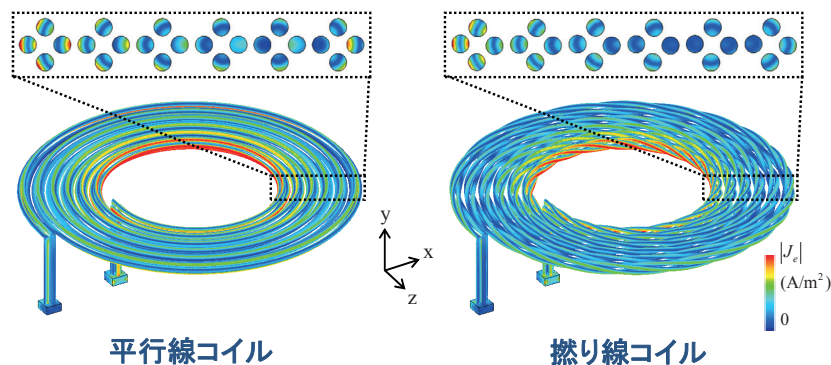
10/23

TOKO

4本撚りコイルの渦電流密度分布

- 両モデルとも素線表面に渦電流が集中
- 撚り線コイルは渦電流の集中が若干緩和
→ 撚り線の効果が現れており、妥当な結果

周波数: 100kHz



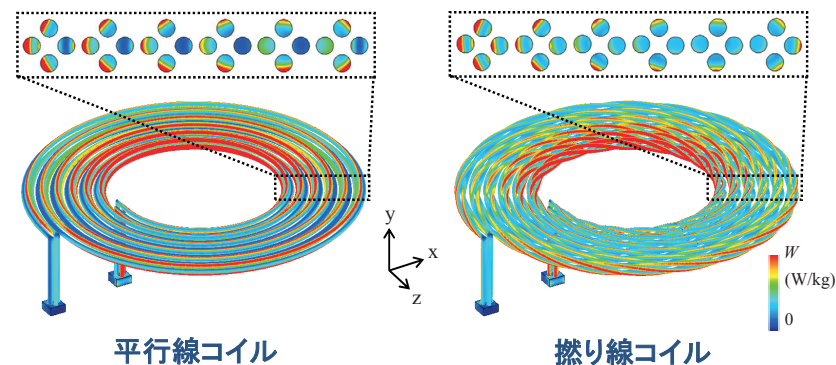
11/23

TOKO

4本撚りコイルの銅損分布

- 両モデルとも素線表面に銅損が集中
- 撚り線コイルは銅損集中が若干緩和
→ 銅損分布の違いがわかりにくい結果

周波数: 100kHz

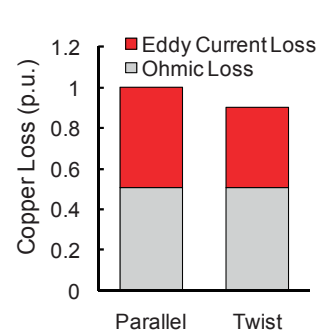


12/23

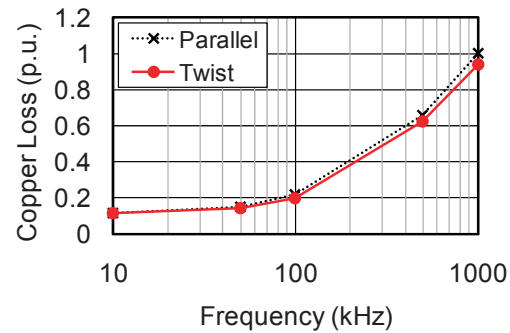
TOKO

4本撚りコイルの損失特性

- 撚り線コイルは平行線コイルと比べて銅損が10%程度減少
→ 4本撚りは損失低減効果が小さい



損失特性(100kHz)



銅損の周波数特性

13/23

TOKO

4本撚りコイルの解析諸元

- 計算時間は30分から1時間程度(16CPU使用時)
- PCでは困難な計算が、現実的な時間で実行できることを確認
→ 更に大規模な計算にチャレンジ

Analyzed model	Parallel	Twist
Frequency (kHz)	100	
Number of elements	26,013,730	26,610,044
Number of unknown variables	32,066,563	32,351,226
MFLOPS	15121.641	14191.351
Vector operation ratio (%)	99.597	99.537
Elapsed time (min.)	54.83	31.84

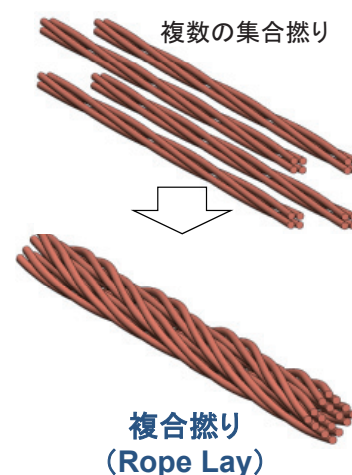
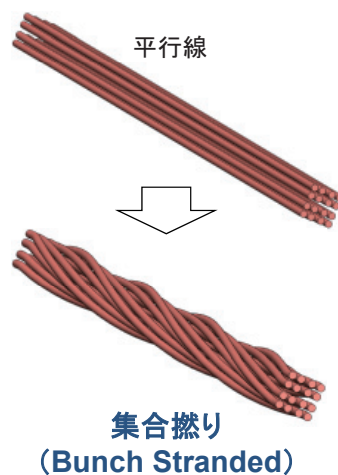
Computer used : Earth Simulator (ES2) 16CPU

14/23

TOKO

16本撚りコイルの解析モデル(1/2)

- 大規模解析の第2段階として、16本撚りコイルの解析を実施
→ モデルとメッシュの作成難易度が上がるが、実機に近い構造

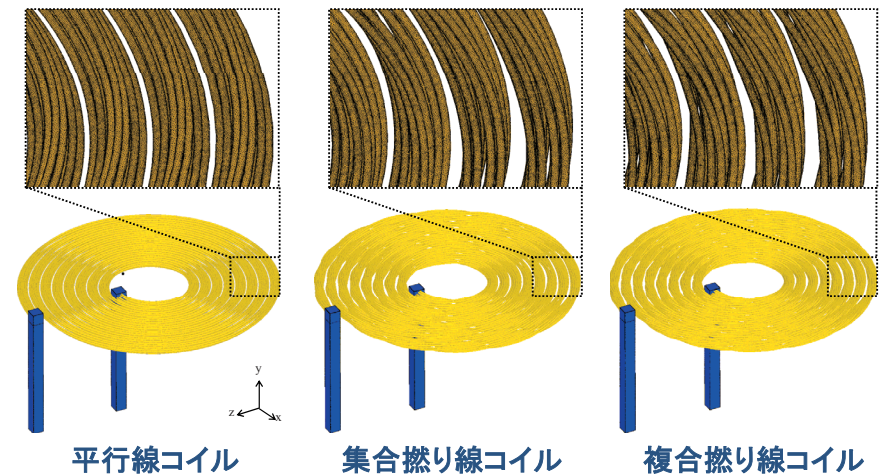


15/23

TOKO

16本撚りコイルの解析モデル(2/2)

- 16本撚り8ターンコイルのモデルとメッシュを作成
→ 約1億要素規模となり、PCでは計算が不可能



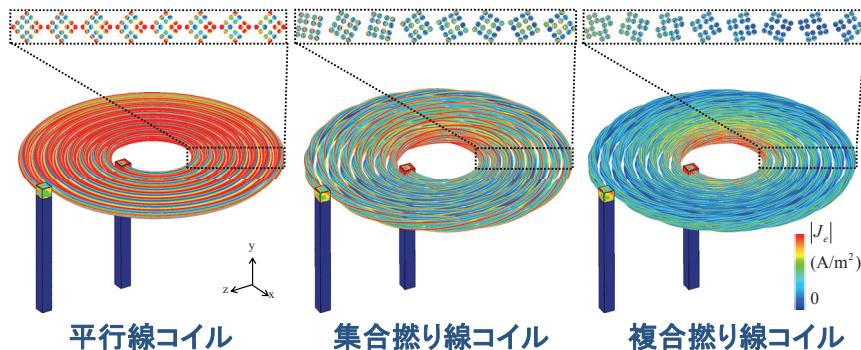
16/23

TOKO

16本撚りコイルの渦電流密度分布

- 平行線コイルは外側の素線に渦電流が集中
- 撚り線コイルは渦電流の集中が大幅に緩和
→ 集合撚り線と比べて、複合撚り線の方が緩和効果が高い

周波数: 100kHz



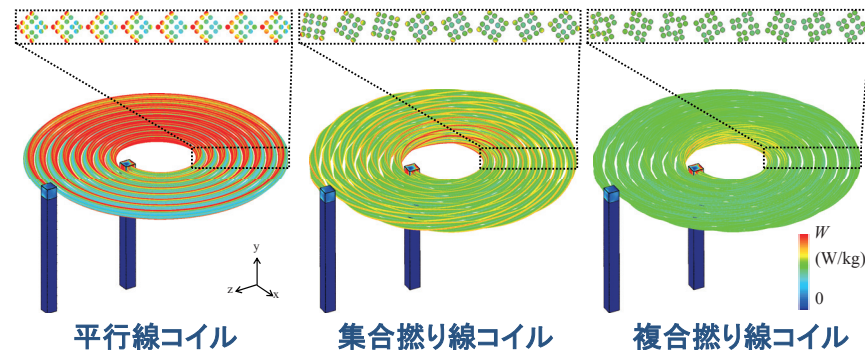
17/23

TOKO

16本撚りコイルの銅損分布

- 平行線コイルは内側の素線に銅損が集中
- 複合撚り線コイルが一番均等に銅損が分布
→ コイル規模で撚り線の効果を明確に可視化したのは**世界初**

周波数: 100kHz

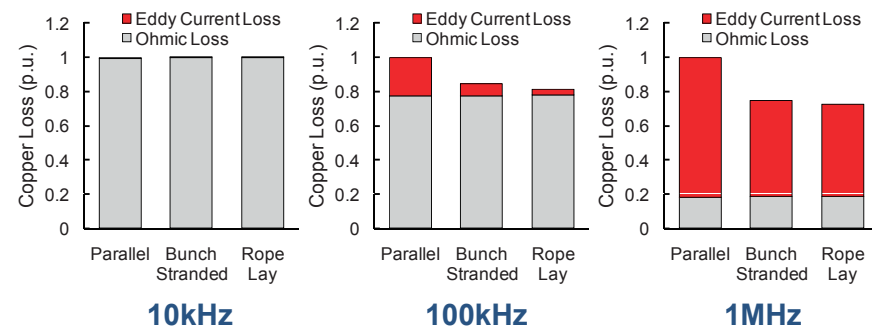


18/23

TOKO

16本撚りコイルの損失特性

- 撚り方の違いが損失に与える影響を定量的に評価
- 4本撚りコイルと比べて損失低減効果が大い
→ 最も損失低減効果が大いのは複合撚り線

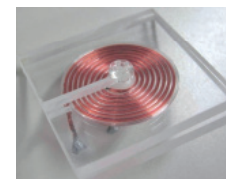
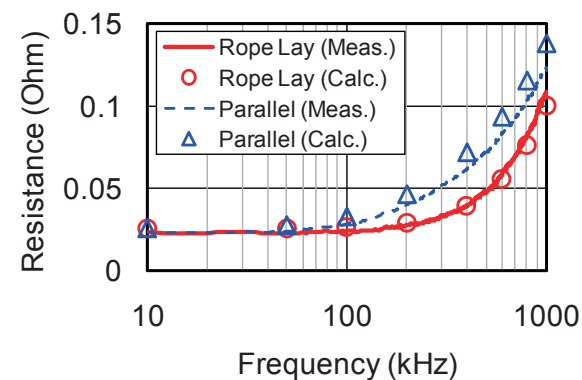


19/23

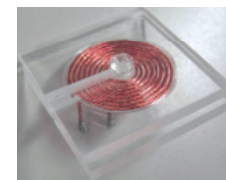
TOKO

実測値との比較

- 解析結果の検証のため、コイルを試作
→ 交流抵抗の計算値と実測値は良く一致
→ 解析結果の妥当性を確認



平行線コイル



複合撚り線コイル

20/23

TOKO

16本撚りコイルの解析諸元

- 1億要素規模の計算が30分程度で完了(96CPU使用時)
→地球シミュレータを用いることで、現実的な時間で計算できた
- ベクトル化率99.5%以上の高い計算機利用効率を達成

Analyzed model	Parallel	Bunch Stranded	Rope Lay
Frequency (kHz)	100		
Number of elements	95,550,237	96,615,183	98,519,695
Number of unknown variables	119,550,399	122,857,758	123,183,480
MFLOPS	13934.393	13370.569	13164.194
Vector operation ratio (%)	99.569	99.530	99.522
Elapsed time (min.)	38.84	24.30	26.06

Computer used : Earth Simulator (ES2) 96CPU

21/23



まとめ

■直線平行線・撚り線の解析

- プログラム動作確認を行った
- 撚り線の銅損集中緩和効果を確認した

■4本撚りコイルの解析

- コイル規模で撚り線の効果を確認した
- 素線数が少ないと損失低減効果が小さいことがわかった

■16本撚りコイルの解析

- 実機に近いモデルを作成し、撚り線の効果を可視化した
- 撚り方の違いが損失に与える影響を定量的に評価した
- 複合撚り線が最も損失低減効果が大きいことがわかった
- 交流抵抗の計算値と実測値が良く一致することを確認した
- 1億要素規模が現実的な時間で計算できることを確認した

22/23



学会発表

- [1] 河瀬順洋, 山口忠, 河合良祐, 加藤大地, 井田浩一, 伊藤一洋, 福井義成, 西川憲明,
“三次元有限要素法を用いたより線コイルの渦電流解析,”
電気学会 静止器回転機合同研究会, SA-14-26/RM-14-26, Jan. 2014.
- [2] 河瀬順洋, 山口忠, 河合良祐, 加藤大地, 井田浩一, 伊藤一洋, 福井義成, 西川憲明,
“三次元有限要素法によるより線コイルの損失特性解析,”
平成26年 電気学会全国大会, 5-195, Mar. 2014.
- [3] Y. Kawase, T. Yamaguchi, R. Kawai, D. Kato, K. Ida, K. Ito, Y. Fukui and N. Nishikawa,
“3-D Finite Element Analysis of Electrical Loss of Stranded Wire Coil,”
16th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation, May 2014.
- [4] 河瀬順洋, 山口忠, 加藤大地, 井田浩一, 伊藤一洋, 福井義成, 西川憲明,
“三次元有限要素法を用いた撚り線コイルの損失特性解析,”
電気学会 静止器回転機合同研究会, SA-14-087/RM-14-103, Sep. 2014.

23/23

