

## 円筒巻線に適用する高温超電導並列導体の最適転位 と電流分流に関する研究

福本, 祐介

<https://hdl.handle.net/2324/2236259>

---

出版情報 : 九州大学, 2018, 博士 (工学), 課程博士  
バージョン :  
権利関係 :

円筒巻線に適用する高温超電導並列導体の  
最適転位と電流分流に関する研究

福本 祐介

平成31年 2月

電気電子工学専攻

博士後期課程

円筒巻線に適用する高温超電導並列導体の  
最適転位と電流分流に関する研究

目次

<b>第1章 緒言</b> .....	<b>1</b>
1.1 はじめに.....	1
1.2 超電導の機器応用に向けた課題.....	2
1.3 本研究の目的.....	7
1.4 本論文の構成.....	8
<b>第2章 無限ソレノイドコイル近似による最適転位パターンの提示</b> .....	<b>11</b>
2.1 最適転位パターンの導出手順.....	11
2.2 最適層間転位パターン.....	15
2.3 最適層内転位パターン.....	23
2.4 層間転位と層内転位を組み合わせた転位パターン.....	29
2.4.1 最適層内転位を繰り返す場合.....	29
2.4.2 層内全転位を組み込んだ最適層間転位パターン.....	34
2.4.3 最適転位層数以上の場合.....	40
2.5 まとめ.....	48
<b>第3章 数値解析による最適転位パターンの検証</b> .....	<b>49</b>
3.1 有限長ソレノイドコイルの計算方法.....	49
3.2 最適転位パターンの数値解析.....	52
3.2.1 最適層間転位パターン.....	52
3.2.2 最適層内転位パターン.....	56
3.2.3 層内全転位を組み込んだ最適層間転位パターン.....	61

3.2.4 任意の層数における最適転位パターン.....	63
3.3 超電導コイルによる検証.....	69
3.3.1 最適層内転位パターン.....	69
3.3.2 最適層間転位パターン.....	75
3.4 まとめ.....	78
<b>第4章 転位並列導体の直流応用への適用性.....</b>	<b>79</b>
4.1 高温超電導線材の臨界電流の磁場依存性.....	79
4.2 超電導マグネット.....	80
4.3 高温超電導線材の特性ばらつきの影響.....	84
4.4 まとめ.....	86
<b>第5章 結言.....</b>	<b>87</b>
<b>謝辞.....</b>	<b>90</b>

## 第1章 緒言

### 1.1 はじめに

超電導の歴史は、1911年、オランダの物理学者である Heike Kamerlingh Onnes により、液化ヘリウム温度 (4.2 K) における金属の電気抵抗の測定中に、水銀の電気抵抗がゼロとなる現象が発見されたことに始まる<sup>1)</sup>。その後、Ta (4.47 K)、Nb (9.25 K)、Ti (0.4 K)、Th (1.38 K) といった単体金属、1950年から1960年にかけては、合金系である NbTi (9.3 K) や化合物系の Nb<sub>3</sub>Sn (18 K)<sup>2)</sup> といった、いわゆる金属系超電導材料が多数発見され、それに伴って常電導状態から超電導状態に遷移する臨界温度 ( $T_c$ ) の最高値も段階的に更新されていった。しかしながら、液化ヘリウムで冷却しなければならず、液化・冷却システム等の経済的負担が大きい課題があった。このような状況の中で1973年に Nb<sub>3</sub>Ge が発見されて以来<sup>3)</sup>、13年間  $T_c$  の上昇は見られなかった。

1986年、Bednorz と Muller は酸化物である La-Ba-Cu-O 化合物の電気抵抗が 35 K 付近から急に下がり始め、約 13 K でゼロになることを報告した<sup>4)</sup>。その後、Tanaka 等のグループによりこの物質のマイスナー効果が確認され<sup>5)</sup>、(LaBa)<sub>2</sub>CuO<sub>4-y</sub> 相が超電導相であることが示された<sup>6)</sup>。これにより、Bednorz 等の報告した現象が超電導状態への転移であることが示され、それまでの  $T_c$  の最高記録が破られた。1987年には Wu 等により Y-Ba-Cu-O 系で初めて液体窒素の沸点 (77.3 K) 以上の臨界温度 (92 K) が報告され<sup>7)</sup>、さらに1988年には Maeda 等<sup>8)</sup>により Bi-Sr-Ca-Cu-O 系 (107 K)、Sheng 等<sup>9)</sup>および Perkin 等<sup>10)</sup>による Tl-Ba-Ca-Cu-O 系 (125 K) が発見され、 $T_c$  の最高値は更新されていった。図 1-1 に臨界温度の変遷を示す。Y 系超電導体が発見されて以降、多くの物質で冷媒として液化窒素が使用可能となる  $T_c$  が得られ、これまでの経済的な課題を一挙に解決できる可能性があることから、実用化ができればその応用範囲は飛躍的に拡大する。

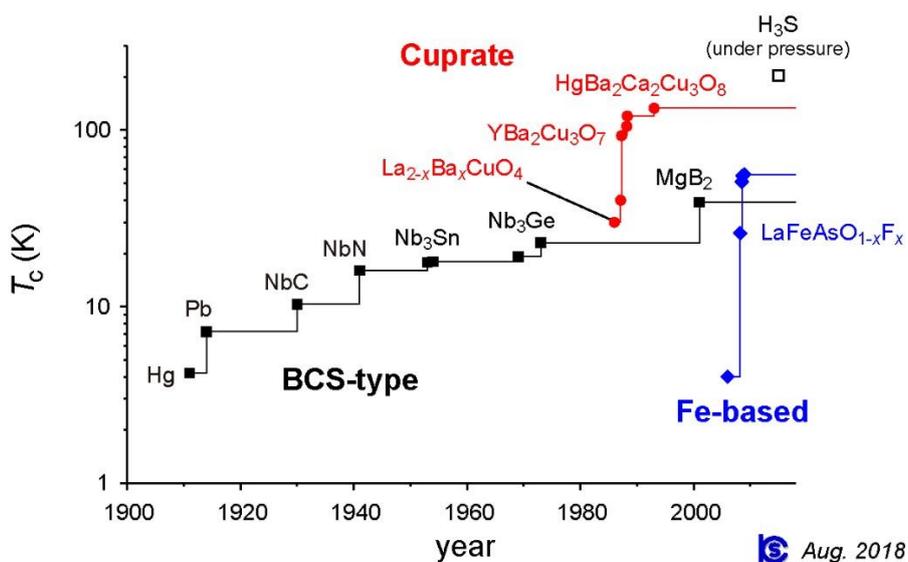


図 1-1. 臨界温度の変遷 (東京大学 橘高研究室ホームページより)

2015年12月12日、パリで開催された第21回気候変動枠組条約締約国会議（COP21）において、気候変動に関する多国間の国際的な協定である「パリ協定<sup>11)</sup>」が採択された。これは、大気中の温室効果ガスの濃度の増加による気候変動に対処するための国際的な枠組を定める、気候変動に関する国際連合枠組条約に基づくものであり、全ての締約国が参加する公平かつ実効的な枠組とするものである。この中で、世界共通の長期削減目標として、産業革命前からの気温上昇を2℃未満に抑制することを規定すると共に、1.5℃までの抑制に向けた努力の継続に言及し、主要排出国・途上国を含む全ての国が削減目標を策定し、5年ごとに提出、更新し、国内措置を遂行することが示されている。

わが国では、2030年度に2013年度比26.0%減を目標とし、それに向けた取り組みとして、「途上国支援」と「イノベーション」の2本の柱を掲げた。特に「イノベーション」においては、気候変動対策と経済成長両立の鍵は革新的技術の開発であるとした、「エネルギー・環境イノベーション戦略<sup>12)</sup>」に集中すべき有望分野を特定し、研究開発を強化する方針となっている。

「エネルギー・環境イノベーション戦略」に示す革新技术分野においては、電気抵抗がゼロとなる超電導も対象となっており、「新しい超電導材料の更なる研究や生産技術開発を行うとともに、線材の低コスト化、冷却システムの革新的な小型化・コンパクト化・軽量化・低コスト化を実現する研究開発を強力に推進し、送電線や産業用モーター、発電機等への適用が可能となる技術を確立することで、抜本的なエネルギー消費効率の向上や、それを統合する新たなエネルギー・システムの創出に繋げる」との記載があることから、超電導の基礎から応用までの研究開発に期待が大きく高まっている。

## 1.2 超電導の機器応用に向けた課題

超電導体は、低温に冷却していくと電気抵抗がゼロ（完全導電性）になるとともに、材料内部から磁束を追い出し外部磁場と反対方向に磁化する状態（完全反磁性）になる物質である。この完全導電性を利用して電気抵抗によるエネルギー損失なしに高電流密度で電流が流せる導電材料として、直流およびパルス用の高磁場用超電導マグネット、および超電導変圧器や超電導送電、超電導電力貯蔵といった交流電気機器への応用が期待されている。また完全反磁性の特性利用として、磁気浮上、磁気シールド等が挙げられ、更に磁束量子化現象やジョセフソン効果を利用したSQUIDや超電導素子等への応用も挙げられる。

特に、超電導変圧器は静止器であることから早期の開発が期待できる。超電導変圧器は従来の常電導変圧器と比較して、超電導巻線が低損失であることにより効率を向上させることができ、さらに電気装荷を増大させて鉄心断面積を削減することにより小型、軽量化が図れる可能性がある。例えば、新幹線電車に搭載する主変圧器についても高効率化、軽量化を目的に超電導化の検討がなされている。車両の軽量化により、運行エネルギーの削減、軌道保守作業の低減、スピードアップ、地盤振動の低減、機械ブレーキの簡素化、構造物建設コストの低減といったさまざまな効果が得られる。従来、車両用主変圧器は質量低減のため銅

機械として設計されているが、銅損が大きいいため、効率が 95 % となっている<sup>13)</sup>。これを超電導化することにより、20 % 以上の軽量化と 99.5 % の高効率な主変圧器が実現できることも報告されている<sup>14)</sup>。

超電導体に電流を流す場合、電流分布や磁界分布に変化が起こった際に、交流損失すなわち発熱が起こり、超電導状態が破れてしまうことがある。従来の金属系超電導材料においては、臨界温度が低く、冷媒として使用する液化ヘリウムの熱容量も小さいため、温度マージンが不十分であった。そのため、交流損失や電磁力による摩擦熱等により、超電導フィラメント内で局所的なクエンチが発生すると、クエンチしたフィラメントに流れていた電流が他のフィラメントに急速に再分配することを繰り返し、超電導線材全体の温度は急速に上昇する (fast quench<sup>15)</sup>、図 1-2)。よって、安定性確保のためには電流経路を増やす必要がある。金属系超電導線材のほとんどは、フラックスジャンプや交流損失の対策として数~数十  $\mu\text{m}$  に細線化した超電導フィラメントを多数本常電導母材に埋め込み多芯線とし、さらに撚線導体化した構造としている。これにより安定性を確保するが、輸送電流や遮蔽電流がフィラメント間に存在する常電導母材を流れることによるジュール熱 (結合損失) が増大する。さらには温度マージンが小さいこともあり、金属系超電導体を用いては、低損失、大容量、高安定な交流電気機器の実現は不可能であった。

このような状況の中、高い臨界温度を持つ高温超電導体の発見は革新的であった。特に昨今線材化技術の開発が進む、Y-Ba-Cu-O ( $T_c=92\text{ K}$ ) および Bi-Sr-Ca-Cu-O ( $T_c=107\text{ K}$ ) は液化窒素 (大気圧沸点 77.3 K) が冷媒として使用できる臨界温度を持つため、高い温度マージンを確保することができる。液化窒素は液化ヘリウムに対して蒸発エンタルピー ( $\text{LN}_2: 5.58\text{ kJ/mol}$ 、 $\text{LHe}: 0.084\text{ kJ/mol}$ <sup>16)</sup>) が高いため、多少の発熱にも深刻な影響を及ぼすことがない。つまり、金属系超電導体で見られた fast quench が生じることがないため、素線単体で高い安定性を確保でき、素線毎の絶縁が可能となる。絶縁した超電導素線を束ねて導体化する

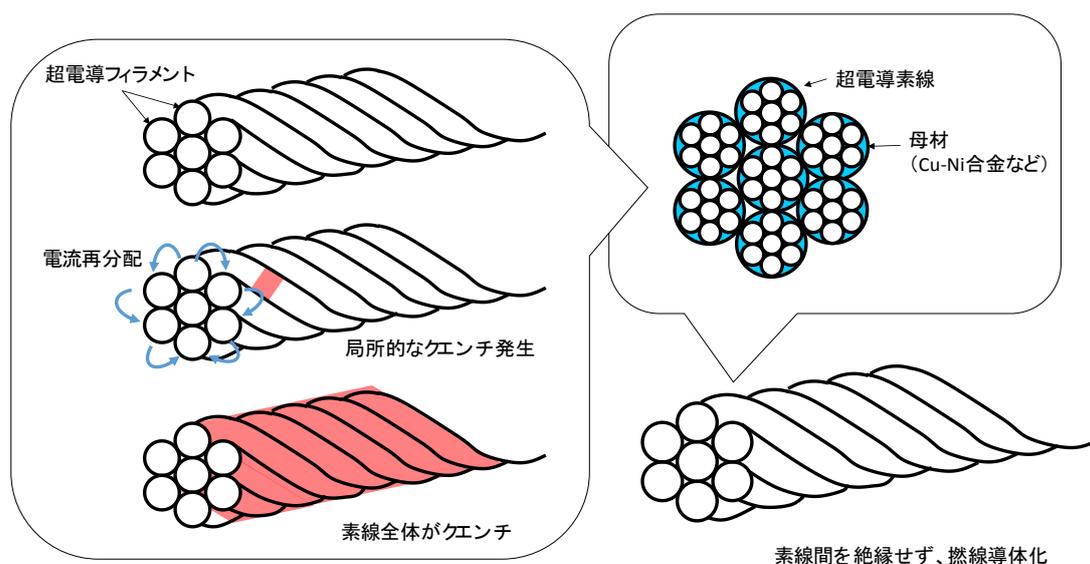


図 1-2. fast quench と導体化

ことで、高い電流密度を持つ低損失な導体を実現できる。高温超電導体の発見により、大容量、高安定、低損失な超電導応用機器の実現が可能となった。

直流およびパルス用超電導マグネットへの適用を想定した場合、一般に、超電導マグネットの中心軸上の点Pにおける磁界は、ビオ・サバルの法則（式（1-1））をコイル断面全体にわたって積分することによって求められ、以下となる（図 1-3）。

$$dH = \frac{1}{4\pi} \frac{Idl \times r}{r^3} \quad (1-1)$$

$$B_x[T] = \frac{\mu_0 NI}{4b(a_2 - a_1)} \left\{ x \ln \frac{a_2 + \sqrt{a_2^2 + x^2}}{a_1 + \sqrt{a_1^2 + x^2}} + (2b - x) \ln \frac{a_2 + \sqrt{a_2^2 + x^2}}{a_1 + \sqrt{a_1^2 + x^2}} \right\} \quad (1-2)$$

ここで、 $\mu_0$ は真空の透磁率、 $N$ は総巻数、 $I$ は電流値である。すなわち、マグネット内の磁界は、巻線する導体の電流値と巻数の積に比例するため、磁界を設計するだけであれば、電流値と巻数の設定には自由度がある。

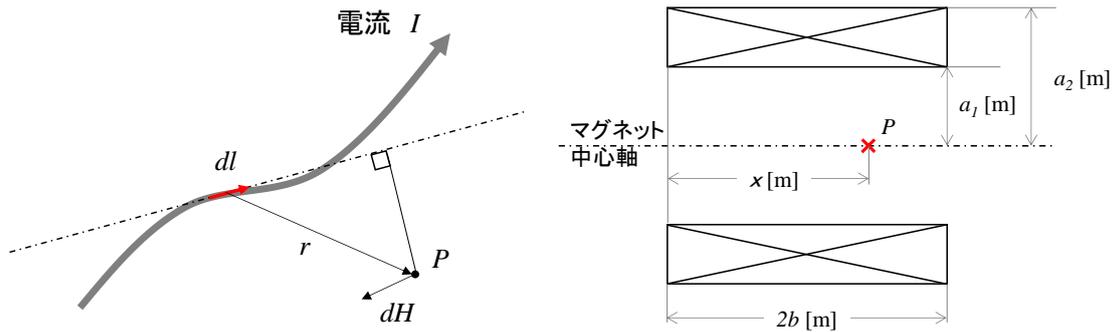


図 1-3. ビオ・サバルの法則（右）とコイルの中心軸上の磁界（左）

超電導マグネット動作中は、その内部に  $E = \frac{1}{2} LI_{op}^2$  の磁気エネルギーが蓄えられる。ここで、 $L$ はコイルのインダクタンス、 $I_{op}$ は超電導マグネットの動作電流である。マグネット内部に局所的な温度上昇や絶縁破壊などによるクエンチが発生した場合、この磁気エネルギーからコイルを保護する必要があり、多くの超電導マグネットは図 1-4 に示すような保護回路を構成している。超電導マグネット内にホットスポット等によるクエンチが発生すると、それを検出し、スイッチ  $S$  を開放する。それにより、超電導マグネット内に蓄積された磁気エネルギーの大部分をマグネット端子間に接続した保護抵抗に散逸させることで超電導マグネットを保護する。すなわち、マグネット内の電流が保護抵抗に流れることで大部分のエネルギーが消費され、マグネット内のホットスポットは短い時間のみ加熱されることになる。そのため、マグネット内の電流減衰率が速いほど、ホットスポットの温度上昇は抑制でき、マグネットを構成する素線の焼損を抑制することができる。

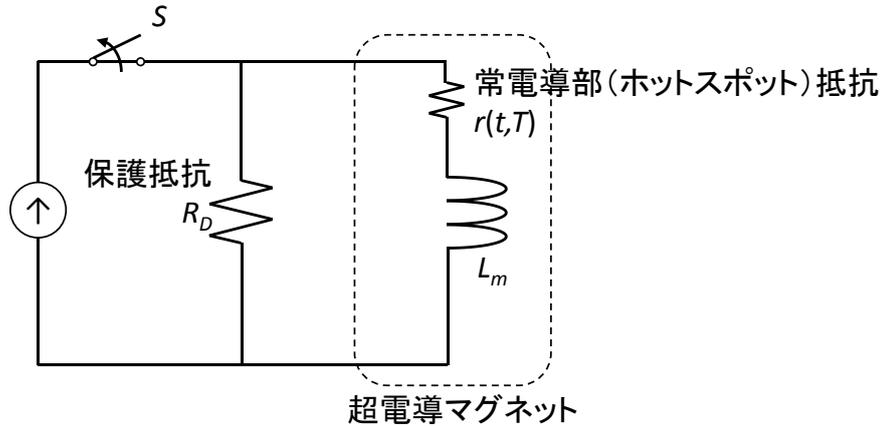


図 1-4. 超電導マグネット保護回路の例

クエンチを検出し、スイッチが開放した場合、回路方程式より、以下の関係が成り立つ。

$$L_m \frac{dI(t)}{dt} + [r(t, T) + R_D]I(t) = 0 \quad (1-3)$$

ここで、 $R_D$  は保護抵抗、 $r(t, T)$  はクエンチ発生時のマグネットの常電導部（ホットスポット）の抵抗、 $L_m$  はマグネットのインダクタンスである。超電導マグネットと保護抵抗に流れる電流  $I(t)$  は、 $r(t, T) \ll R_D$  とすると、

$$I(t) = I_{op} \exp\left(-\frac{R_D t}{L_m}\right) \quad (1-4)$$

と表すことができる。よって、マグネット内に流れる電流の減衰時定数は、

$$\tau = \frac{L_m}{R_D} \quad (1-5)$$

となる。つまり、保護抵抗の値が大きいほど、マグネットのインダクタンスが小さいほど、電流は早く減衰し、ホットスポットの焼損を防ぐことができる。インダクタンスの計算式は諸説あるが<sup>17)</sup>、例えば、長岡の近似式によると、以下のとおりである。

$$L_m = K \frac{\mu_0 \pi a^2 N^2}{b} \quad (1-6)$$

ここで、 $a$  はコイルの平均半径、 $b$  はコイル長、 $N$  は巻数、 $K$  はコイル形状で定まる長岡係数である。すなわち、インダクタンスは巻数の二乗に比例するため、電流減衰時定数も巻数の二乗に比例することになる。

以上より、絶縁耐力の観点から端子間の電圧が特定の値以下に制限される中、クエンチ検出後に蓄積エネルギーを外部抵抗によって回収するためには、巻数が少ない、すなわち電流容量が大きいほど電流減衰時定数が短くなり、ホットスポットの温度上昇が抑制され、超電導マグネットの保護が可能となる。一方で、数 MVA 以上の容量を有する交流電気機器は、電圧階級にもよるが、定格電流が kA 以上となることから、単一の高温超電導線材では対応

が困難であり、多数本を導体化する必要がある。

典型的な低温超電導線材は円断面の多芯線であり、一般的には大電流容量化のために撚線導体を構成する。しかしながら、高温超電導線材である Bi 系や Y 系超電導線材は、長手方向に結晶を配向させるために扁平なテープ状に加工されている<sup>18)</sup>こと（図 1-5）から撚線導体は構成できず、大容量化のためには図 1-6 のように絶縁された高温超電導線材を多層に重ね、並列導体を構成する。しかし、単純に積層した並列導体では、通電電流による自己磁界の影響により、構成する各線材の電流容量が低下し、結果、導体としての電流容量を低下させる。また、外部磁界が印加されると素線間に鎖交する磁界により、遮蔽電流が誘起され、各素線の電流分流が不均一になるとともに、並列導体構成に伴う付加的な交流損失が発生する（図 1-7(a)）。この付加的な交流損失を抑制するためには、素線間に印加される磁界の鎖交面積を等しくし、遮蔽電流が誘起しないように素線の位置を入れ替える転位を適切な位置で施す必要がある（図 1-7(b)）。このことは各素線間のインダクタンスをバランスすることと同義である。超電導状態においては、交流通電時は抵抗成分が無視できるため、各素線の電流分流は素線間の自己及び相互インダクタンスのみから決定される。各素線に流れる電流は、輸送電流と遮蔽電流の和であり、遮蔽電流は周回電流であるためインダクタンスのバランスをとる（磁界の鎖交面積を等しくする）ことで、誘起しない。その結果として、素線間の電流分流を均一にし、輸送電流のみを流すことができ、低損失な大電流導体を実現できる。

転位並列導体は、従来の常電導電気機器の銅巻線で常套手段として使用されており、電線メーカーの工場において、絶縁された素線を数十 cm のピッチで連続的に転位し、出荷されている。しかしながら、高温超電導線材は歪みの影響を受けやすく、転位によって超電導特性が劣化する可能性がある。したがって、我々は、超電導転位並列導体において、巻線工程で転位することで転位ピッチを長くすることを提案した。導体内の電流分流を均一にするためには、導体を構成する素線間のインダクタンスをバランスさせることが重要である。インダクタンスがアンバランスであれば、輸送電流が均一に流れず、また、素線間で鎖交磁束が異なるため、遮蔽電流が誘起され、並列導体を構成することによる付加的な交流損失が発生する。

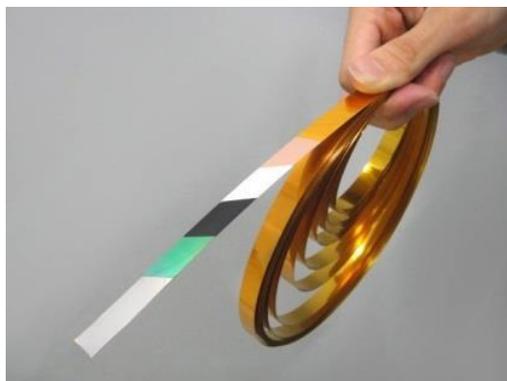


図 1-5. Y 系超電導線材の外観（(株) フジクラ HP より）

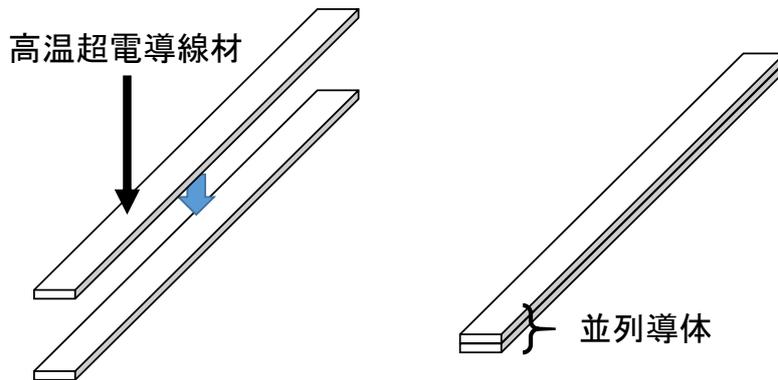
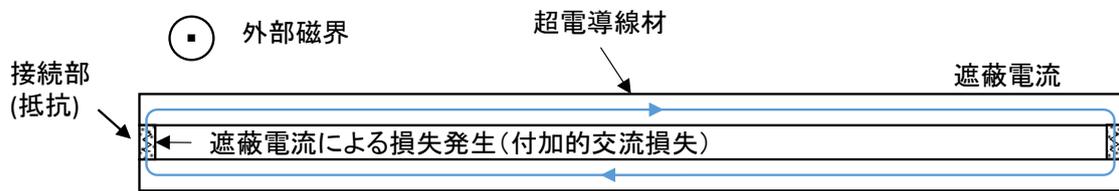
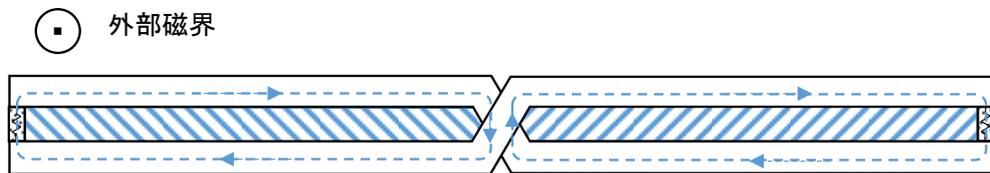


図 1-6. 並列導体



(a) 並列導体に生じる遮蔽電流



磁界の鎖交面積が等しければ、遮蔽電流は誘起されない



(b) 転位並列導体に生じる遮蔽電流

図 1-7. 並列導体に外部磁界を印加した場合の遮蔽電流

### 1.3 本研究の目的

高温超電導体を高磁場マグネットや交流電気機器へ応用するためには大電流容量化が必要不可欠であり、そのためには複数本の高温超電導線材を束ねて導体化する。扁平なテープ状である高温超電導線材を積層した場合、素線間のインダクタンスをバランスさせなければ遮蔽電流による付加的な交流損失が発生するため、素線の位置を入れ換える転位を施す必要がある。高温超電導線材への歪みの影響を懸念し、巻線に適用する場合は導体長も長くなることから、巻線工程で適切な箇所転位することで転位ピッチを長くすることを提

案している。この転位は、遮蔽電流が誘起されないよう、素線間のインダクタンスをバランスしなければならない。

これまでの研究では、断片的に転位方法を示し、試作巻線により、電流分流特性や交流損失特性の検証を目的としてきた<sup>19)20)21)22)</sup>。しかしながら、高温超電導導体の大電流容量化の手段として、交流損失の増大を生じない転位並列導体の導入を促進するためには、基本的な転位パターンを明らかにし、任意の巻線形状に対応する技術を確立する必要がある。本研究では、基本的な転位パターンを示すことを目的とし、無限ソレノイドコイル近似により最適転位パターンを導出し、さらに高温超電導線材の寸法を考慮した数値解析によりその妥当性を確認、実際の巻線に対する適用性を検証した。

#### 1.4 本論文の構成

本論文は、高温超電導転位並列導体を適用して巻線を構成するにあたり、電流分流を均一にし、導体構成に伴う損失増加を抑制するための最適転位パターンについて考察したものであり、以下の5章で構成されている。

第1章では、本論文の研究の背景および目的について述べ、本研究の意義を示した。

第2章では、円筒巻線を対象とし、層間のみで転位を行う層間転位の基本的転位パターンについて考察している。まず、無限ソレノイドコイル近似を用いて巻線端部での磁界の乱れを無視して、素線間の自己及び相互インダクタンスを表記し、電流分流の解析式を導出した。そのうえで、電流分流の層数依存性を明示し、最適転位パターンを提示した。しかし、層間転位では、最適転位を実現するために層数に制約があるため、任意の層数を持つソレノイドコイルについても、層内転位を導入することで均一な電流分流を実現する最適転位パターンを提示した。

第3章では、無限ソレノイドコイル近似により導出した最適転位パターンについて、現在開発されている高温超電導線材の寸法を参照することで有限長のソレノイドコイルとし、自己および相互インダクタンスを算出、回路方程式により素線間の電流分流比を求め、無限ソレノイドコイル近似により導出した最適転位パターンの妥当性を検証している。さらに、実際の超電導コイルの電流分流特性や交流損失特性の観測結果から、提示した最適転位パターンの有用性、および、並列導体構成に伴う付加的な交流損失が発生しないことも確認している。

第4章では、高温超電導線材を用いた転位並列導体において、転位によりインダクタンスがバランスしているにも関わらず、臨界電流値や通電特性の傾き  $n$  値が素線間でばらつく場合には、素線間の電流分流が低周波領域で均等にならず、この電流分流の不均一性が磁場均一性に影響することを実用上の課題として明示し、その対策について検討している。具体的な対策としては、各素線間の接触抵抗を調整することで解決できることを示している。

第5章では、本研究で得られた成果を総括し、本論文の結論とした。

参考文献

- 1) Rudolf de Bruyn Ouboter : Heike Kamerlingh Onnes's Discovery of Superconductivity, Scientific American, pp.98-103, March 1997
- 2) B.T.Matthias, T.H.Geballe, S.Geller and E.Corenzwit : Superconductivity of Nb<sub>3</sub>Sn, Phys. Rev. 95(1954)1435
- 3) J.R.Garaler: Superconductivity in Nb-Ge film above 22K, Appl. Phys. Lett. 23(1973) 480
- 4) J.G. Bednorz and K.A. Muller : Possible High T<sub>c</sub> Superconductivity in the Ba-La-Cu-O System, Z. Phys. B –Condensed Matter 64,489-193 (1986)
- 5) S. Uchida, H. Takagi, K. Kitazawa, S. Tanaka: High T<sub>c</sub> Superconductivity of La- Ba-Co Oxides, Jpn. J. Appl. Phys. 26(1987) L1
- 6) H. Takagi, S. Uchida, K. Kitazawa, S. Tanaka: High T<sub>c</sub> Superconductivity of La- Ba-Co Oxides. II. –Specification of the Superconducting Phase, Jpn. J. Appl. Phys. 26(1987) L123
- 7) M.K. Wu, J.R.Ashburn, C.J.Torng, P.H.Hor, R.L.Meng, R.L.Meng, L.Gao, Z.J.Huang, Y.Q.Qang, C.W.Chu: Superconductivity at 93 K in a new mixed-phase Y-Ba-Cu-O compound system at ambient pressure, Phys. Rev. Lett. 58(1987) 908
- 8) H.Maeda, Y.Tanaka, M.Fukutomi, T.Asano: A New High-Tc Oxide Superconductor without a Rare Earth Element, Jpn. J. Appl. Phys. 27(1988) L209
- 9) Z.Z.Sheng, A.M.Hermann: Bulk superconductivity at 120 K in the Tl–Ca/Ba–Cu–O system, Nature 332(1988) 138
- 10) S.S.P.Parkin, V.Y.Lee, E.M.Engler, A.I.Nazzal, T.C.Huang, G.Gorman, R.Savoy, R.Beyers: Bulk Superconductivity at 125 K in Tl<sub>2</sub>Ca<sub>2</sub>Ba<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>x</sub>, Phys. Rev. Lett. 60 (1988)2539
- 11) 外務省 : パリ協定、 <https://www.mofa.go.jp/mofaj/files/000197312.pdf>
- 12) 内閣府: エネルギー・環境イノベーション戦略、<http://www8.cao.go.jp/cstp/nesti/honbun.pdf>、平成 28 年 4 月 19 日
- 13) 秦広 : 鉄道車両用超電導主変圧器の軽量化の意義、2000 年秋季低温工学
- 14) 上條弘貴、秦広、藤本浩之、坊野敬昭、井上亮二、伊賀吾朗、岩熊成卓、船木和夫 : 鉄道車両用 4MVA 高温超電導主変圧器の設計、静止器 超電導応用電力機器 リニアドライブ合同研究会、2003/1/30
- 15) Iwakuma M, Kanetaka H, Tasaki K, Funaki K, Takeo M, Yamafuji K 1990 Abnormal quench process with very fast elongation of normal zone in multi-strand superconducting cables *Cryogenics* vol.30 p686-692.
- 16) 理科年表 国立天文台編 平成 30 年 第 91 冊
- 17) 柁川一弘、海保勝之 : 矩形断面円筒形コイル用自己インダクタンス計算式の適用範囲について、低温工学, Vol. 30, No. 7 (1995.7) pp. 324-332.
- 18) 和泉輝郎、塩原融 : 高温超電導線材開発の現状と展望、日本マリンエンジニアリング学会誌、第 37 巻、第 5 号、2002-5

- 19) M. Iwakuma et al., "Electromagnetic Properties in Parallel Conductors Composed of Bi2223 Multifilamentary Wires for Power Transformer Windings," IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 7, No. 2, pp. 298-301, 1997.
- 20) M. Iwakuma et al., "Development of a 1T Cryocooler-Cooled Pulse Coil with a Bi2223 Superconducting Parallel Conductor for SMES," IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 9, No. 2, pp. 928-931, 1999.
- 21) M. Iwakuma et al., "Current Distribution in Superconducting Parallel Conductors Wound into Pancake Coils," IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 10, No. 1, pp. 861-864, 2000.
- 22) M. Iwakuma et al., "Development of REBCO Superconducting Power Transformers in Japan, Physica C, Vol. 469, No. 15-20, pp. 1726-1732, 2009.

## 第2章 無限ソレノイドコイル近似による最適転位パターンの提示

高温超電導体を超電導マグネットや交流電気機器へ適用するには、超電導導体の大電流容量化が必要であり、そのために絶縁された高温超電導線材を複数枚積層して並列導体を構成する。単に積層しただけでは、素線間のインダクタンスがバランスせず、電流分流の不均一性が生じ、見かけの電流容量が低下する。加えて、誘起される遮蔽電流により付加的な交流損失が発生する。そのため、素線間のインダクタンスをバランスさせるため、素線の位置を入れ替える転位を行う必要がある。素線間のインダクタンスがバランスするように転位することで、素線間に鎖交する磁束がバランスし、遮蔽電流を誘起することなく交流損失の増加を抑制できる。特に、高温超電導線材は歪みの影響を受けやすいため、巻線へ適用する際には、転位ピッチを長くし、巻線工程において、素線間のインダクタンスをバランスし得る最低限の転位を施すことが望ましい。そこで本章では、円筒巻線を対象とし、無限ソレノイドコイル近似を用いて巻線端部での磁界乱れを無視し、素線間の自己及び相互インダクタンスを表記、電流分流の解析式を導出することで、最適転位パターンを提示する。

### 2.1 最適転位パターンの導出手順

図 2-1 に転位を施した巻線の模式図を示す。(a)は層を移動する際に転位を施したもの（以下、層間転位）であり、(b)は層内で転位するもの（以下、層内転位）である。巻線工程で転位を施す際、素線を配置換えするため、転位箇所において余分にスペースが必要となり、その箇所で磁場乱れが生じる可能性が高い。層間転位は層内の大半を密に巻くことが可能となるため、巻乱れが少なく、一様な磁場を実現しやすいが、層内転位は層内で転位スペースを必要とするため、転位箇所が磁場均一性に影響を及ぼす可能性が高い。よって、磁場の

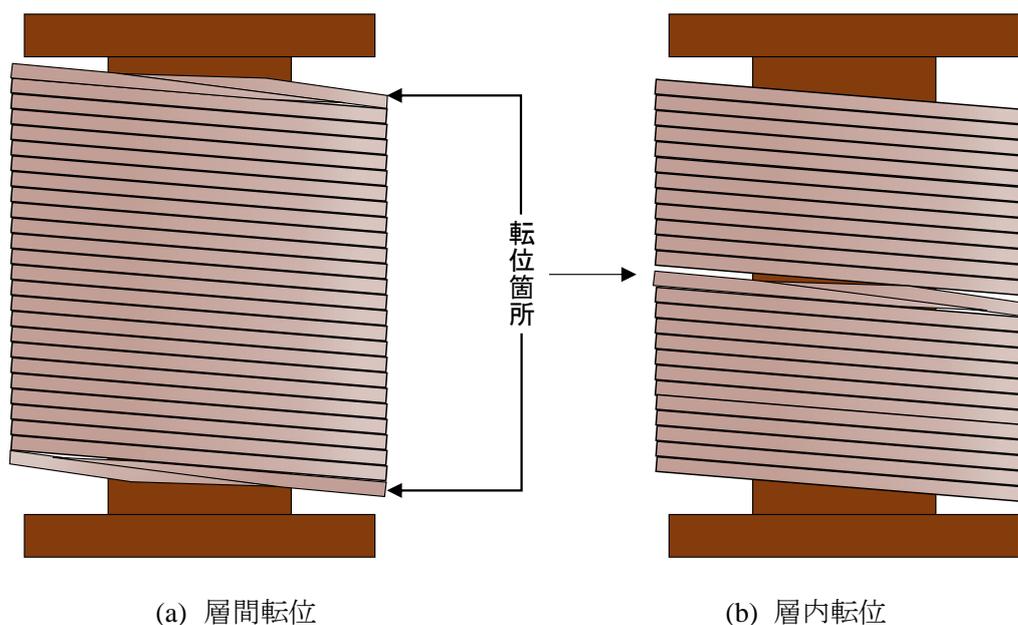


図 2-1. 転位を施した巻線の模式図

均一性が問題にならない場合は層内転位が適用できるが、超電導マグネットなど磁場均一性が重要である場合には層内転位は適用できない。従って、可能な限り層間で転位し、層内転位を少なくすることが望ましい。

素線数を2本とした転位並列導体で構成する巻線および等価回路を図2-2に示す。層数を8とし、層を渡る際に転位を施したものである。ここでは無限ソレノイドコイル近似とし、各層をインダクタンス要素とした。要素数は16となり、回路方程式は、以下のとおりである。

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ \vdots \\ v_{16} \end{bmatrix} = j\omega \begin{bmatrix} m_{11} & \cdots & m_{161} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ m_{116} & \cdots & m_{1616} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ \vdots \\ i_{16} \end{bmatrix} \quad (2-1)$$

ここで、 $v_n, i_n$  は要素毎の電圧および電流、 $m_{ij}$  は要素間の相互インダクタンスであり、特に  $i=j$  の時は自己インダクタンスである。同じ素線は層毎で直列接続であることから、

$$v_i = \sum_{j=1}^n m_{ij} \frac{di_j}{dt} \quad (i = 1, \dots, n) \quad (2-2)$$

$$V_N = \sum v_{iN} \quad (2-3)$$

$$I_N = i_{iN} \quad (2-4)$$

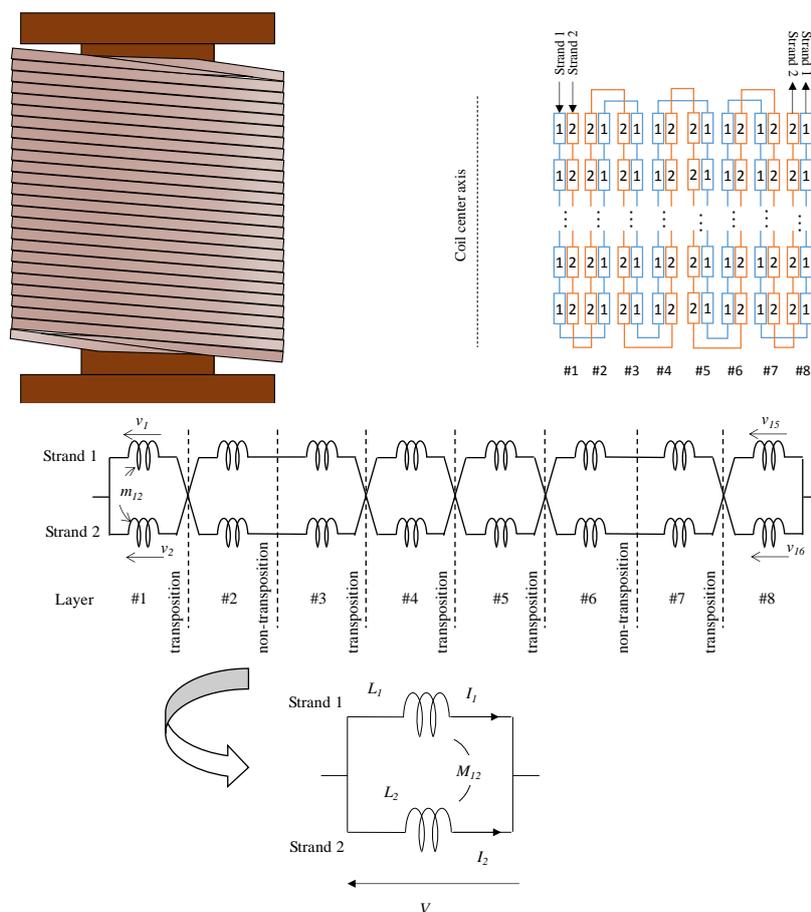


図2-2. 2本並列導体で構成する巻線と等価回路

となる。つまり、式(2-1)を素線毎にまとめると、以下となる。

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = j\omega \begin{bmatrix} L_1 & M_{12} \\ M_{21} & L_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (2-5)$$

各素線は並列接続されていることから、 $V=V_1=V_2$  であるため、各素線に流れる電流分流は、インダクタンス行列の逆行列を解くことで簡単に求めることができる。

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{j\omega} \begin{bmatrix} L_1 & M_{12} \\ M_{21} & L_2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V \\ V \end{bmatrix} \quad (2-6)$$

次に、図 2-3 に示す巻線において、 $i$  層のインダクタンスを求める。断面積が一樣な巻線内部の一樣磁界の強さは、ビオ・サバルの法則から、次式で与えられる。

$$B = n_i I_i \mu_0 \quad (2-7)$$

ここで、 $n_i$  は単位長さあたりの巻数[turns/m]、 $I_i$  は  $i$  層の電流値である。よって、

$$\Phi = \int B \cdot ds = r_i^2 \pi \mu_0 n_i I_i \quad (2-8)$$

の磁束がコイルと鎖交していることから、単位長さあたりの自己インダクタンスは、コイルの巻き数が  $n_i$  であることを考慮して、

$$L = r_i^2 \pi \mu_0 n_i^2 \quad (2-9)$$

となる。同様に、 $i$  層と  $j$  層の相互インダクタンスは、 $r_i < r_j$  のとき、鎖交磁束は、

$$\Phi_{ij} = \int B \cdot ds = r_i^2 \pi \mu_0 n_j I \quad (2-10)$$

であることから、

$$M_{ij} = r_i^2 \pi \mu_0 n_i n_j \quad (2-11)$$

で計算することができる。なお、簡略化のため、図 2-4 のように層内転位により軸方向の位置関係がある場合でも図 2-3 と同等と考え、お互いに一樣磁界が鎖交するものとした。

式(2-9)および式(2-11)によると、 $n_i=n_j$  とした場合、インダクタンス行列は磁界の鎖交面積にのみ比例することがわかる。つまり、素線の転位によりインダクタンスをバランスすることは、磁界の鎖交面積をバランスすることと同義であることから、これにより遮蔽電流は誘起せず、並列導体構成による付加的な交流損失は発生しない、

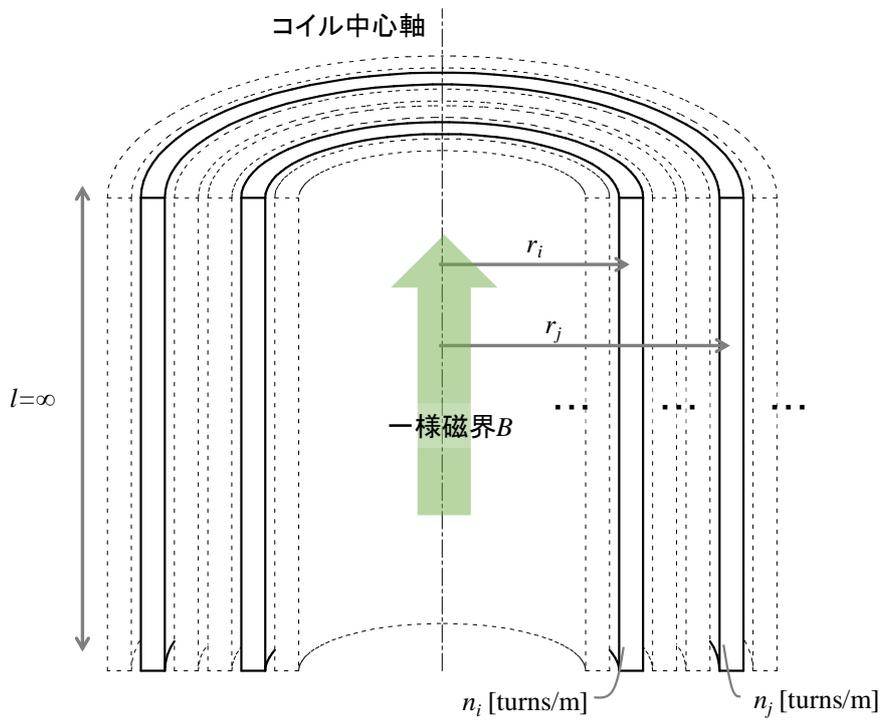


図 2-3. 無限ソレノイドコイル近似による各層のインダクタンス計算

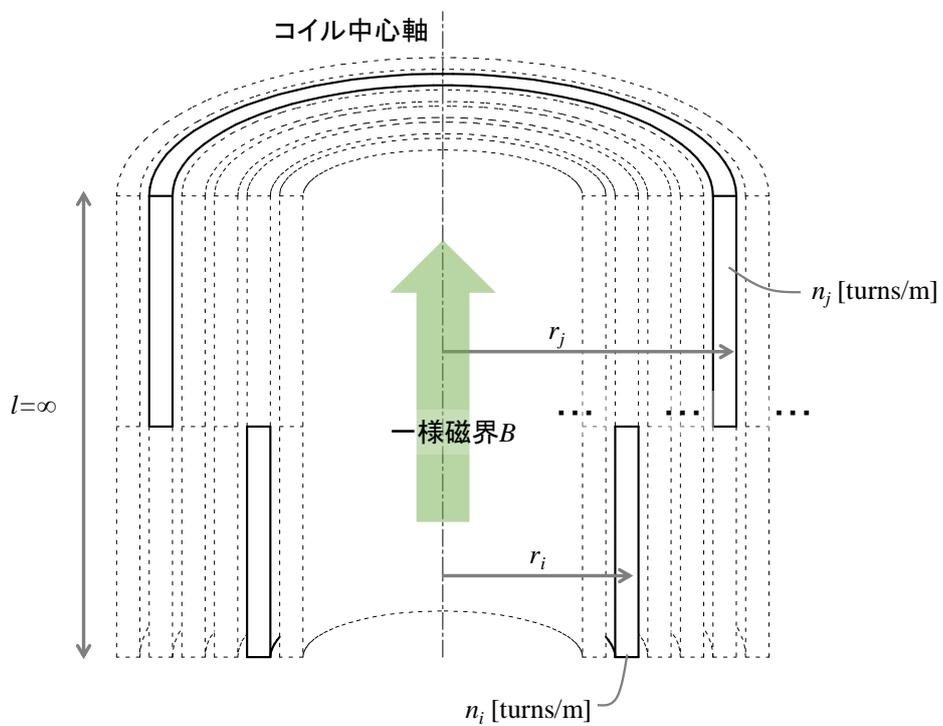


図 2-4. 層内転位により軸方向の位置関係が生じた場合

## 2.2 最適層間転位パターン

層間のみで転位する層間転位パターンについて提示する。なお、インダクタンスの計算のため、図 2-5 のとおり変数を定義する。最内導体の中心半径を  $r$ 、線材の厚みを  $2t$ 、層間の導体中心距離を  $s$  とした。

インダクタンスは磁界の鎖交面積に比例し、磁界の鎖交面積は層のループ面積であることから、コイル内径や素線の厚み、層間のスペーサによる素線の中心半径により決定される。1 層あたりの自己インダクタンスは、式(2-9)より簡単に計算すること

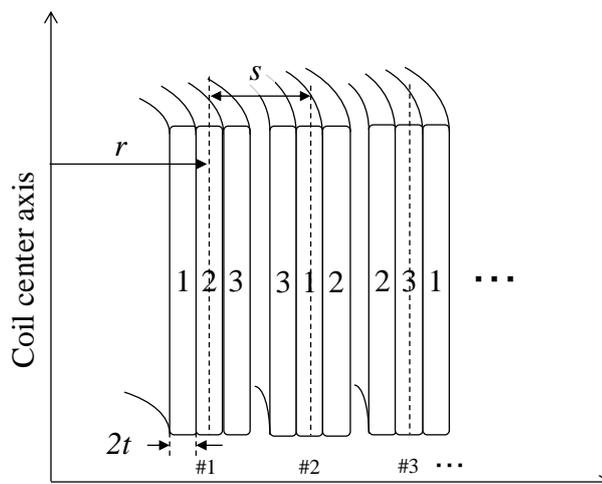


図 2-5. 計算に用いた変数

ができるが、素線あたりの自己インダクタンスは、同じ素線が割り当てられた各層の自己インダクタンスに層間の相互インダクタンスを加えたものとなる。層間の相互インダクタンスは、式(2-11)に示すように内側の層のループ面積により決定される。異なる素線間の相互インダクタンスは、それぞれの素線が割り当てられた層の相互インダクタンスを積算したものとなる。層間のみで素線間のインダクタンスをバランスする最適転位パターンを以下に示す。素線数を  $N$ 、層数を  $L$  とする。

### ① $1 \leq L \leq N$ の場合

次の層に移るときに、最も外側の素線を最も内側に移し、それ以外の素線をそのまま外側にずらす。

### ② $N+1 \leq L \leq 2N$ の場合

$N$  層と  $N+1$  層の間を境として、素線の配置が層毎に対象となるように転位を施す。例えば、 $N+1$  層であれば  $N$  層と、 $N+2$  層であれば  $N-1$  層と同じとなるように転位を施す。

### ③ $2N+1 \leq L \leq 4N$ の場合

$2N$  層と  $2N+1$  層の間を軸として素線の順番が対称となるように転位を施す。

### ④ $4N+1 \leq L$ の場合

① から繰り返す。

転位回数は、4 倍の層数において、 $(4N-3)$  回となる。各素線数における転位図を図 2-6~2-10 に、各素線数の各層における電流分流比の計算結果を表 2-1~2-4 に示す。いずれの場合においても、素線数の 4 倍の層数において各素線の磁界の鎖交面積をバランスさせることが

できるため、変数によらず電流分流が均一となることを示した。

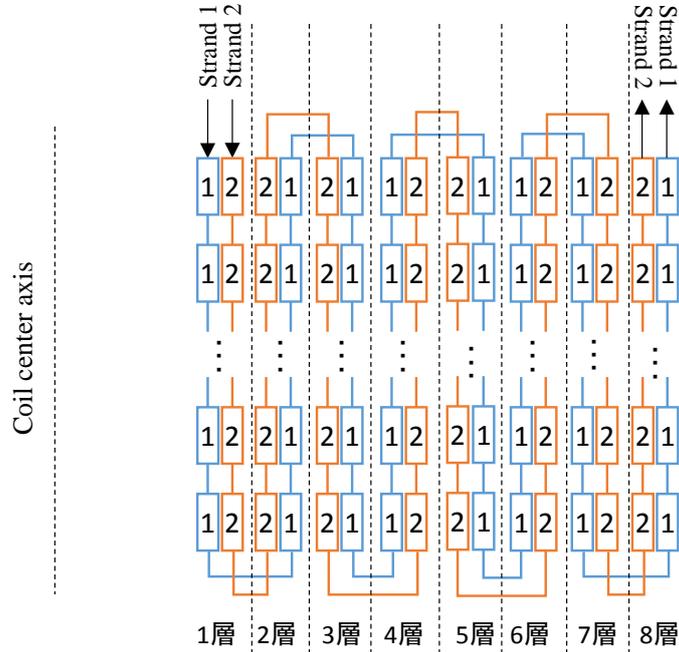


図 2-6. 2 本並列導体の最適層間転位パターン

表 2-1. 最適層間転位パターンの各層における電流分流比計算結果 (2 本並列導体)

層数	$I_1$	$I_2$
1	1	0
2	$\frac{2r}{s+2r}$	$\frac{s}{s+2r}$
3	$\frac{-s+2r}{3(s+r)}$	$\frac{4s+r}{3(s+r)}$
4	$\frac{-s+2r}{6s+4r}$	$\frac{7s+2r}{6s+4r}$
5	$\frac{-s+2r}{5(2s+r)}$	$\frac{11s+3r}{5(2s+r)}$
6	$\frac{2r}{15s+6r}$	$\frac{15s+4r}{15s+6r}$
7	$\frac{7s+3r}{7(3s+r)}$	$\frac{2(7s+2r)}{7(3s+r)}$
8	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$

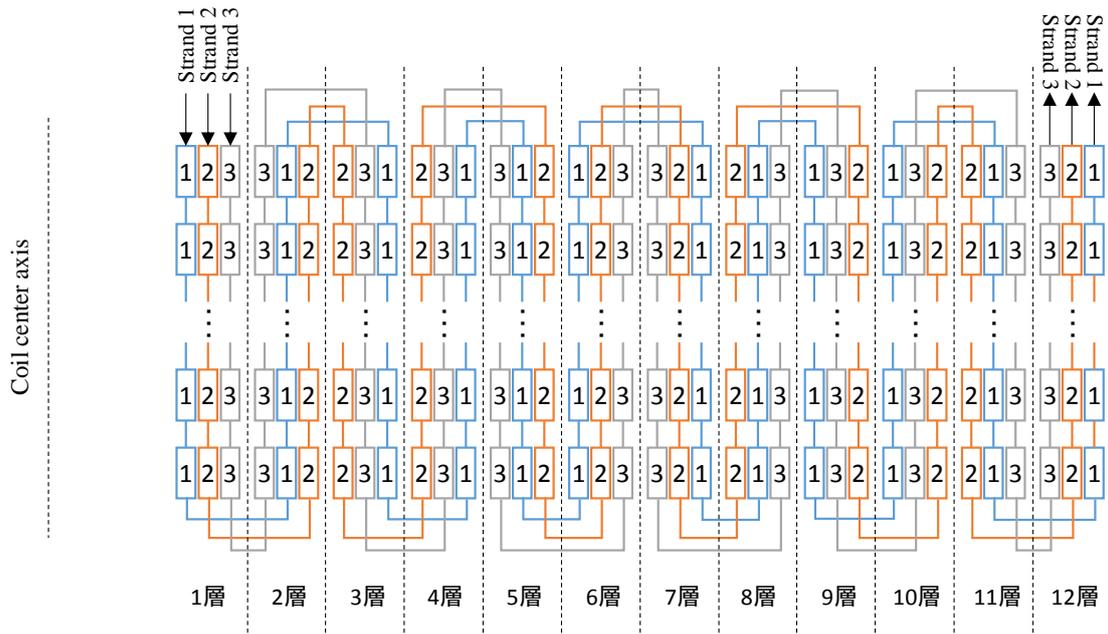


図 2-7. 3 本並列導体の最適層間転位パターン

表 2-2. 最適層間転位パターンの各層における電流分流比計算結果 (3 本並列導体)

層数	$I_1$	$I_2$	$I_3$
1	1	0	0
2	$\frac{8r^2 + 6rs - 2st}{5r^2 + 5rs + s^2 - st - t^2}$	$-\frac{2(r-t)(r+s-t)}{5r^2 + 5rs + s^2 - st - t^2}$	$\frac{-r^2 + s^2 + r(s-4t) - st + t^2}{5r^2 + 5rs + s^2 - st - t^2}$
3	$\frac{2(8r^2 + 7rs + s(-2s+t))}{12r^2 + 24rs + 11s^2}$	$-\frac{-2r^2 + 3r(s+2t) + s(s+5t)}{12r^2 + 24rs + 11s^2}$	$\frac{-2r^2 + 7rs + 14s^2 - 6rt - 7st}{12r^2 + 24rs + 11s^2}$
4	$\frac{19r^2 + 6rs - 31s^2 - 2rt + 10st - t^2}{21r^2 + 61rs + 41s^2 + st - t^2}$	$\frac{5r^2 + 22s^2 + 8st + t^2 + 6r(6s+t)}{21r^2 + 61rs + 41s^2 + st - t^2}$	$-\frac{3r^2 - 19rs - 50s^2 + 4rt + 17st + t^2}{21r^2 + 61rs + 41s^2 + st - t^2}$
5	$\frac{4(4r^2 - 12rs + s(-45s+4t))}{33r^2 + 130rs + 125s^2 - t^2}$	$\frac{2(6r^2 + 43rs + 55s^2 + 2rt - 5st)}{33r^2 + 130rs + 125s^2 - t^2}$	$\frac{5r^2 + 92rs + 195s^2 - 4rt - 6st - t^2}{33r^2 + 130rs + 125s^2 - t^2}$
6	$\frac{2r - 13s}{6r + 15s}$	$\frac{2r + 11s}{6r + 15s}$	$\frac{2r + 17s}{6r + 15s}$
7	$\frac{4(4r^2 - 20rs + s(-89s+4t))}{65r^2 + 388rs + 576s^2 - t^2}$	$\frac{2(10r^2 + 87rs + 176s^2 + 2rt - 5st)}{65r^2 + 388rs + 576s^2 - t^2}$	$\frac{29r^2 + 294rs + 580s^2 - 4rt - 6st - t^2}{65r^2 + 388rs + 576s^2 - t^2}$
8	$\frac{3r^2 - 244rs - 922s^2 + 2rt + 32st - t^2}{85r^2 + 593rs + 1031s^2 + st - t^2}$	$\frac{37r^2 + 891s^2 + 30st + t^2 + 10r(37s+t)}{85r^2 + 593rs + 1031s^2 + st - t^2}$	$\frac{45r^2 + 467rs + 1062s^2 - 12rt - 61st - t^2}{85r^2 + 593rs + 1031s^2 + st - t^2}$
9	$-\frac{2s(135r + 541s - t)}{108r^2 + 864rs + 1727s^2}$	$\frac{54r^2 + 549rs + 1310s^2 + 18rt + 71st}{108r^2 + 864rs + 1727s^2}$	$\frac{54r^2 + 585rs + 1499s^2 - 18rt - 73st}{108r^2 + 864rs + 1727s^2}$
10	$\frac{16r^2 - 46s(11s+t) - 2r(21s+4t)}{133r^2 + 1193rs + 2663s^2 - st - t^2}$	$\frac{54r^2 + 530rs + 1232s^2 + 20rt + 90st - 2t^2}{133r^2 + 1193rs + 2663s^2 - st - t^2}$	$\frac{63r^2 + 705rs + 1937s^2 - 12rt - 45st + t^2}{133r^2 + 1193rs + 2663s^2 - st - t^2}$
11	$\frac{41r^2 + 330rs + 605s^2 - 8rt - 44st - t^2}{161r^2 + 1606rs + 3993s^2 - t^2}$	$\frac{4(2r + 11s)(7r + 33s + t)}{161r^2 + 1606rs + 3993s^2 - t^2}$	$\frac{16(2r + 11s)^2}{161r^2 + 1606rs + 3993s^2 - t^2}$
12	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$

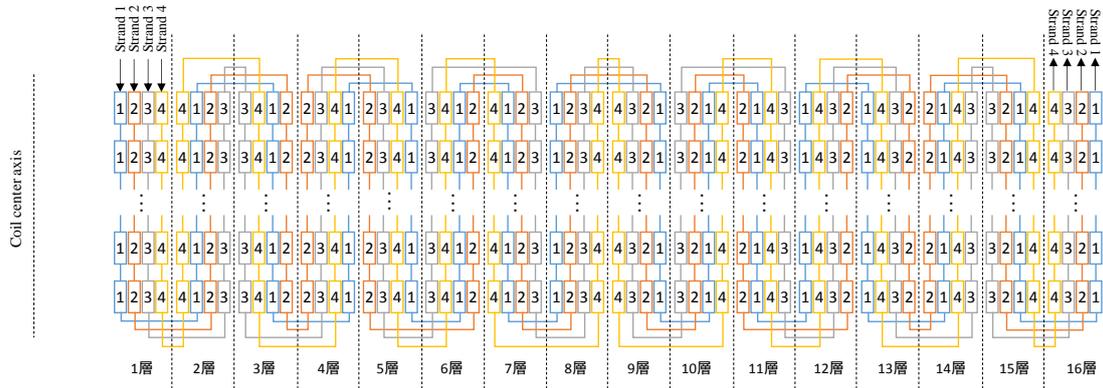


図 2-8. 4 本並列導体の最適層間転位パターン

表 2-3. 最適層間転位パターンの各層における電流分流比計算結果

(4 本並列導体、その 1)

層数	$I_1$	$I_2$
	$I_3$	$I_4$
1	1	0
	0	0
2	$\frac{20r^3 - 4st(s+2t) + r^2(26s+4t) + 4r(2s^2 - st - 6t^2)}{(2r+s)(6r^2 + 6rs + s^2 - 2st - 8t^2)}$	$\frac{4(r+s-2t)t(s+2t)}{(2r+s)(6r^2 + 6rs + s^2 - 2st - 8t^2)}$
	$-\frac{2r(2r^2 + 3r(s-2t) + (s-2t)^2)}{(2r+s)(6r^2 + 6rs + s^2 - 2st - 8t^2)}$	$-\frac{4r^3 + s^3 - 2s^2t + 16t^3 - 2r^2(s+8t) + 2r(s^2 - 6st + 4t^2)}{(2r+s)(6r^2 + 6rs + s^2 - 2st - 8t^2)}$
3	$\frac{112r^3 + 12st(-5s+t) + r^2(278s+6t) + r(165s^2 - 60st + 4t^2)}{(r+s)(49r^2 + 98rs + 39s^2 - 24st - 20t^2)}$	$\frac{-35r^3 + r^2(-110s+78t) - 2r(43s^2 - 87st + 28t^2) - 2s(6s^2 - 45st + 32t^2)}{(r+s)(49r^2 + 98rs + 39s^2 - 24st - 20t^2)}$
	$-\frac{14r^3 - 3s^3 + 12s^2t + 8st^2 - 16t^3 - 10r^2(2s+t) + r(-8s^2 + 10st + 28t^2)}{(r+s)(49r^2 + 98rs + 39s^2 - 24st - 20t^2)}$	$-\frac{14r^3 + 54s^3 - 66s^2t + 24st^2 + 16t^3 - r^2(s+74t) + 2r(33s^2 - 74st + 2t^2)}{(r+s)(49r^2 + 98rs + 39s^2 - 24st - 20t^2)}$
4	$\frac{224r^3 + 624r^2s + 254rs^2 - 243s^3 + 96rst + 144s^2t}{128r^3 + 576r^2s + 824rs^2 + 372s^3}$	$-\frac{32r^3 - 64r^2(s-2t) + 10rs(-7s+32t) + 3s^2(-15s+64t)}{4(32r^3 + 144r^2s + 206rs^2 + 93s^3)}$
	$-\frac{32r^3 - 16r^2s + 3s^2(35s+16t) + 2rs(83s+16t)}{4(32r^3 + 144r^2s + 206rs^2 + 93s^3)}$	$-\frac{32r^3 + 2rs(237s - 224t) + 3s^2(185s - 128t) + 32r^2(s - 4t)}{4(32r^3 + 144r^2s + 206rs^2 + 93s^3)}$
5	$\frac{297r^3 + r^2(698s - 46t) + s(-1703s^2 + 756st - 88t^2) + r(-686s^2 + 364st - 40t^2)}{243r^3 + 1404r^2s + r(2582s^2 + 40st - 28t^2) + 4s(379s^2 + 20st - 12t^2)}$	$\frac{54r^3 + r^2(541s + 154t) + 3s(125s^2 + 92st + 24t^2) + r(936s^2 + 426st + 44t^2)}{243r^3 + 1404r^2s + r(2582s^2 + 40st - 28t^2) + 4s(379s^2 + 20st - 12t^2)}$
	$-\frac{54r^3 + 745s^3 + 282s^2t - 48st^2 - 16t^3 + r^2(39s + 42t) + r(807s^2 + 142st - 28t^2)}{243r^3 + 1404r^2s + r(2582s^2 + 40st - 28t^2) + 4s(379s^2 + 20st - 12t^2)}$	$-\frac{54r^3 + 2099s^3 + 6r^2(21s - 25t) - 1234s^2t + 16st^2 + 16t^3 + r(1525s^2 - 892st - 4t^2)}{243r^3 + 1404r^2s + r(2582s^2 + 40st - 28t^2) + 4s(379s^2 + 20st - 12t^2)}$
6	$\frac{332r^3 + r^2(54s - 88t) + r(-6026s^2 + 498st - 8t^2) - 2s(4801s^2 - 929st + 28t^2)}{420r^3 + 3054r^2s + s(5461s^2 + 86st - 120t^2) + 4r(1799s^2 + 7st - 12t^2)}$	$\frac{2(60r^3 + 1905s^3 - 40s^2t - 22st^2 - 8t^3 + r^2(702s + 80t) + 2r(1072s^2 + 53st - 8t^2))}{420r^3 + 3054r^2s + s(5461s^2 + 86st - 120t^2) + 4r(1799s^2 + 7st - 12t^2)}$
	$\frac{2(26r^3 + r^2(647s + 20t) + r(2480s^2 + 295st + 4t^2) + s(2165s^2 + 588st + 24t^2))}{420r^3 + 3054r^2s + s(5461s^2 + 86st - 120t^2) + 4r(1799s^2 + 7st - 12t^2)}$	$-\frac{84r^3 + 6923s^3 + 2r^2(151s - 56t) - 2868s^2t - 68st^2 + 16t^3 + 2r(1987s^2 - 636st - 8t^2)}{420r^3 + 3054r^2s + s(5461s^2 + 86st - 120t^2) + 4r(1799s^2 + 7st - 12t^2)}$
7	$\frac{270r^3 + r^2(-2283s + 28t) + 7s^2(-5733s + 538t) + 2rs(-11312s + 627t)}{675r^3 + 5985r^2s + 17493rs^2 + 16807s^3 - 44rt^2 - 140st^2}$	$\frac{2(90r^3 + 9r^2(131s + 2t) + r(4466s^2 - 211st - 4t^2) + s(5145s^2 - 819st + 34t^2))}{675r^3 + 5985r^2s + 17493rs^2 + 16807s^3 - 44rt^2 - 140st^2}$
	$\frac{2(90r^3 + 3r^2(513s + 14t) + s(7889s^2 - 287st - 34t^2) + r(6482s^2 + 73st + 4t^2))}{675r^3 + 5985r^2s + 17493rs^2 + 16807s^3 - 44rt^2 - 140st^2}$	$\frac{45r^3 + 4r^2(708s - 37t) + r(18221s^2 - 978st - 44t^2) + 14s(2205s^2 - 111st - 10t^2)}{675r^3 + 5985r^2s + 17493rs^2 + 16807s^3 - 44rt^2 - 140st^2}$
8	$\frac{2r - 41s}{8r + 28s}$	$\frac{2r + 15s}{8r + 28s}$
	$\frac{2r + 23s}{8r + 28s}$	$\frac{2r + 31s}{8r + 28s}$
9	$\frac{238r^3 + r^2(-4799s + 36t) + 8s^2(-12192s + 647t) + 2rs(-23674s + 751t)}{1445r^3 + 17238r^2s + 68352rs^2 + 90112s^3 - 52rt^2 - 200st^2}$	$\frac{340r^3 + r^2(5326s + 28t) + r(26452s^2 - 670st - 8t^2) + 4s(10560s^2 - 762st + 17t^2)}{1445r^3 + 17238r^2s + 68352rs^2 + 90112s^3 - 52rt^2 - 200st^2}$
	$\frac{340r^3 + 2r^2(3343s + 54t) + 4s(16192s^2 + 74st - 17t^2) + r(37556s^2 + 442st + 8t^2)}{1445r^3 + 17238r^2s + 68352rs^2 + 90112s^3 - 52rt^2 - 200st^2}$	$\frac{527r^3 + r^2(10025s - 172t) + 2r(25846s^2 - 637st - 26t^2) + 8s(10080s^2 - 303st - 25t^2)}{1445r^3 + 17238r^2s + 68352rs^2 + 90112s^3 - 52rt^2 - 200st^2}$

表 2-4. 最適層間転位パターンの各層における電流分流比計算結果  
(4本並列導体、その2)

層数	$I_1$	$I_2$
	$I_3$	$I_4$
10	$\frac{-2(38r^3 + 3r^2(2063s + 4t) + s(115471s^2 - 4514st - 32t^2) + r(52914s^2 - 967st - 4t^2))}{1980r^3 + 26570r^2s + s(175711s^2 + 146st - 360t^2) + 4r(29629s^2 + 9st - 20t^2)}$	$\frac{2(220r^3 + 36105s^3 - 400s^2t - 22st^2 - 8t^3 + 2r^2(1855s + 88t) + 2r(10132s^2 + 389st - 8t^2))}{1980r^3 + 26570r^2s + s(175711s^2 + 146st - 360t^2) + 4r(29629s^2 + 9st - 20t^2)}$
	$\frac{2(358r^3 + r^2(6991s + 52t) + s(75935s^2 + 2763st - 36t^2) + r(41221s^2 + 825st - 4t^2))}{1980r^3 + 26570r^2s + s(175711s^2 + 146st - 360t^2) + 4r(29629s^2 + 9st - 20t^2)}$	$\frac{900r^3 + 182573s^3 + 2r^2(8773s - 216t) - 13608s^2t - 308st^2 + 16t^3 + 2r(50687s^2 - 2552st - 24t^2)}{1980r^3 + 26570r^2s + s(175711s^2 + 146st - 360t^2) + 4r(29629s^2 + 9st - 20t^2)}$
11	$\frac{621r^3 + r^2(25605s - 202t) + r(213235s^2 - 4452st + 88t^2) + 2s(251779s^2 - 8733st + 224t^2)}{2645r^3 + 39537r^2s + s(325501s^2 + 440st - 348t^2) + r(196665s^2 + 88st - 68t^2)}$	$\frac{966r^3 + r^2(19133s + 626t) + 2r(62135s^2 + 2755st + 58t^2) + 6s(44055s^2 + 1976st + 102t^2)}{2645r^3 + 39537r^2s + s(325501s^2 + 440st - 348t^2) + r(196665s^2 + 88st - 68t^2)}$
	$\frac{1150r^3 + 266035s^3 + 1722s^2t - 468st^2 - 16t^3 + r^2(22517s + 146t) + r(137039s^2 + 1114st - 84t^2)}{2645r^3 + 39537r^2s + s(325501s^2 + 440st - 348t^2) + r(196665s^2 + 88st - 68t^2)}$	$\frac{1150r^3 + 298694s^3 + r^2(23492s - 974t) - 30604s^2t - 44st^2 + 16t^3 + r(148591s^2 - 10988st - 12t^2)}{2645r^3 + 39537r^2s + s(325501s^2 + 440st - 348t^2) + r(196665s^2 + 88st - 68t^2)}$
12	$\frac{288r^3 + 10512r^2s + s^2(222611s - 528t) + 6rs(14931s - 16t)}{4(288r^3 + 4752r^2s + 26126rs^2 + 47861s^3)}$	$\frac{480r^3 + 32r^2(295s + 12t) + 10rs(5969s + 416t) + s^2(12635s + 11264t)}{4(288r^3 + 4752r^2s + 26126rs^2 + 47861s^3)}$
	$\frac{480r^3 + 9840r^2s + 2rs(32315s + 16t) + s^2(137545s + 176t)}{4(288r^3 + 4752r^2s + 26126rs^2 + 47861s^3)}$	$\frac{480r^3 + s^2(153875s - 11968t) + 2rs(34885s - 2144t) + 128r^2(80s - 3t)}{4(288r^3 + 4752r^2s + 26126rs^2 + 47861s^3)}$
13	$\frac{500r^3 + 10r^2(2330s + 53t) + 3s(203515s^2 + 8410st - 64t^2) + r(223651s^2 + 7436st - 28t^2)}{4375r^3 + 78450r^2s + 467694rs^2 + 927204s^3 - 104rst - 624s^2t - 76rt^2 - 440st^2}$	$\frac{1375r^3 + 5r^2(5179s + 286t) + s(303273s^2 + 51450st - 1144t^2) + r(156077s^2 + 17162st - 200t^2)}{4375r^3 + 78450r^2s + 467694rs^2 + 927204s^3 - 104rst - 624s^2t - 76rt^2 - 440st^2}$
	$\frac{1750r^3 + 583527s^3 + 4392s^2t + 428st^2 - 16t^3 + 10r^2(3721s + 11t) + 6r(42966s^2 + 249st + 14t^2)}{4375r^3 + 78450r^2s + 467694rs^2 + 927204s^3 - 104rst - 624s^2t - 76rt^2 - 440st^2}$	$\frac{1750r^3 + 650949s^3 + 5r^2(7729s - 202t) - 31236s^2t + 84st^2 + 16t^3 + 4r(69368s^2 - 2831st + 3t^2)}{4375r^3 + 78450r^2s + 467694rs^2 + 927204s^3 - 104rst - 624s^2t - 76rt^2 - 440st^2}$
14	$\frac{2(86r^3 - 7r^2(509s + 50t) - r(58095s^2 + 5050st + 52t^2) - 2s(101265s^2 + 9031st + 152t^2))}{5460r^3 + 106022r^2s + s(1468771s^2 - 422st - 728t^2) + 4r(171106s^2 - 15st - 28t^2)}$	$\frac{4(364r^3 + 104415s^3 + 9211s^2t + 90st^2 - 4t^3 + r^2(7238s + 208t) + r(47732s^2 + 2789st + 14t^2))}{5460r^3 + 106022r^2s + s(1468771s^2 - 422st - 728t^2) + 4r(171106s^2 - 15st - 28t^2)}$
	$\frac{2(866r^3 + 3r^2(6031s + 98t) + 2r(62017s^2 + 1900st - 30t^2) + 30s(9285s^2 + 409st - 14t^2))}{5460r^3 + 106022r^2s + s(1468771s^2 - 422st - 728t^2) + 4r(171106s^2 - 15st - 28t^2)}$	$\frac{2100r^3 + 899071s^3 + 10r^2(4801s - 72t) - 25682s^2t + 360st^2 + 16t^3 + r(361618s^2 - 8716st + 56t^2)}{5460r^3 + 106022r^2s + s(1468771s^2 - 422st - 728t^2) + 4r(171106s^2 - 15st - 28t^2)}$
15	$\frac{1147r^3 + r^2(19485s - 616t) + r(101925s^2 - 9060st - 92t^2) + 15s(10125s^2 - 2220st - 44t^2)}{6727r^3 + 140895r^2s + 982125rs^2 + 2278125s^3 - 92rt^2 - 660st^2}$	$\frac{4(2r + 15s)(217r^2 + 10125s^2 + 315st + 2t^2 + 45r(66s + t))}{6727r^3 + 140895r^2s + 982125rs^2 + 2278125s^3 - 92rt^2 - 660st^2}$
	$\frac{4(2r + 15s)(217r^2 + 2970rs + 10125s^2 + 17rt + 135st - 2t^2)}{6727r^3 + 140895r^2s + 982125rs^2 + 2278125s^3 - 92rt^2 - 660st^2}$	$\frac{2(2r + 15s)(527r^2 + 30r(267s + t) + 15s(2025s + 14t))}{6727r^3 + 140895r^2s + 982125rs^2 + 2278125s^3 - 92rt^2 - 660st^2}$
16	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}$
	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}$

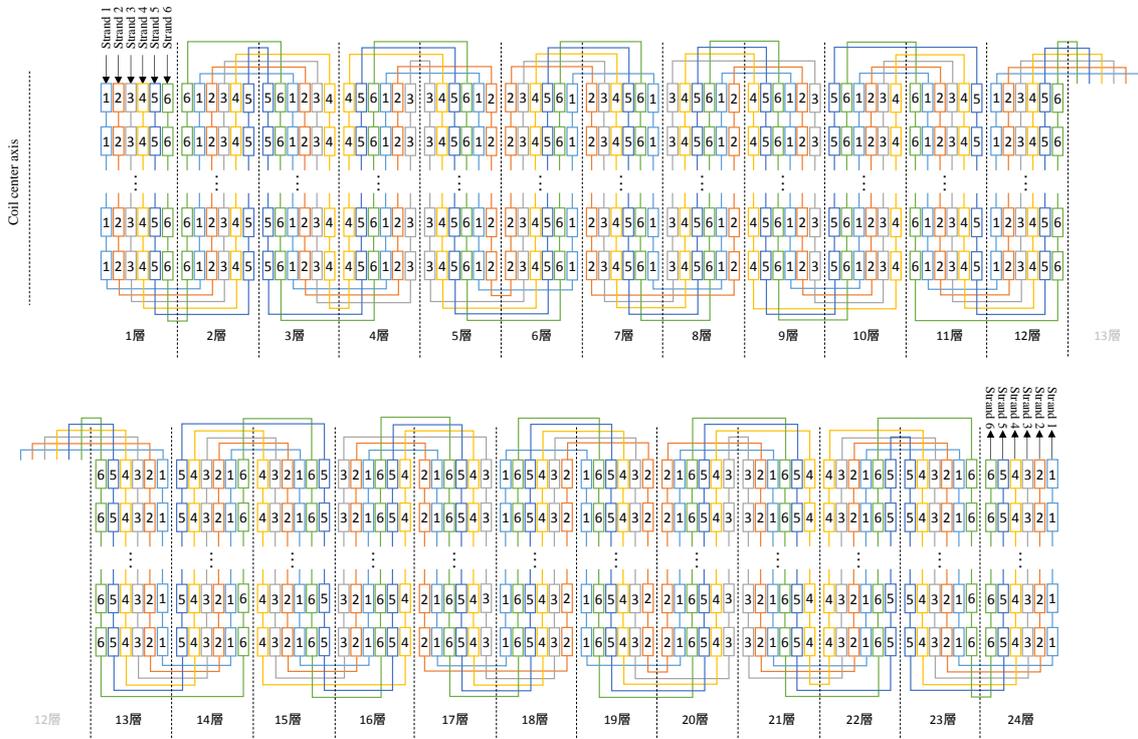


図 2-9. 6本並列導体の最適層間転位パターン

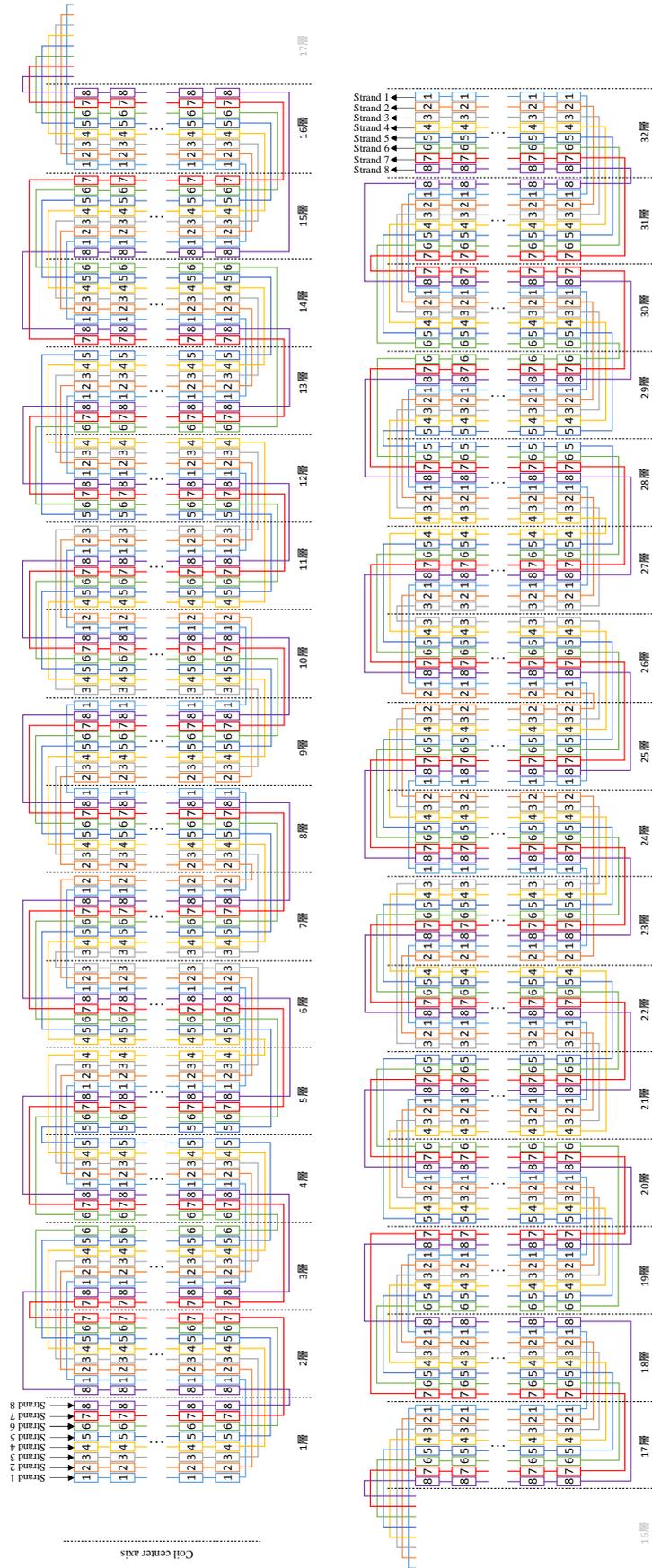


図 2-10. 8 本並列導体の最適層間転位パターン

さらに、表 2-5 に示すパラメータを代入し、各素線数の各層数における電流分流比を計算しグラフ化したものを図 2-11~2-15 に示す。素線数の 4 倍の層数のみではなく、その整数倍の層数において電流分流が均一となる。

表 2-5. 代入パラメータ

素線数	線材厚み	最内導体内径	層間導体距離
	$2t$ [mm]	$r$ [mm]	$s$ [mm]
2	0.18	75.18	1.36
3	0.18	75.27	1.54
4	0.18	75.36	1.72
6	0.18	75.54	2.08
8	0.18	75.72	2.44

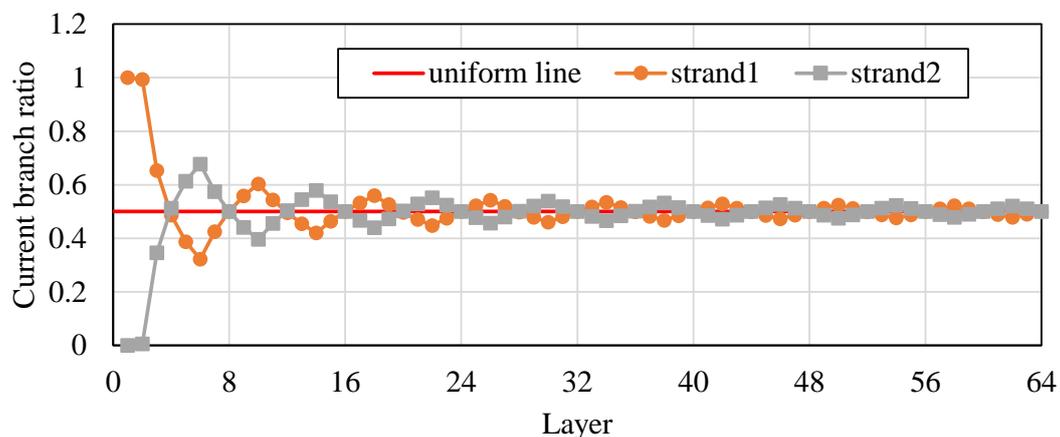


図 2-11. 最適層間転位パターンにおける電流分流比の計算結果 (2 本並列導体)

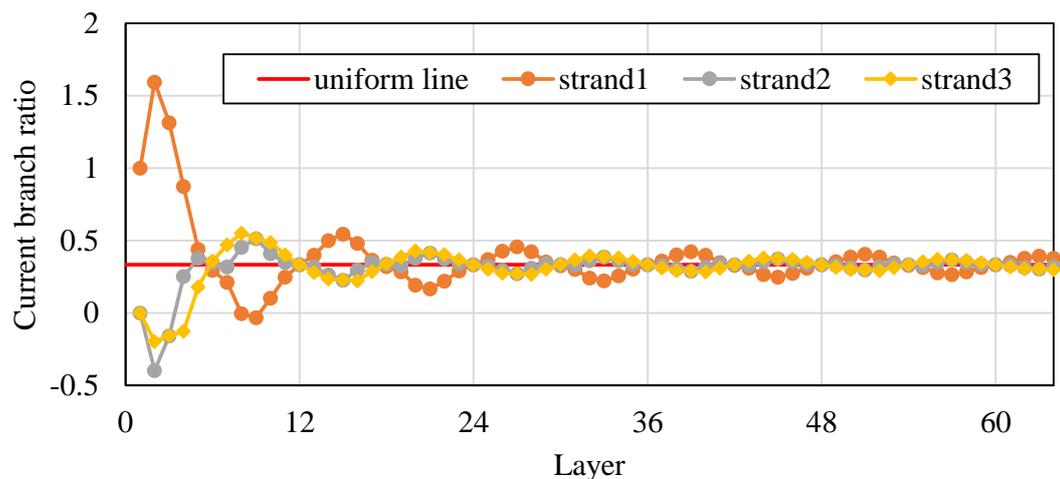


図 2-12. 最適層間転位パターンにおける電流分流比の計算結果 (3 本並列導体)

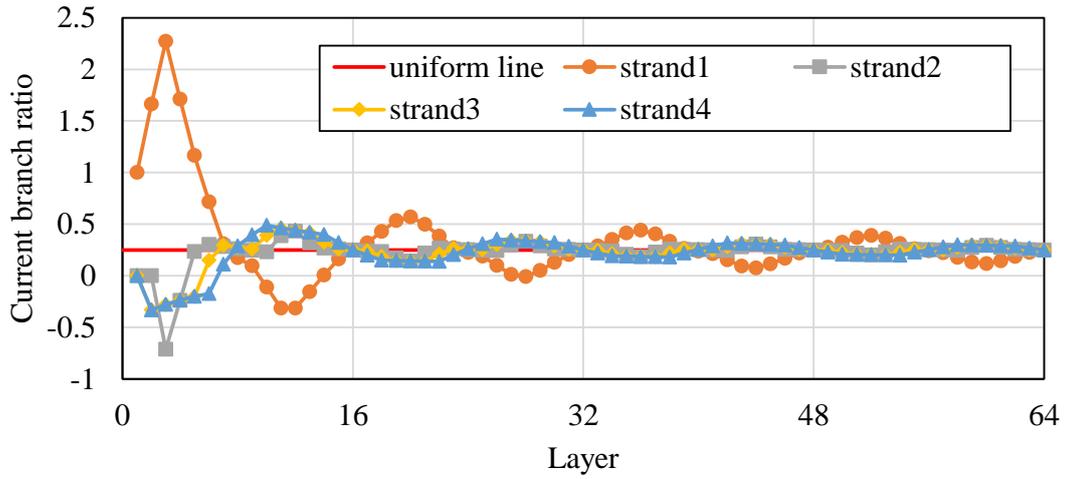


図 2-13. 最適層間転位パターンにおける電流分流比の計算結果 (4 本並列導体)

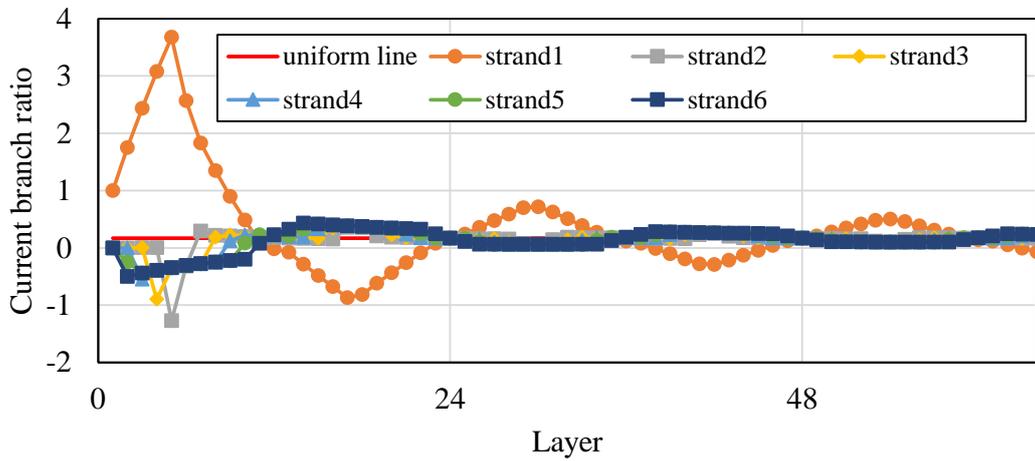


図 2-14. 最適層間転位パターンにおける電流分流比の計算結果 (6 本並列導体)

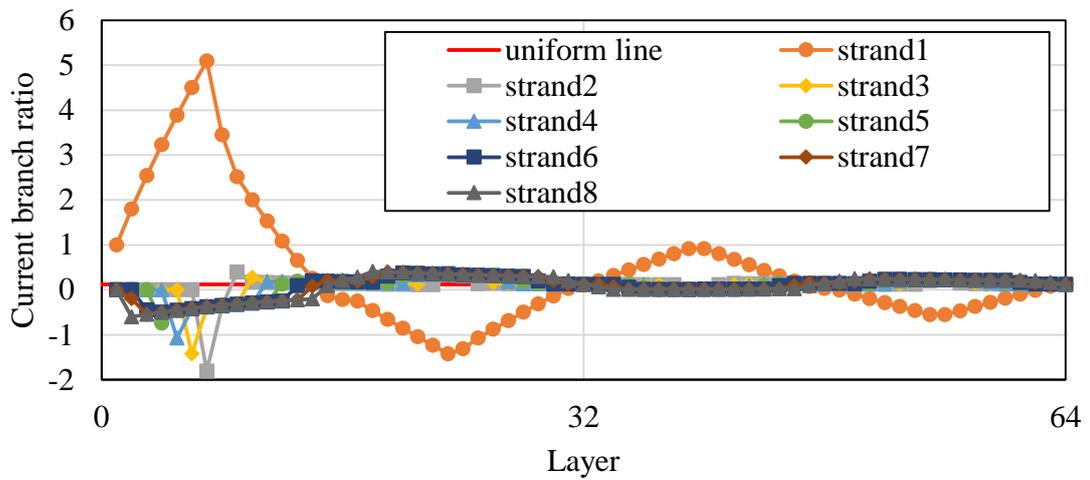


図 2-15. 最適層間転位パターンにおける電流分流比の計算結果 (8 本並列導体)

### 2.3 最適層内転位パターン

最適層間転位パターンにより均一な電流分流が実現できるが、素線数の 4 倍の層数が必要となり制約となる。それ以外の層数においては、層内転位を導入することで均一な電流分流を得る。よってここでは、単層ソレノイドコイルを対象とし、最適層内転位パターンについて提示する。

単層ソレノイドコイルの場合は、以下の手順で層内転位を行う。 $t$  はターン数、 $T$  は総ターン数、 $N$  は素線数である。

①  $1 \leq t \leq T/2$  の場合

$T/(2N)$  ターン毎に外側の素線を内側に転位する。

②  $t = T/2$  の場合

中心部で全ての素線を対称に入れ替える全転位を行う。

③  $T/2 \leq t \leq T$  の場合

$T/(2N)$  ターン毎に外側の素線を内側に転位する。

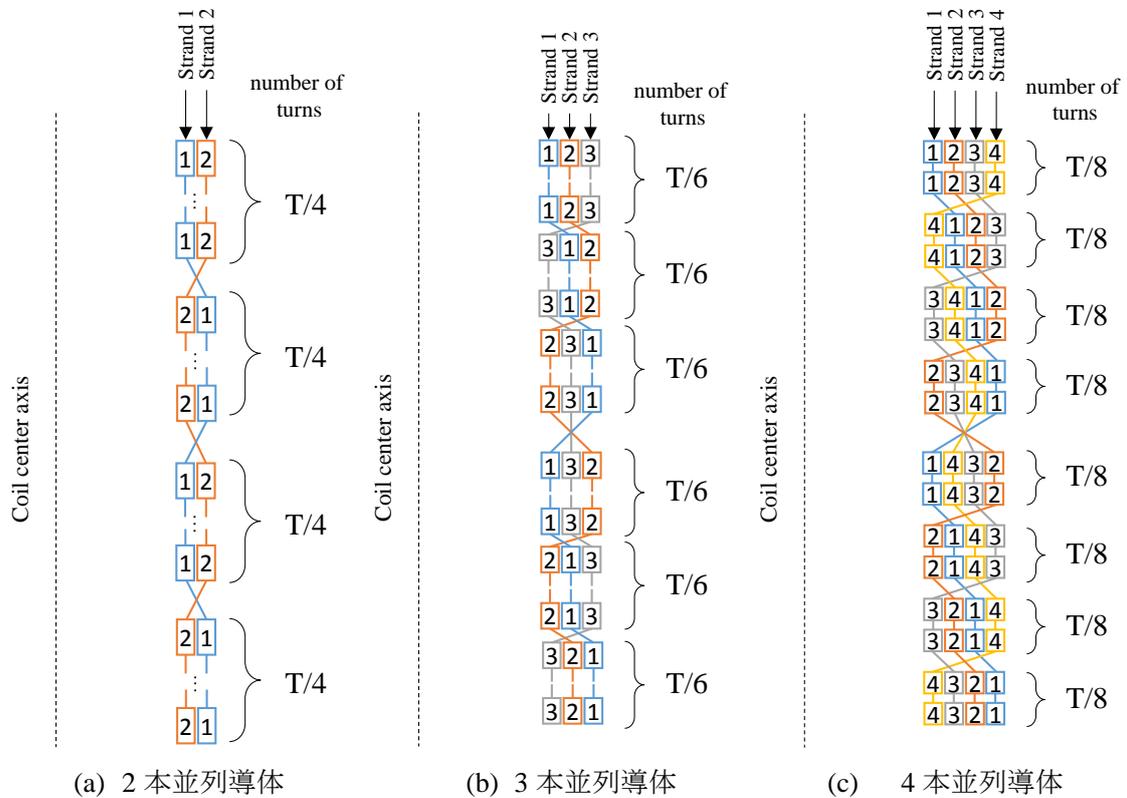
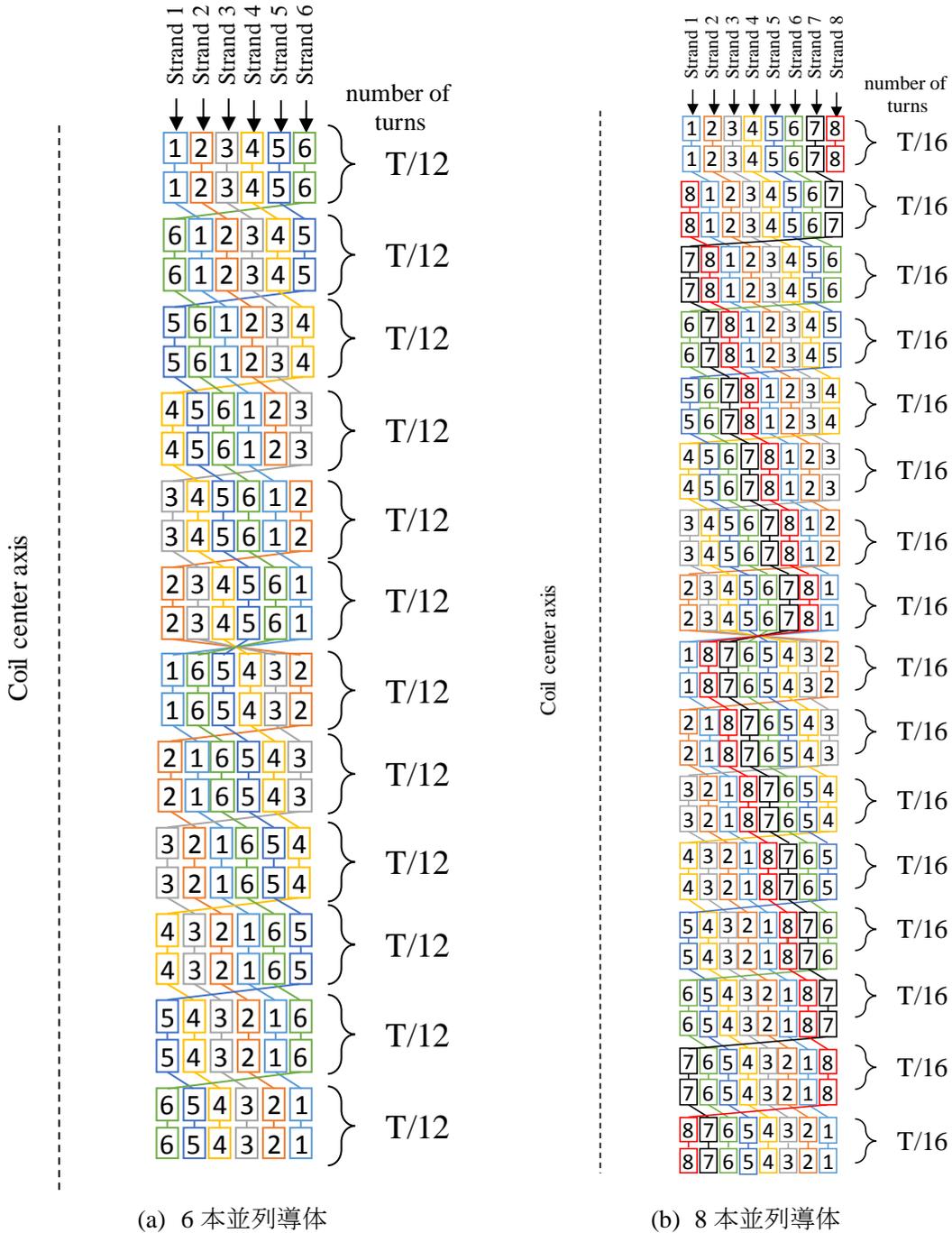


図 2-16. 最適層内転位パターン

各素線数における最適転位パターンを図 2-16 および 2-17 に示す。転位回数は、1 層あたり  $(2N-1)$  回となる。各素線がそれぞれの位置を同じターン数経験することにより、自己インダクタンスを等しくし、コイル中心で全転位することでコイル上下の対称性により相互インダクタンスがバランスする。インダクタンス行列を算出すると、表 2-6 のとおりとなる。各要素が等しくなるため逆行列の計算ができず電流分流比が算出できないが、インダクタンス要素が等しいため、電流分流は等しくなる。



(a) 6 本並列導体

(b) 8 本並列導体

図 2-17. 最適層内転位パターン

表 2-6. 最適層内転位パターンを用いた単層ソレノイドコイルのインダクタンス行列

素線数	インダクタンス行列
2	$4(r^2 - rt + t^2) \times \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$
3	$4(9r^2 - 16rt + 24t^2) \times \begin{bmatrix} 1 & \dots & 1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & \dots & 1 \end{bmatrix}$
4	$32(2r^2 - 5rt + 10t^2) \times \begin{bmatrix} 1 & \dots & 1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & \dots & 1 \end{bmatrix}$
6	$16(9r^2 - 35rt + 105t^2) \times \begin{bmatrix} 1 & \dots & 1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & \dots & 1 \end{bmatrix}$
8	$64(4r^2 - 21rt + 84t^2) \times \begin{bmatrix} 1 & \dots & 1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & \dots & 1 \end{bmatrix}$

素線数が偶数である場合は、転位の際に隣り合う 2 本を 1 つのグループとみなして転位することで転位回数を削減することができる（以下、グループ転位という）。手順を以下に示す。 $T$  は総ターン数、 $N$  は素線数である。

①  $1 \leq t \leq T/2$  の場合

隣り合う 2 つの素線を 1 つのグループとし、 $T/N$  ターン毎に外側のグループを内側に転位する。

②  $t = T/2$  の場合

中心部で全ての素線を対称に入れ替える全転位を行う。

③  $T/2 \leq t \leq T$  の場合

$T/N$  ターン毎に外側のグループを内側に転位する。

通常最適層内転位パターンとグループ転位を用いた最適層内転位パターンの比較を図 2-18~2-20 に示す。転位回数は 1 層あたり  $(N-1)$  回となり、約半分に削減できる。中心の全転位により、グループ内の素線位置が入れ替わることで、各素線がすべての位置を経験するとともに、コイル上下で対象となることでインダクタンスをバランスすることができる。表 2-7 にインダクタンス行列を示す。表 2-6 と同様にすべてのインダクタンス要素が等しくなるため、電流分流比も均一になることが分かった。

表 2-7. グループ転位を用いた単層ソレノイドコイルのインダクタンス行列

素線数	インダクタンス行列 $\left( \times \begin{bmatrix} 1 & \dots & 1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & \dots & 1 \end{bmatrix} \right)$
4	$8(2r^2 - 5rt + 10t^2)$
6	$4(9r^2 - 35rt + 105t^2)$
8	$16(4r^2 - 21rt + 84t^2)$

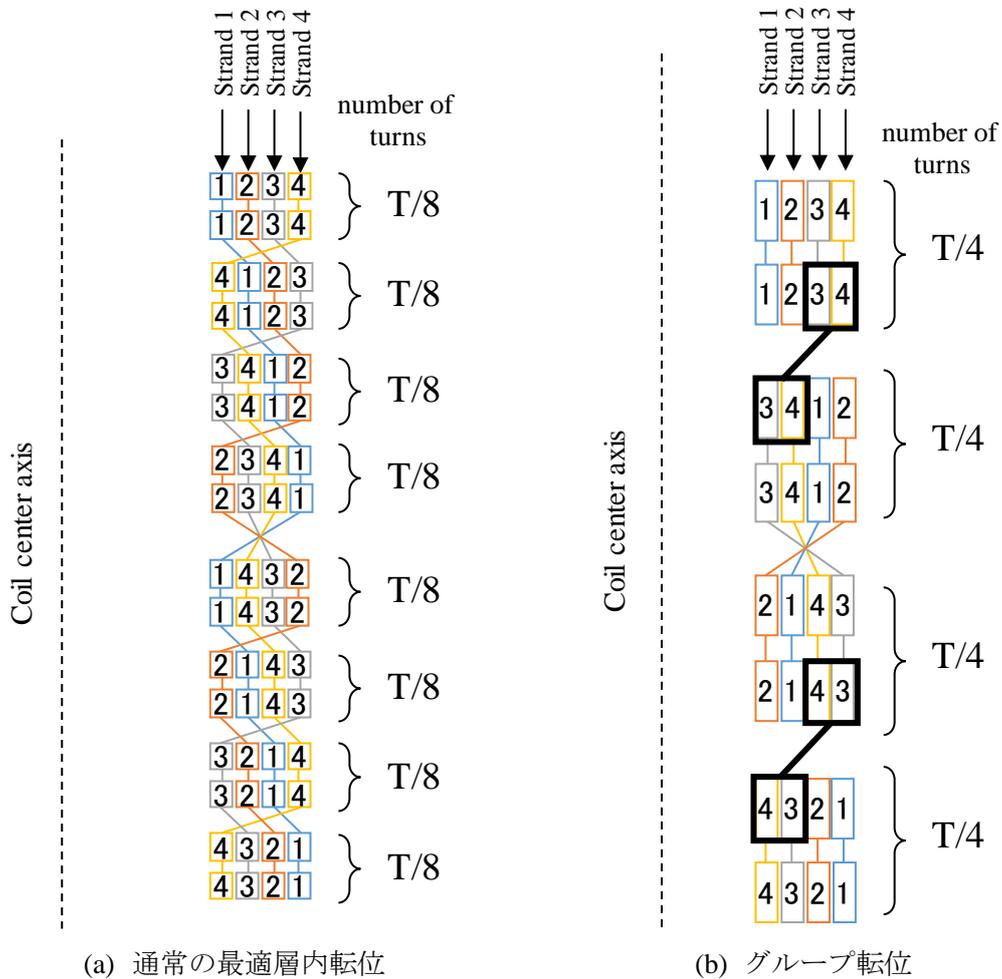
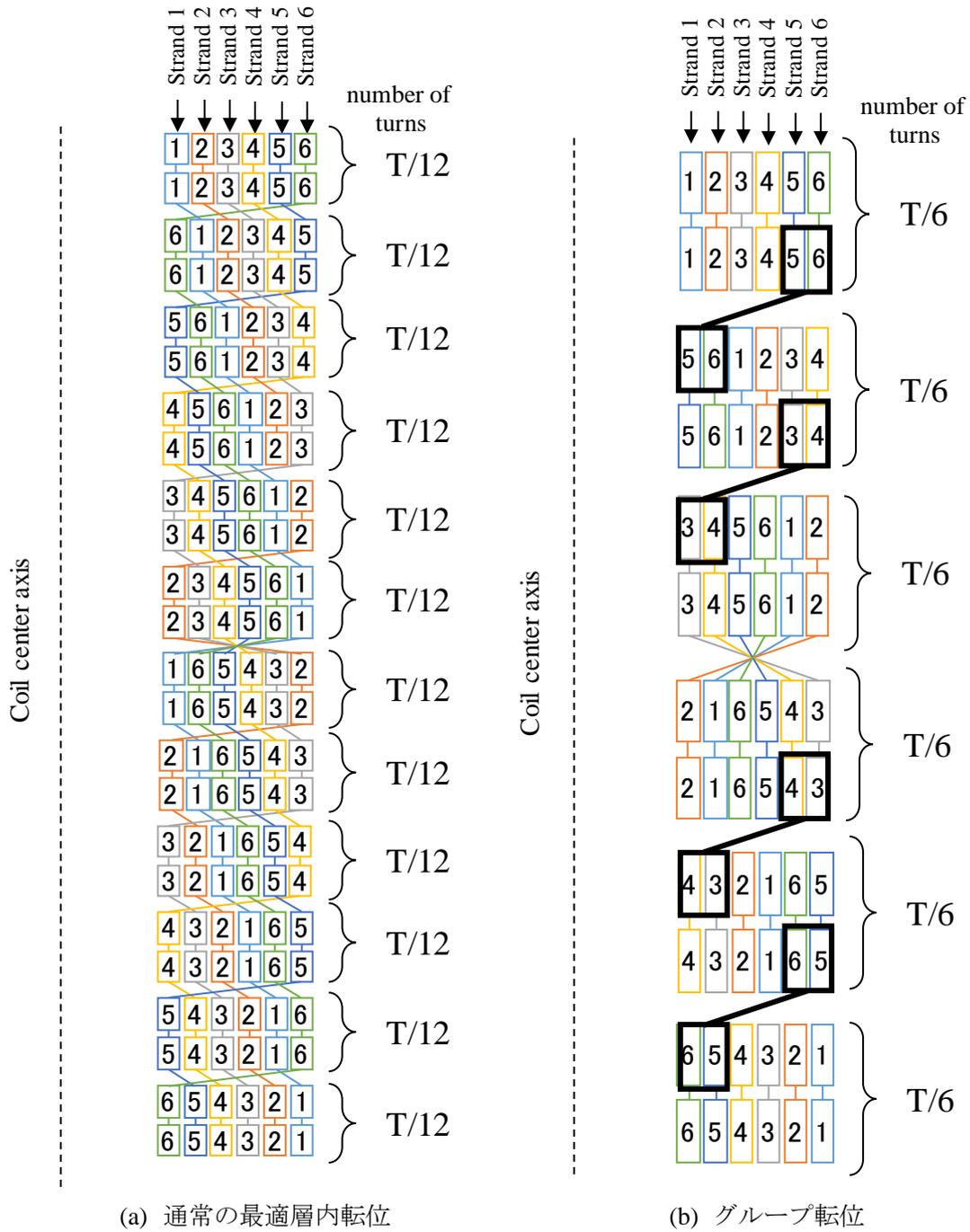
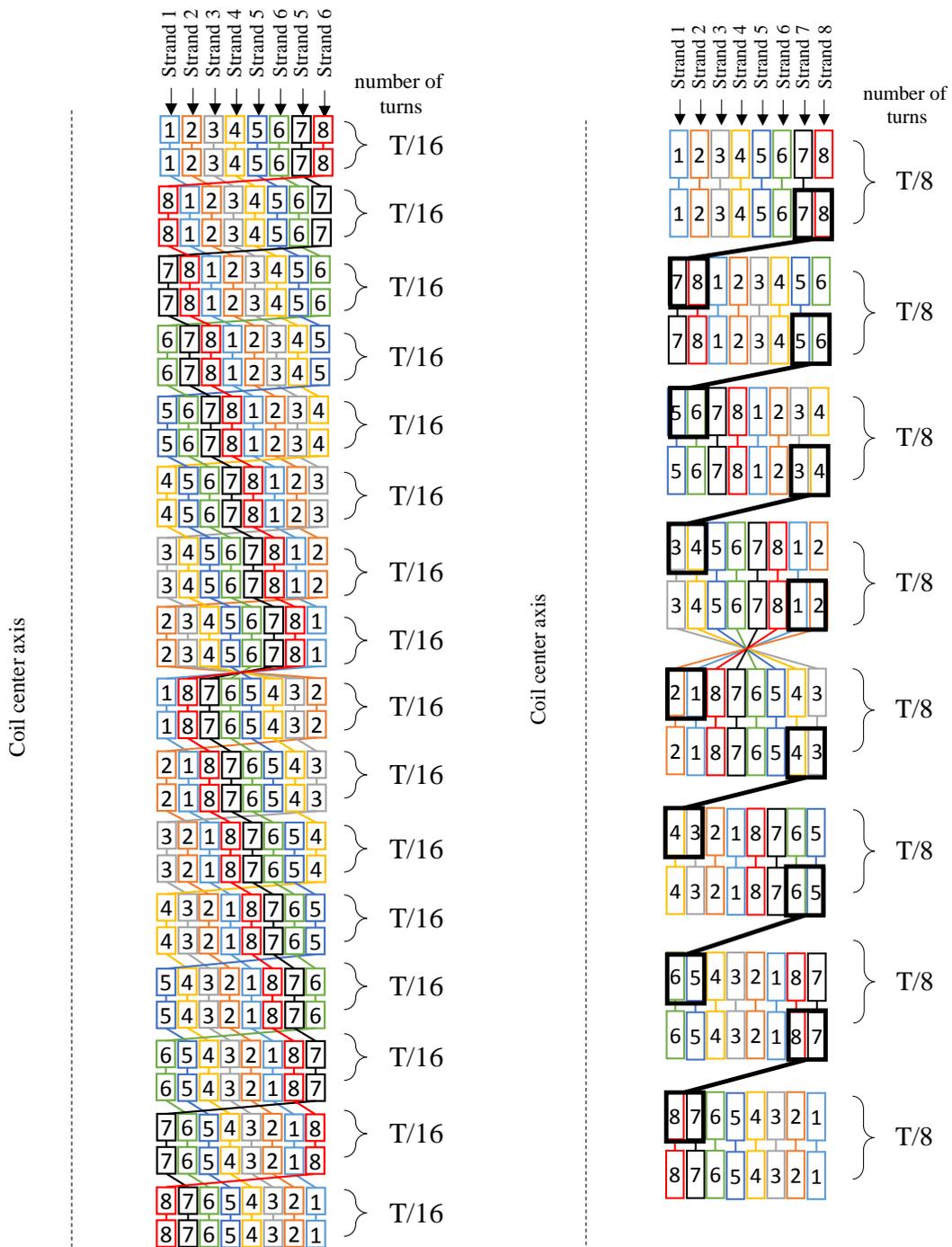


図 2-18. 4 本並列導体の最適層内転位パターン





(a) 通常の最適層内転位

(b) グループ転位

図 2-20. 8 本並列導体の最適層内転位パターン

## 2.4 層間転位と層内転位を組み合わせた転位パターン

層間転位のみで電流分流比を均一にするには、素線数の 4 倍の層数が必要となり制約となる。それ以外の層数で均一とするために、層内転位を導入し、層間転位を組み合わせた手法について示す。

### 2.4.1 最適層内転位を繰り返す場合

最適層内転位により層毎にインダクタンスがバランスするため、図 2-21~2-25 に示すように、層間でも転位しつつ、それを繰り返して多層に巻けばよい。この場合の層間転位は、全転位で対称となるためコイル下部と上部で逆とする必要がある。例えば、コイル下部では内側の素線を外側へ転位すると、コイル上部では外側の素線を内側へ転位する。インダクタンス行列を計算すると（表 2-8~2-11）、2 層目以降もインダクタンス要素は等しくなるため、電流分流は等しくなる。偶数の素線数の場合はグループ転位も適用できるが、それでも 1 層あたりの転位回数が多く、巻線工程が複雑になる。

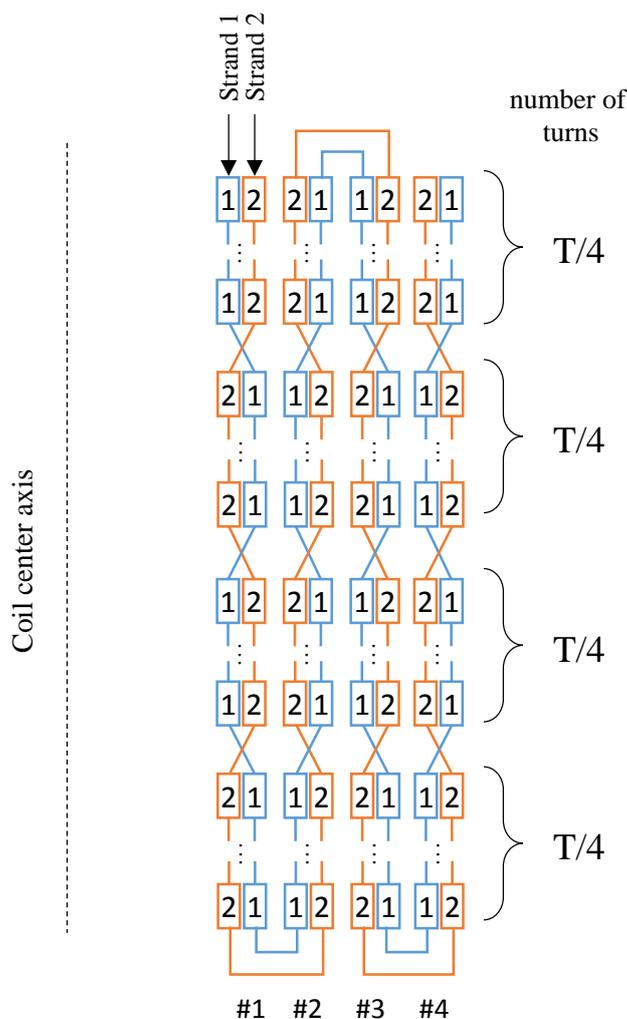


図 2-21. 最適層内転位を繰り返した転位パターン (2 本並列導体)

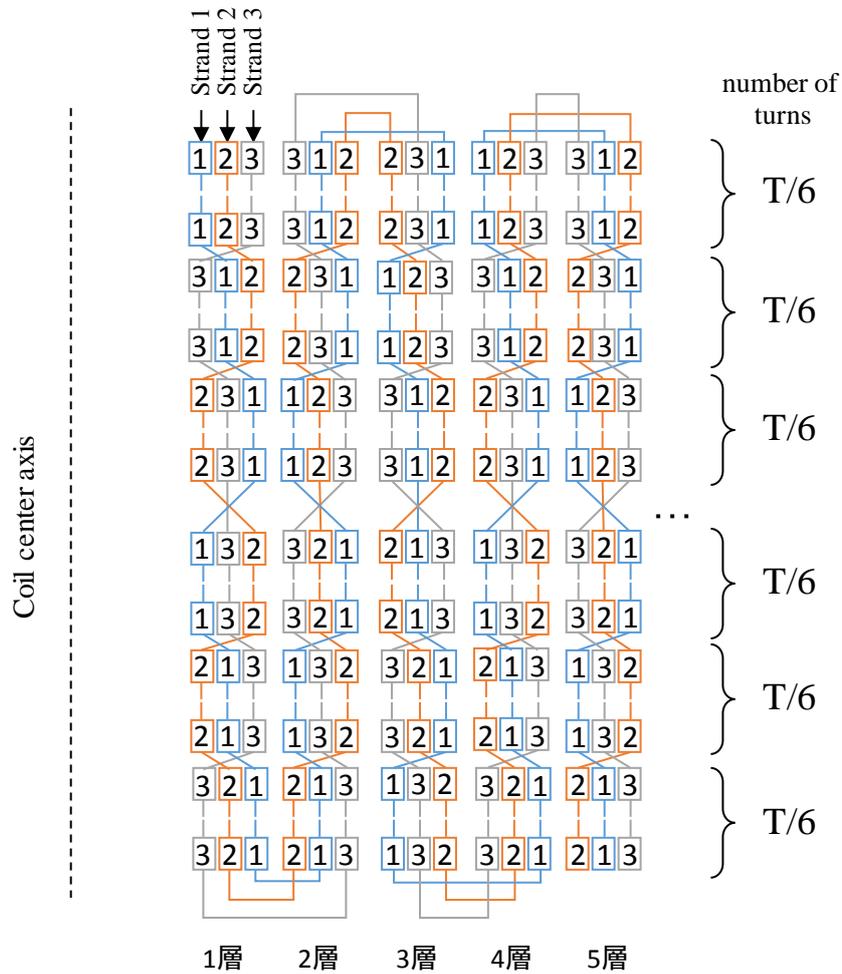


図 2-22. 最適層内転位を繰り返した転位パターン (3 本並列導体)

表 2-8. 最適層内転位を繰り返した転位パターンにおけるインダクタンス行列  
(3 本並列導体)

層数	インダクタンス行列 $\left( \times \begin{bmatrix} 1 & \cdots & 1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & \cdots & 1 \end{bmatrix} \right)$
2	$4(36r^2 + 18rs + 9s^2 - 32rt - 16st + 96t^2)$
3	$12(27r^2 + 30rs + 21s^2 - 16rt - 16st + 72t^2)$
4	$8(72r^2 + 126rs + 117s^2 - 32rt - 48st + 192t^2)$
5	$20(45r^2 + 108rs + 126s^2 - 16rt - 32st + 120t^2)$

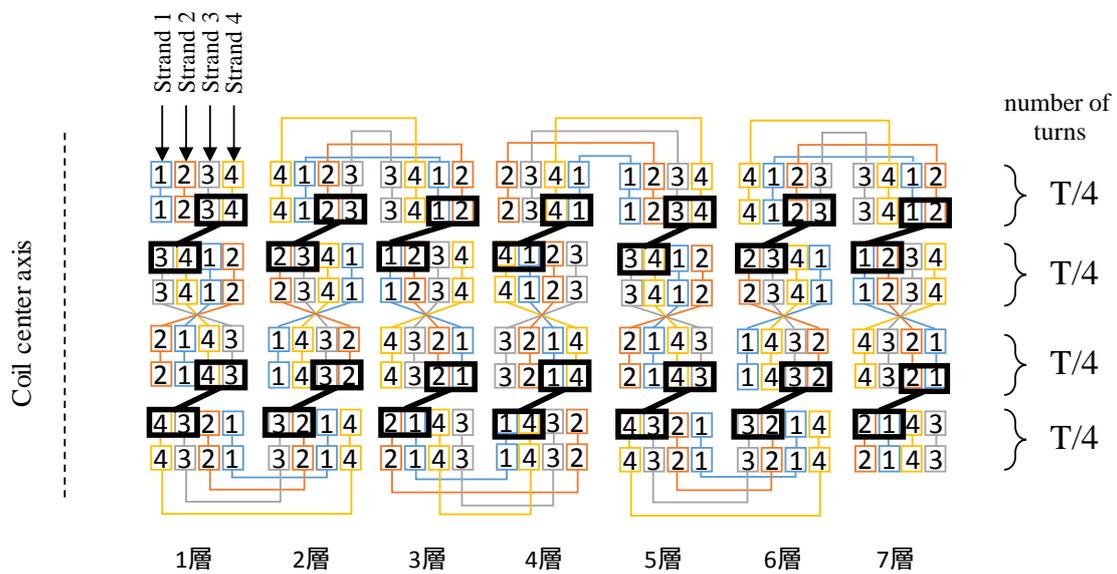


図 2-23. 最適層内転位を繰り返した転位パターン (4 本並列導体、グループ転位)

表 2-9. 最適層内転位を繰り返した転位パターンにおけるインダクタンス行列  
(4 本並列導体、グループ転位)

層数	インダクタンス行列 $\left( \times \begin{bmatrix} 1 & \cdots & 1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & \cdots & 1 \end{bmatrix} \right)$
2	$8(8r^2 + 4rs + 2s^2 - 10rt - 5st + 40t^2)$
3	$8(18r^2 + 14s^2 + 5r(4s - 3t) - 15st + 90t^2)$
4	$16(16r^2 + 28rs + 26s^2 - 10rt - 15st + 80t^2)$
5	$40(10r^2 + 24rs + 28s^2 - 5rt - 10st + 50t^2)$
6	$8(72r^2 + 220rs + 310s^2 - 30rt - 75st + 360t^2)$
7	$56(14r^2 + 52rs + 86s^2 - 5rt - 15st + 70t^2)$

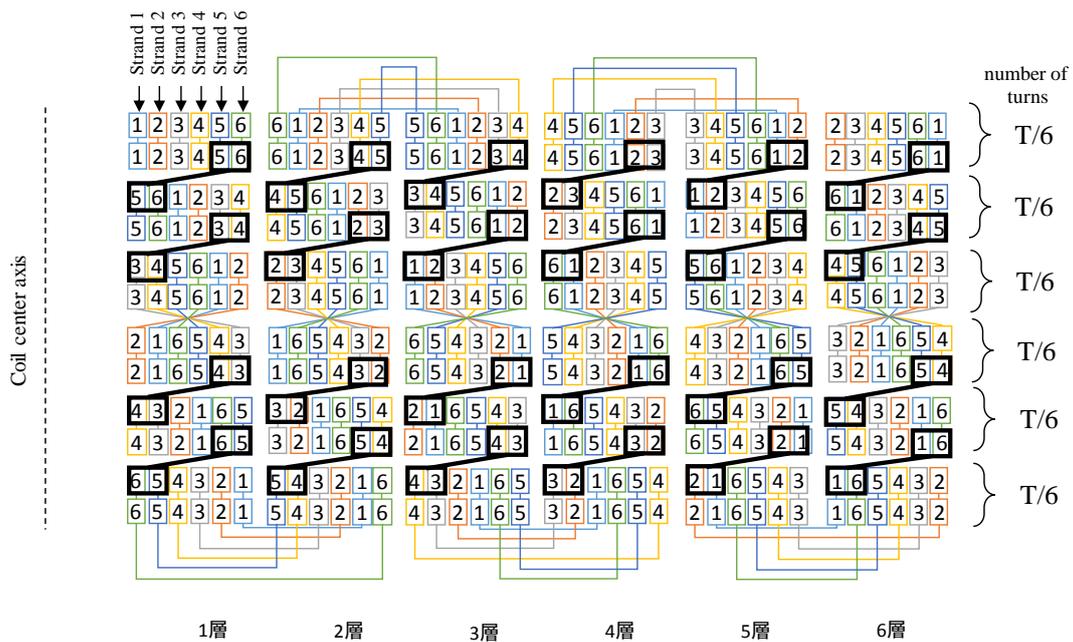


図 2-24. 最適層内転位を繰り返した転位パターン (6 本並列導体、グループ転位)

表 2-10. 最適層内転位を繰り返した転位パターンにおけるインダクタンス行列  
(6 本並列導体、グループ転位)

層数	インダクタンス行列 $\left( \times \begin{pmatrix} 1 & \dots & 1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & \dots & 1 \end{pmatrix} \right)$
2	$4(36r^2 + 18rs + 9s^2 - 70rt - 35st + 420t^2)$
3	$12(27r^2 + 5r(6s - 7t) + 7(3s^2 - 5st + 45t^2))$
4	$8(72r^2 + 126rs + 117s^2 - 70rt - 105st + 840t^2)$
5	$20(45r^2 + 108rs + 126s^2 - 35rt - 70st + 525t^2)$
6	$12(108r^2 + 330rs + 465s^2 - 70rt - 175st + 1260t^2)$
7	$28(63r^2 + 234rs + 387s^2 - 35rt - 105st + 735t^2)$
8	$16(144r^2 + 70r(9s - t) + 7(171s^2 - 35st + 240t^2))$
9	$36(81r^2 + 408rs + 876s^2 - 35rt - 140st + 945t^2)$
10	$20(180r^2 + 1026rs + 2457s^2 - 70rt - 315st + 2100t^2)$
11	$44(99r^2 + 630rs + 1665s^2 - 35rt - 175st + 1155t^2)$

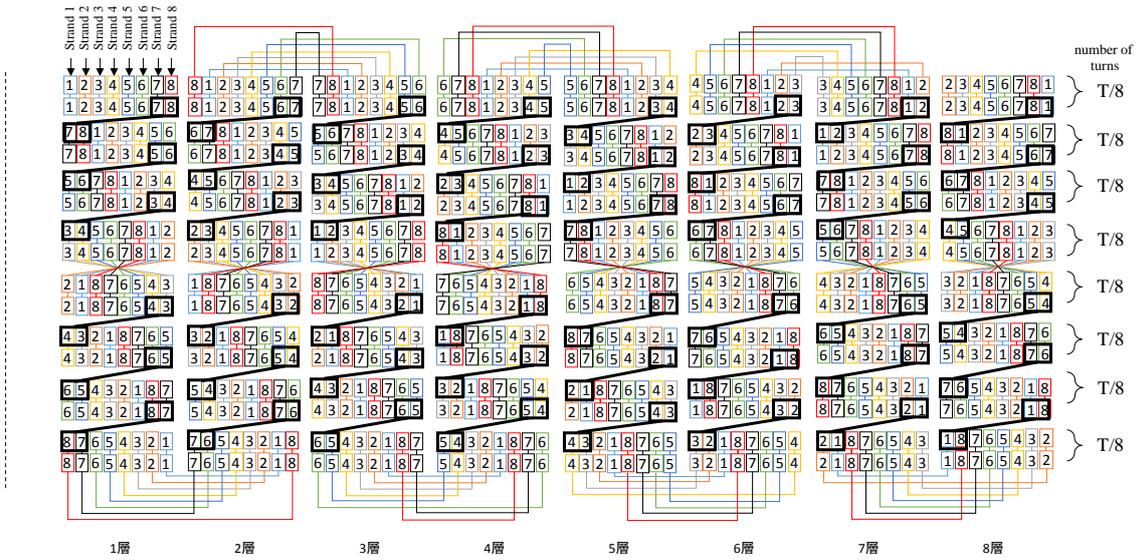


図 2-25. 層内転位を繰り返した転位方法 (8 本並列導体、グループ転位)

表 2-11. 層内転位を繰り返した転位方法におけるインダクタンス行列 (8 本並列導体)

層数	インダクタンス行列 $\left( \times \begin{bmatrix} 1 & \cdots & 1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & \cdots & 1 \end{bmatrix} \right)$
2	$16(16r^2 + 8rs + 4s^2 - 42rt - 21st + 336t^2)$
3	$16(36r^2 + 40rs + 28s^2 - 63rt - 63st + 756t^2)$
4	$32(32r^2 + 56rs + 52s^2 - 42rt - 63st + 672t^2)$
5	$80(20r^2 + 48rs + 56s^2 - 21rt - 42st + 420t^2)$
6	$16(144r^2 + 440rs + 620s^2 - 126rt - 315st + 3024t^2)$
7	$16(144r^2 + 440rs + 620s^2 - 126rt - 315st + 3024t^2)$
8	$64(64r^2 + 280rs + 532s^2 - 42rt - 147st + 1344t^2)$
9	$48(108r^2 + 544rs + 1168s^2 - 63rt - 252st + 2268t^2)$
10	$80(80r^2 + 6r(76s - 7t) + 21(52s^2 - 9st + 80t^2))$
11	$176(44r^2 + 740s^2 + 7r(40s - 3t) - 105st + 924t^2)$
12	$32(288r^2 + 2024rs + 5852s^2 - 126rt - 693st + 6048t^2)$
13	$208(52r^2 + 400rs + 1256s^2 - 21rt - 126st + 1092t^2)$
14	$112(112r^2 + 936rs + 3172s^2 - 42rt - 273st + 2352t^2)$
15	$80(180r^2 + 7r(232s - 9t) + 7(844s^2 - 63st + 540t^2))$

## 2.4.2 層内全転位を組み込んだ最適層間転位パターン

最適層内転位を繰り返していく転位パターンでは層毎にインダクタンスがバランスするが、転位回数が増大する。そこで、各層に全転位を組み込み、層間においても転位することで転位回数を抑制できる転位パターンについて、手順を以下に示す。素線数を  $N$ 、層数を  $L$  とする。

### ① 各層内

各層内において、コイル中心部で全転位を施す。

### ② $1 \leq L \leq N$ の場合

コイル下部で層をわたる場合は、内側の素線が外側になるように転位を施す。

コイル上部で層をわたる場合は、外側の素線が内側になるように転位を施す。

### ② $N+1 \leq L \leq 2N$ の場合

$N$  層と  $N+1$  層の間を境として、各層における素線の配置が同じになるように転位を施す。例えば、 $N+2$  層であれば、 $N-1$  層と同じとなるように転位を施す。

### ③ $2N \leq L$ の場合

① から繰り返す。

各素線数における転位図を図 2-26~2-32 および 3 本並列導体の電流分流比の計算結果を表 2-12 に示す。なお、素線数が偶数の場合は、インダクタンス行列が特異行列となり分流比が計算できない。表 2-5 に示すパラメータを用いてグラフ化したものを図 2-33 に示す。層内全転位を組み込む本転位パターンにより、素線数の 2 倍の層数毎に均一になることが分かった。

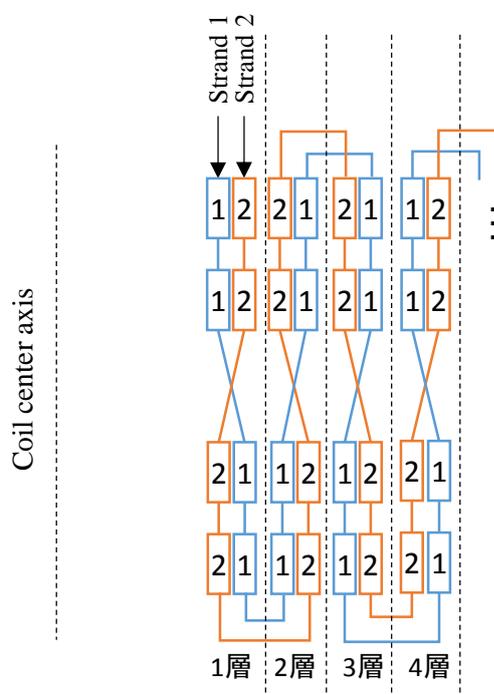


図 2-26. 層内全転位を組み込んだ最適層間転位パターン (2 本並列導体)

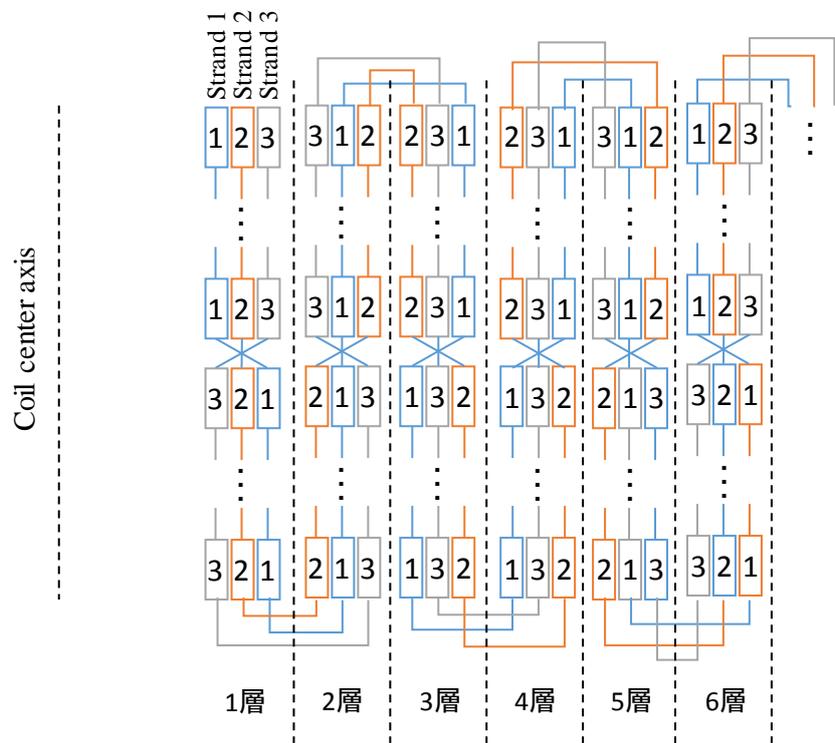


図 2-27. 層内全転位を組み込んだ最適層間転位パターン (3 本並列導体)

表 2-12. 層内全転位を組み込んだ最適層間転位の電流分流比計算結果 (3 本並列導体)

層数	$I_1$	$I_2$	$I_3$
2	$\frac{t}{r+s}$	$\frac{3t}{r}$	$\frac{r^2 + rs - 4rt - 3st}{r^2 + rs}$
3	$\frac{r^2 + 2rs - 4st}{3r^2 + 6rs + 2s^2}$	$\frac{r^2 + 3r(s+2t) + 2s(s+4t)}{3r^2 + 6rs + 2s^2}$	$\frac{r^2 + rs - 6rt - 4st}{3r^2 + 6rs + 2s^2}$
4	$\frac{2r^2 + 5rs - 3rt - 10st}{5r^2 + 13rs + 5s^2}$	$\frac{2r^2 + 7r(s+t) + s(5s+13t)}{5r^2 + 13rs + 5s^2}$	$\frac{r^2 + rs - 4rt - 3st}{5r^2 + 13rs + 5s^2}$
5	$\frac{r-t}{4r+5s}$	$\frac{2r+5s+2t}{4r+5s}$	$\frac{r-t}{4r+5s}$
6	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$

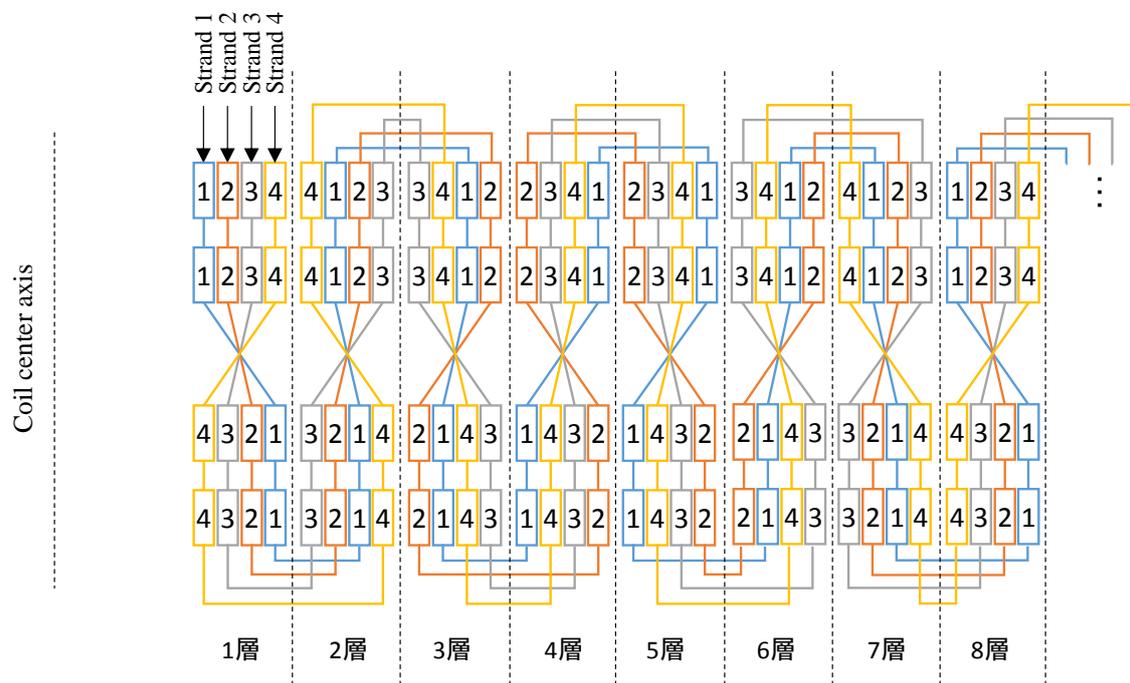


図 2-28. 層内全転位を組み込んだ最適層間転位パターン (4 本並列導体)

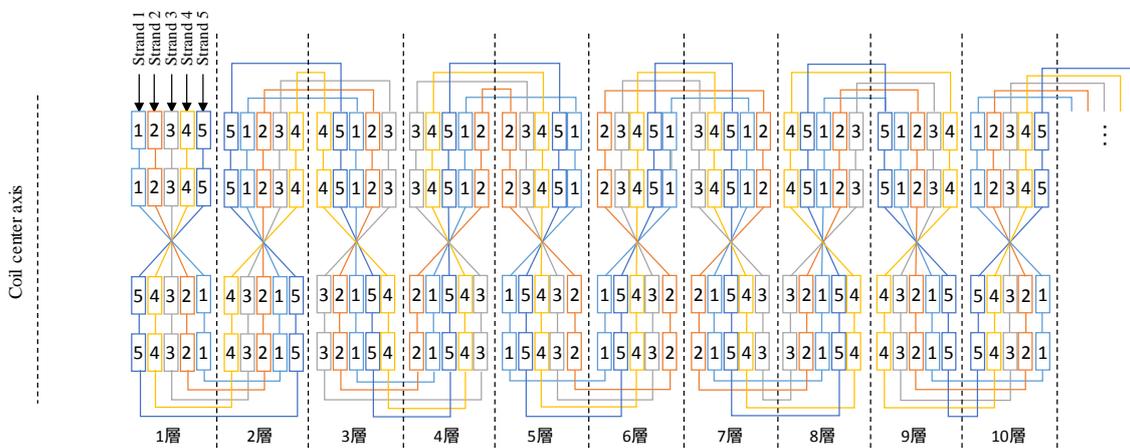


図 2-29. 層内全転位を組み込んだ最適層間転位パターン (5 本並列導体)

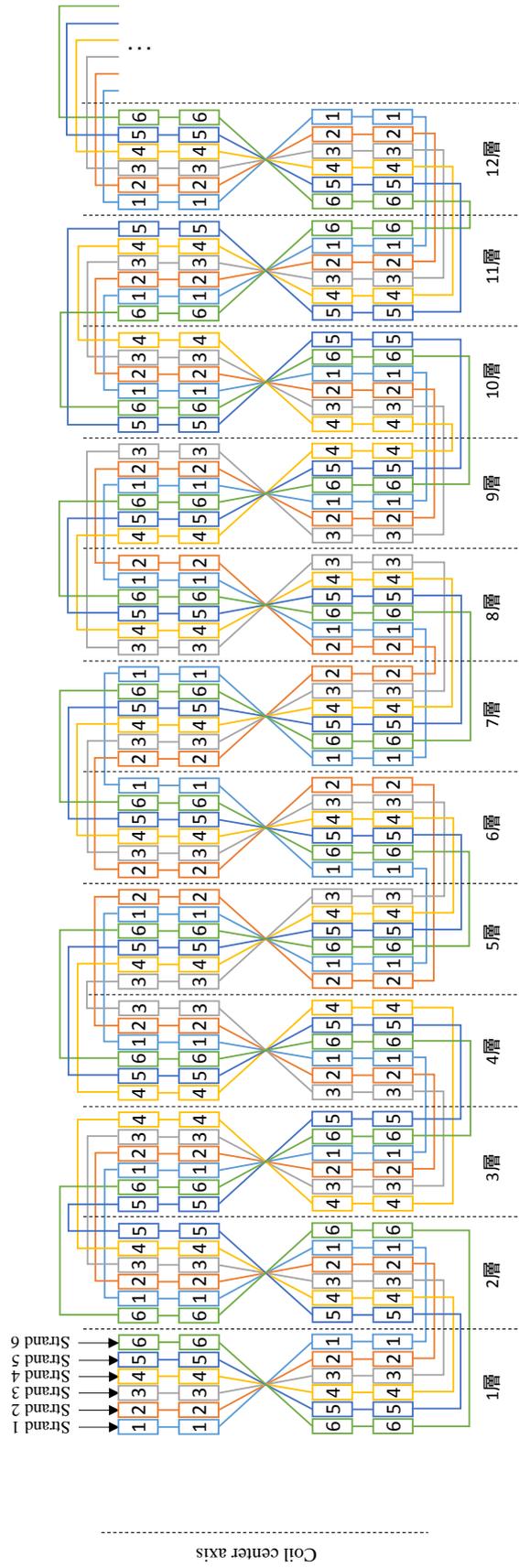


図 2-30. 層内全転位を組み込んだ最適層間転位パターン (6 本並列導体)

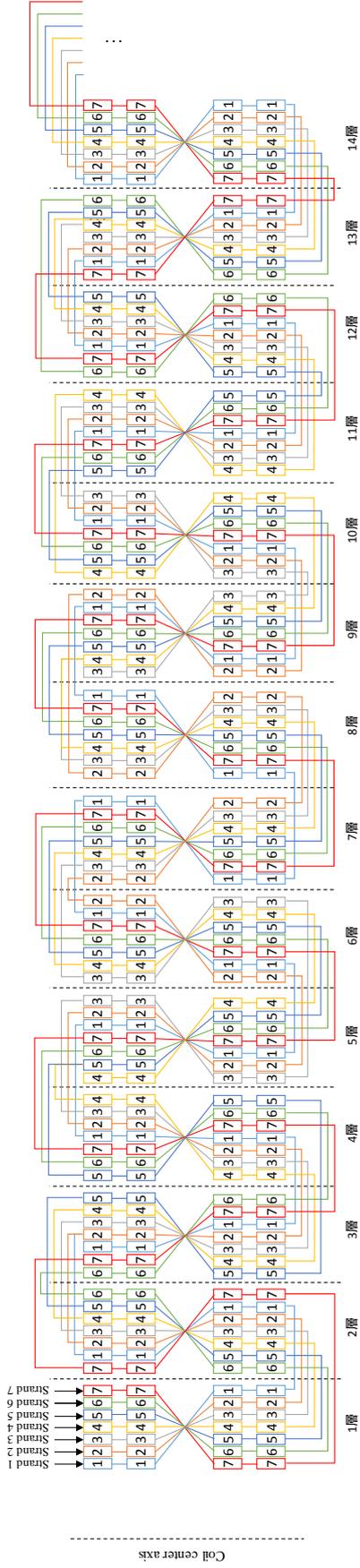


図 2-31. 層内全転位を組み込んだ最適層間転位パターン (7 本並列導体)

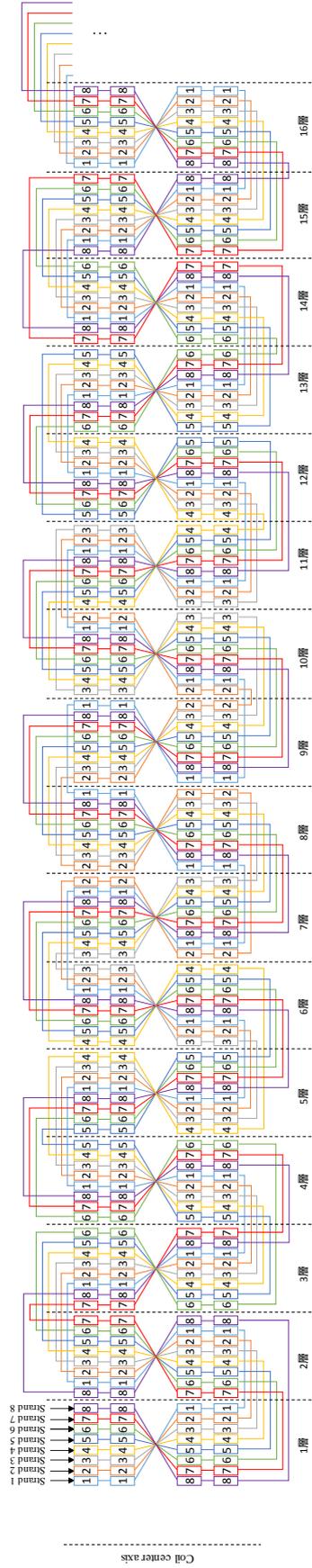
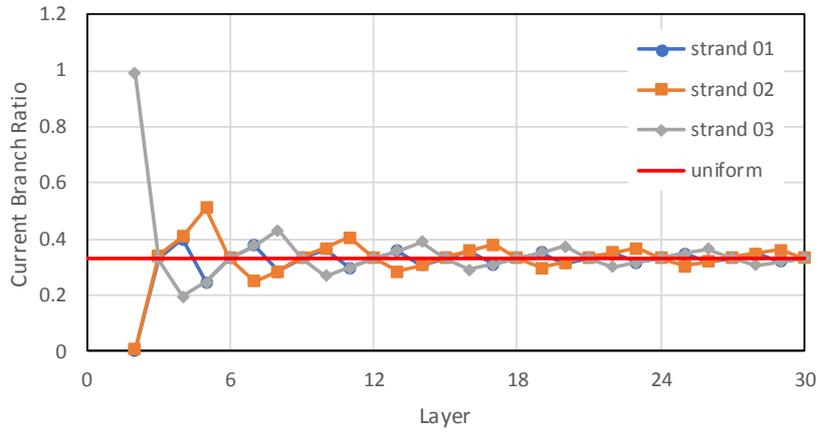
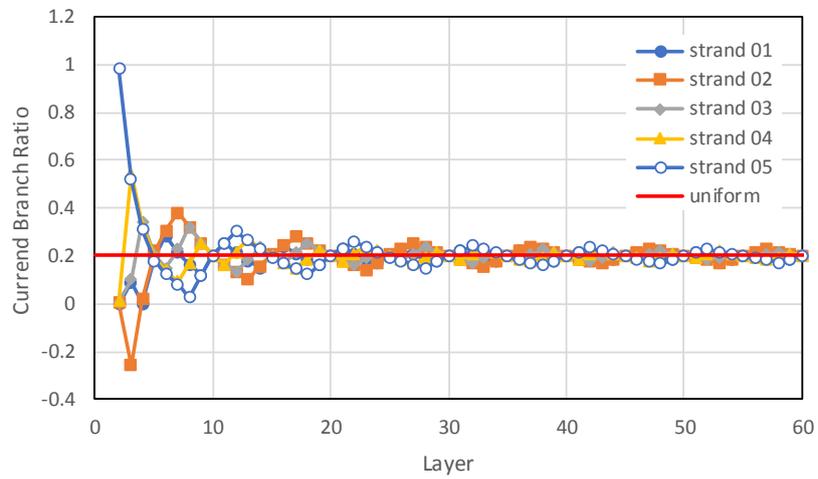


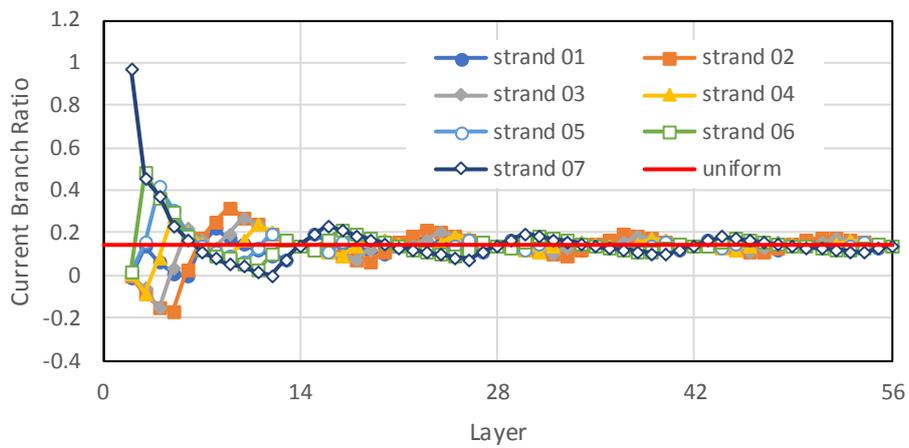
図 2-32. 層内全転位を組み込んだ最適層間転位パターン (8 本並列導体)



(a) 3本並列導体



(b) 5本並列導体



(c) 7本並列導体

図 2-33. 全転位を組み込んだ最適層間転位パターンにおける電流分流比の計算結果

### 2.4.3 最適転位層数以上の場合

これまで、層間のみ転位で素線数の4倍、全転位を組み込んだ層間転位で素線数の2倍の層数で電流分流比が完全に均一になり、最適転位であることを示した。この層数を最適転位層数と呼ぶ。最適転位層数は、それぞれ素線数の2倍および4倍の層数で、必要最小限の転位数でインダクタンス行列がバランスすることから、その層数までは最適転位を用いることが望ましい。さらに最適転位層数から増える場合は、層毎にインダクタンスがバランスする最適層内転位を用いることで分流比を均一にすることができる。

#### (a) $2N < L < 4N$ の場合

2倍の層数まで、層内全転位を組み込んだ最適層間転位、それ以降の層数は最適層内転位を用いる。図2-34および表2-13に3本並列導体の転位図と電流分流比の計算結果を、図2-35に4本並列導体の転位図を示す。なお、4本並列導体の電流分流比は、インダクタンス行列が特異行列となるため計算ができない。

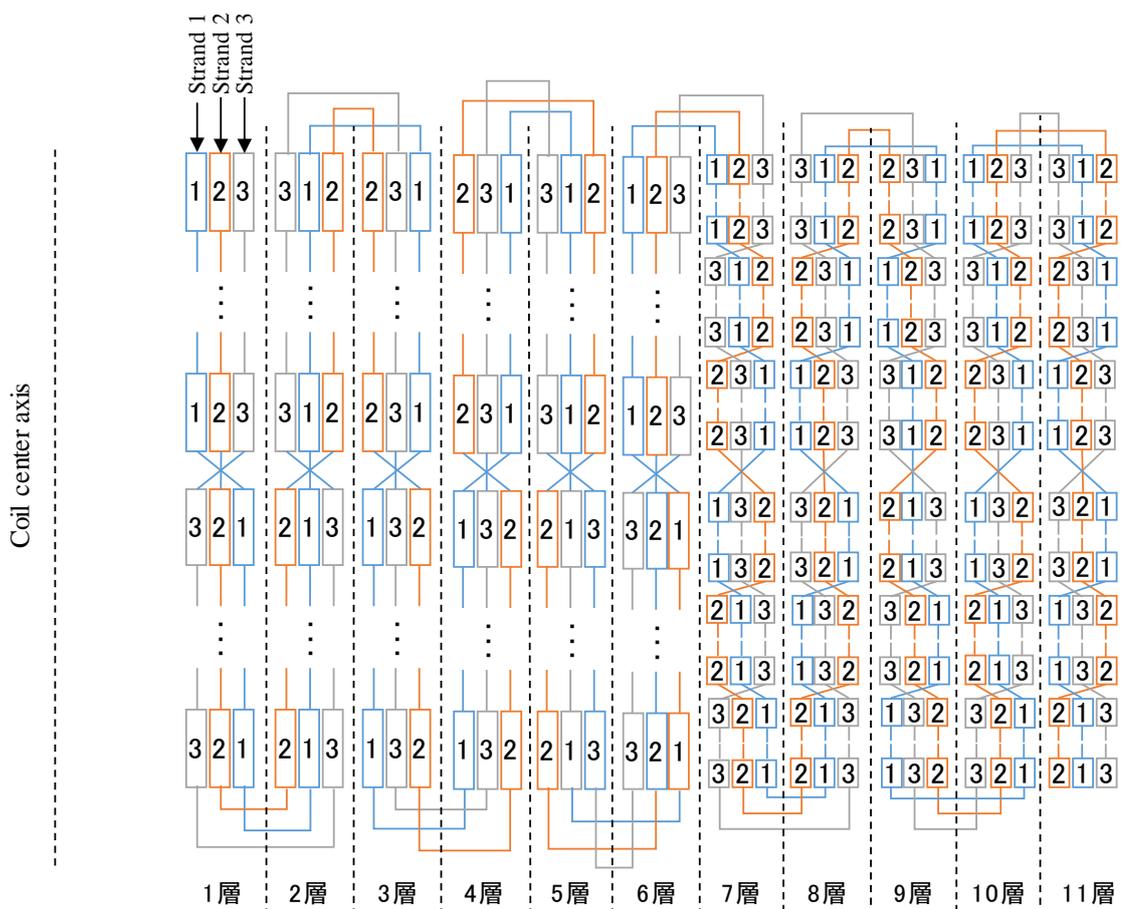


図2-34. 3本並列導体の転位図 (7~11層)

表 2-13. 7~11 層の電流分流比の計算結果 (3 本並列導体)

層数	$I_1$	$I_2$	$I_3$
7	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$
8	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$
9	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$
10	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$
11	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$

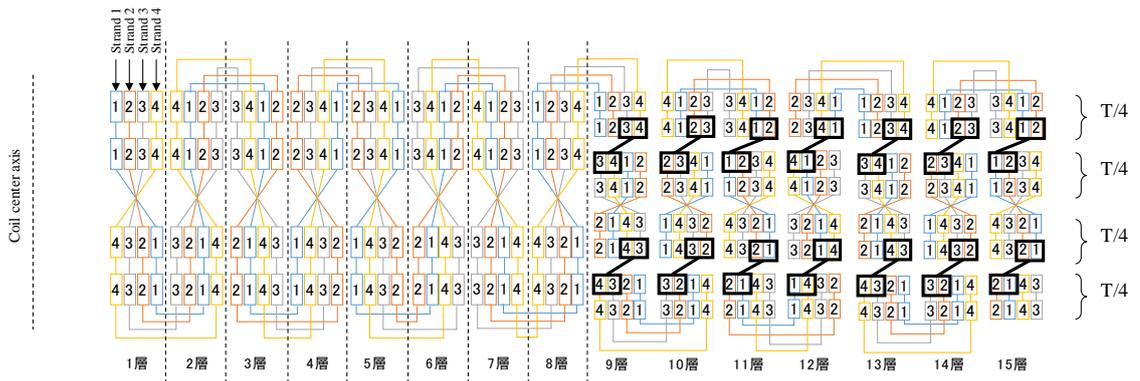


図 2-35. 4 本並列導体の転位図 (9~15 層)

(b)  $4N < L < 6N$  の場合

4 倍の層数まで最適層間転位、それ以降の層数は最適層内転位を用いる。図 2-36 および表 2-14 に 3 本並列導体の転位図と電流分流比の計算結果を、図 2-37 および表 2-15 に 4 本並列導体の転位図と電流分流比の計算結果を示す。いずれの場合にも電流分流比が均一になる。

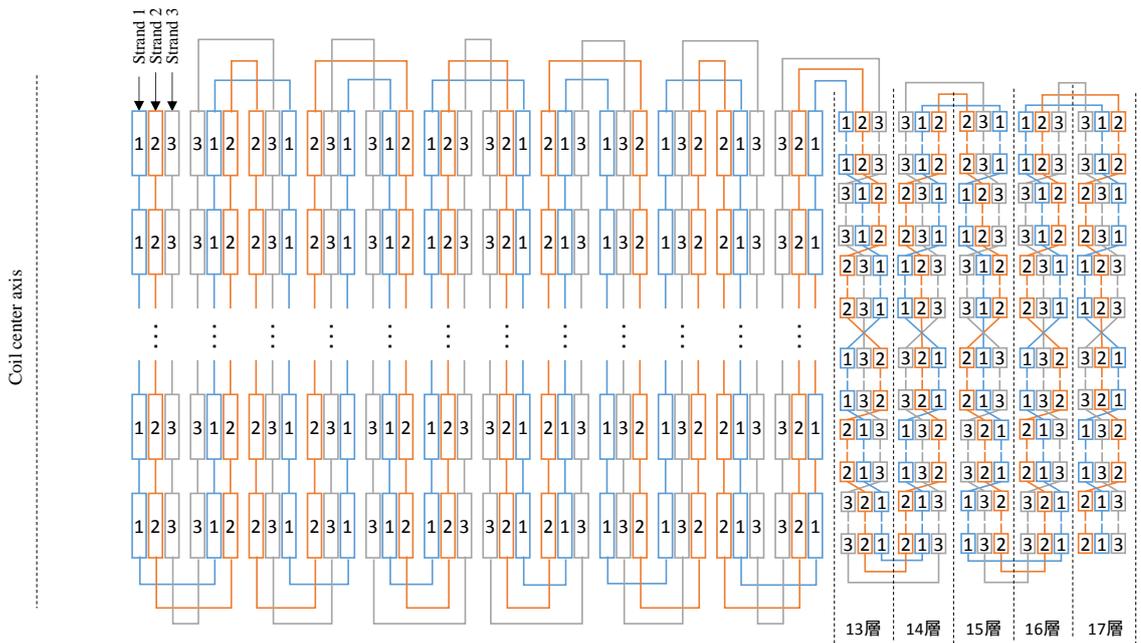


図 2-36. 3 本並列導体の転位図 (13~17 層)

表 2-14. 13~17 層の電流分流比の計算結果 (3 本並列導体)

層数	$I_1$	$I_2$	$I_3$
13	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$
14	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$
15	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$
16	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$
17	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$

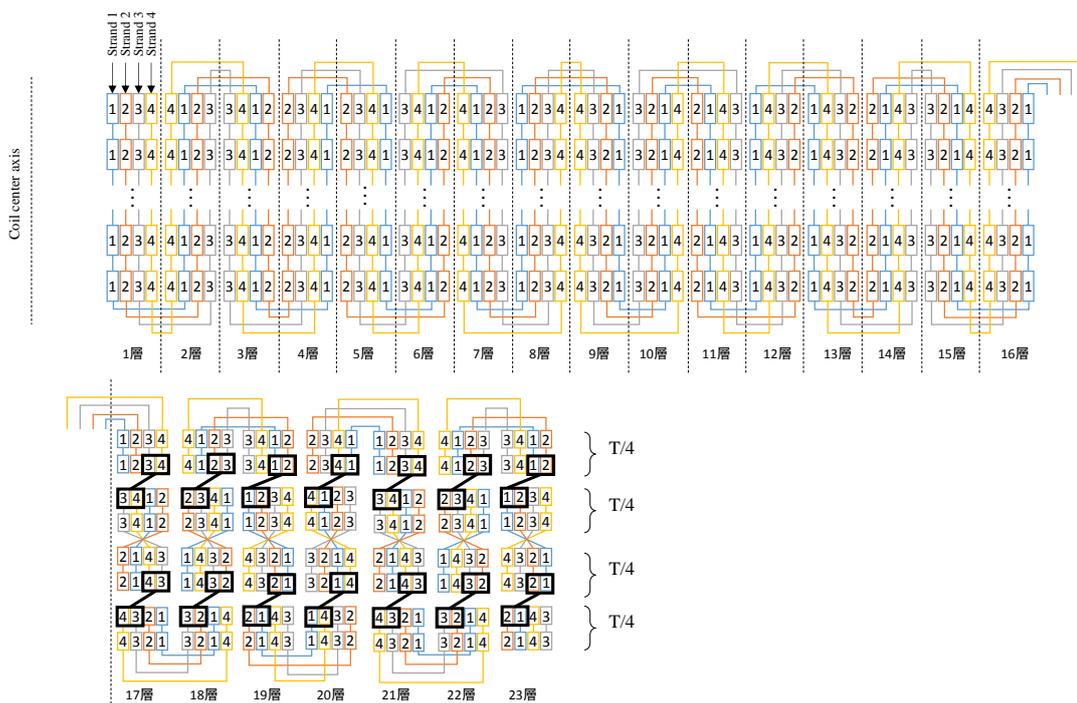


図 2-37. 4 本並列導体の転位図 (17~23 層)

表 2-15. 17~23 層の電流分流比の計算結果 (4 本並列導体)

層数	$I_1$	$I_2$	$I_3$	$I_4$
17	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}$
18	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}$
19	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}$
20	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}$
21	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}$
22	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}$
23	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}$

(c)  $L=6N$  の場合

4 倍の層数まで最適層間転位、その後、6 倍の層数まで層内全転位を組み込んだ最適層間転位を用いる。図 2-38 および表 2-16 に 3 本並列導体の転位図と電流分流比の計算結果を、図 2-39 および表 2-17 に 4 本並列導体の転位図と電流分流比の計算結果を示す。いずれの場合にも電流分流比が均一になる。

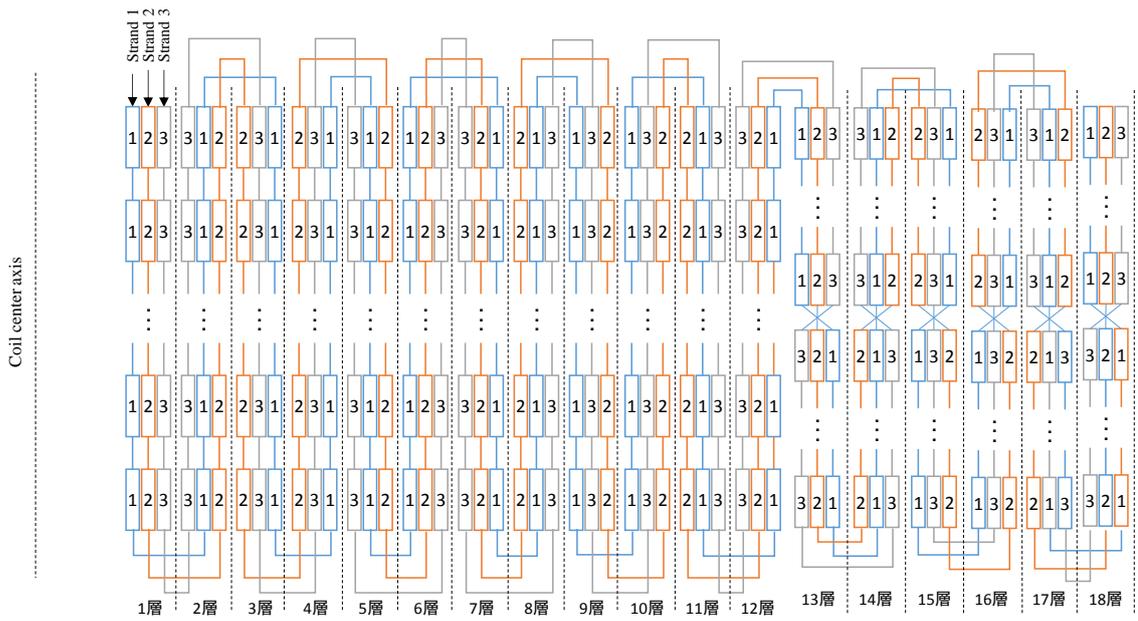


図 2-38. 3 本並列導体の転位図 (18 層)

表 2-16. 18 層の電流分流比の計算結果 (3 本並列導体)

層数	$I_1$	$I_2$	$I_3$
18	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$

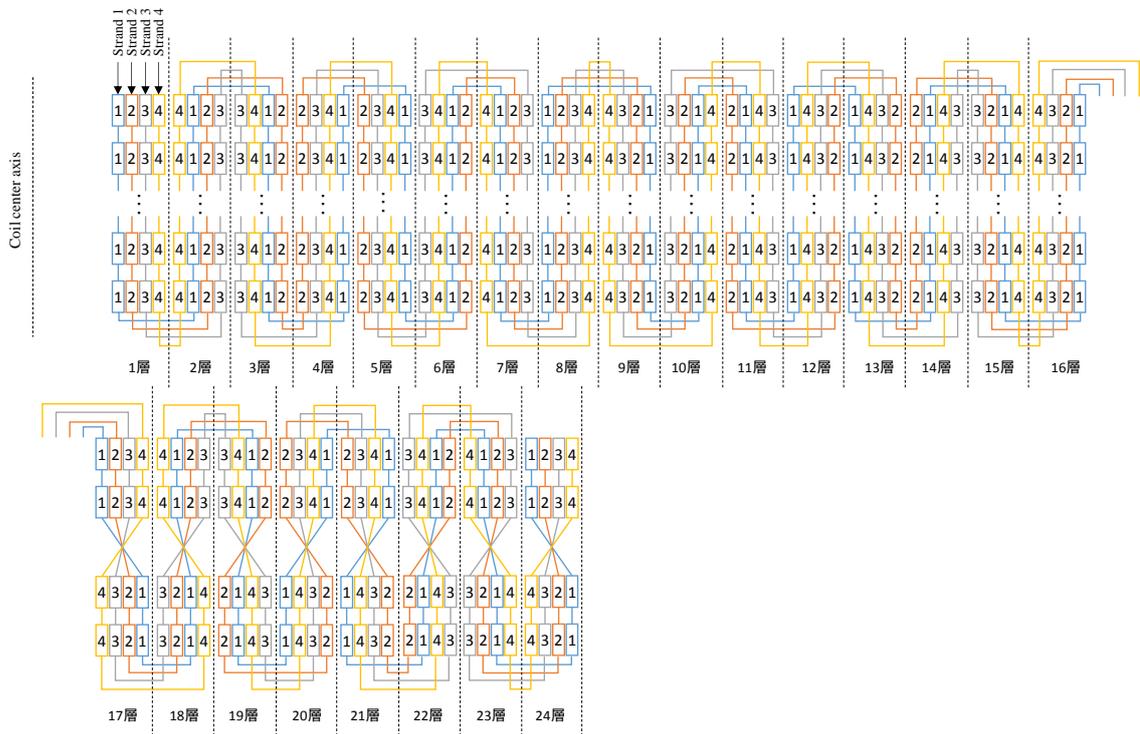


図 2-39. 4 本並列導体の転位図 (24 層)

表 2-17. 24 層の電流分流比の計算結果 (4 本並列導体)

層数	$I_1$	$I_2$	$I_3$	$I_4$
24	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}$

(d)  $6N < L < 8N$  の場合

4 倍の層数まで最適層間転位、6 倍の層数まで、層内全転位を組み込んだ最適層間転位、それ以降の層数は最適層内転位を用いる。図 2-40 および表 2-18 に 3 本並列導体の転位図と電流分流比の計算結果を、図 2-41 および表 2-19 に 4 本並列導体の転位図と電流分流比の計算結果を示す。いずれの場合にも電流分流比が均一になる。

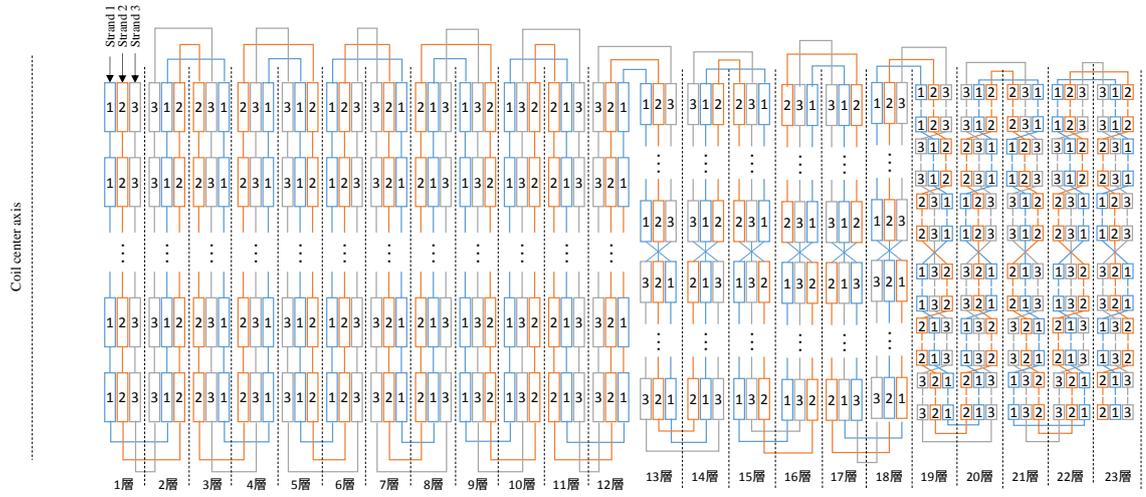


図 2-40. 3 本並列導体の転位図 (19~23 層)

表 2-18. 19~23 層の電流分流比の計算結果 (3 本並列導体)

層数	$I_3$	$I_3$	$I_3$
19	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$
20	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$
21	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$
22	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$
23	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$

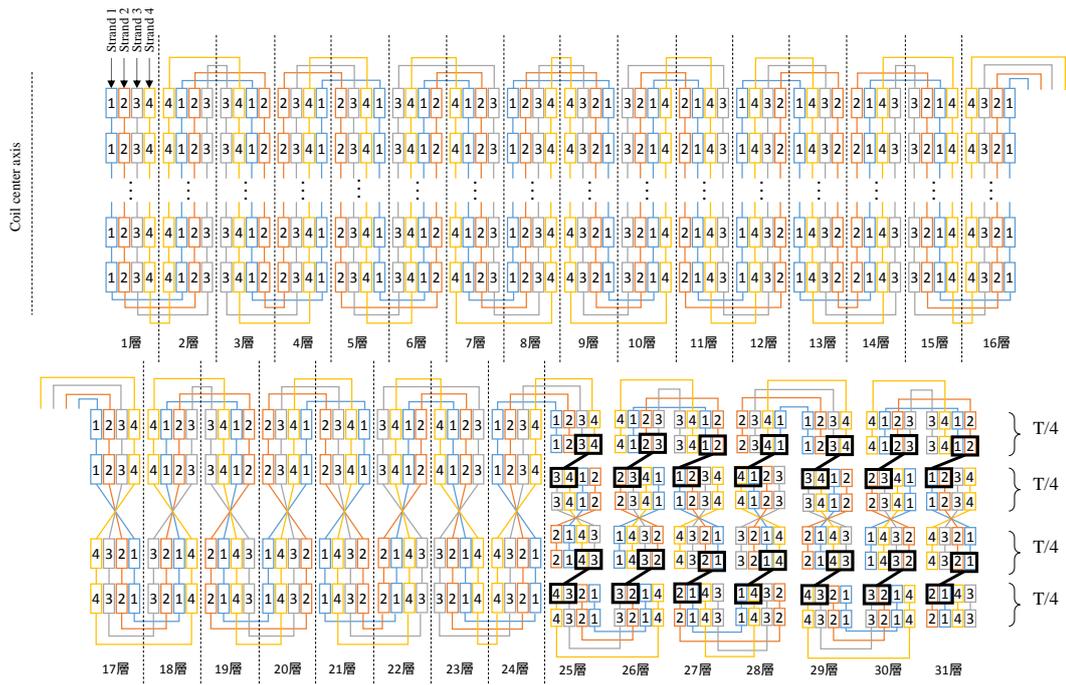


図 2-41. 4 本並列導体の転位図 (25~31 層)

表 2-19. 25~31 層の電流分流比の計算結果 (4 本並列導体)

層数	$I_1$	$I_2$	$I_3$	$I_4$
25	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}$
26	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}$
27	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}$
28	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}$
29	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}$
30	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}$
31	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}$

## 2.5 まとめ

本章では、無限長ソレノイドコイルと近似し、インダクタンス行列から電流分流比を算出し、均一となる層間および層内の最適転位パターンについて提示した。これらはそれぞれ決められた層数において、インダクタンスがバランスすることで均一な電流分流が得られるため、これらを組み合わせることで、任意の層数に対応した最適転位パターンとする。任意の層数に対応した最適転位パターンを以下に示す。 $L$ は層数、 $N$ は並列導体を構成する素線数とする。

### (1) $L < 2N$

最適層内転位を繰り返し、層間においても転位する。

### (2) $L = 2N$

層内全転位を用いた最適層間転位を用いる。

### (3) $2N < L < 4N$

$2N$ 層まで層内全転位を組み込んだ最適層間転位を用い、以降は最適層内転位を繰り返す。

### (4) $L = 4N$

最適層間転位を用いる。

### (5) $4N < L < 6N$

$4N$ 層まで最適層間転位、以降は最適層内転位を繰り返す。

### (6) $L = 6N$

$4N$ 層まで最適層間転位、 $6N$ 層まで層内全転位を組み込んだ最適層間転位を施す。

### (7) $6N < L < 8N$

$4N$ 層まで最適層間転位、 $6N$ 層まで層内全転位を組み込んだ最適層間転位、以降は最適層内転位を繰り返す。

### (8) $8N \leq L$

同様に、最適層間転位、層内全転位を組み込んだ最適層間転位、最適層内転位を組み合わせる。

本章では、無限ソレノイド近似を用いて各層をインダクタンス要素として計算することにより、任意の層数で電流分流比が均一となる最適転位パターンについて提示した。次章では、線材形状を考慮した数値解析により有限長コイルとして計算することで、最適転位パターンの妥当性を示すとともに、最適転位パターンを施された超電導コイルの評価により、実際の巻線への有用性を検証する。

### 第3章 数値解析による最適転位パターンの検証

無限ソレノイドコイル近似により、各層をインダクタンス要素として計算し、素線間の電流分流比を算出することで、最適転位パターンを示した。しかしながら、実際のソレノイドコイルは有限長であり、巻線する超電導線材も幅、厚みを持つ。そこで、現在開発されている高温超電導線材の寸法を参照して、自己および相互インダクタンスを算出し、回路方程式を用いて素線間の電流分流比を求め、導出した最適転位パターンの妥当性を検証した。さらに、最適転位パターンを適用した超電導コイルの電流分流特性および交流損失特性の観測結果から、実際の巻線への有用性を検証した。

#### 3.1 有限長ソレノイドコイルの計算方法

無限ソレノイドコイル近似では、各層を1つのインダクタンス要素として計算したが、ここでは、高温超電導線材の寸法を考慮し、並列導体を構成している素線の1ターンを1つのインダクタンス要素として考え、それらが直列に接続されているとした(図3-1)。回路方程式は、式(2-1)～(2-6)の導出と同じになるが、インダクタンス要素が増大し、要素毎の自己および相互インダクタンスを計算することになるため、複雑となる。

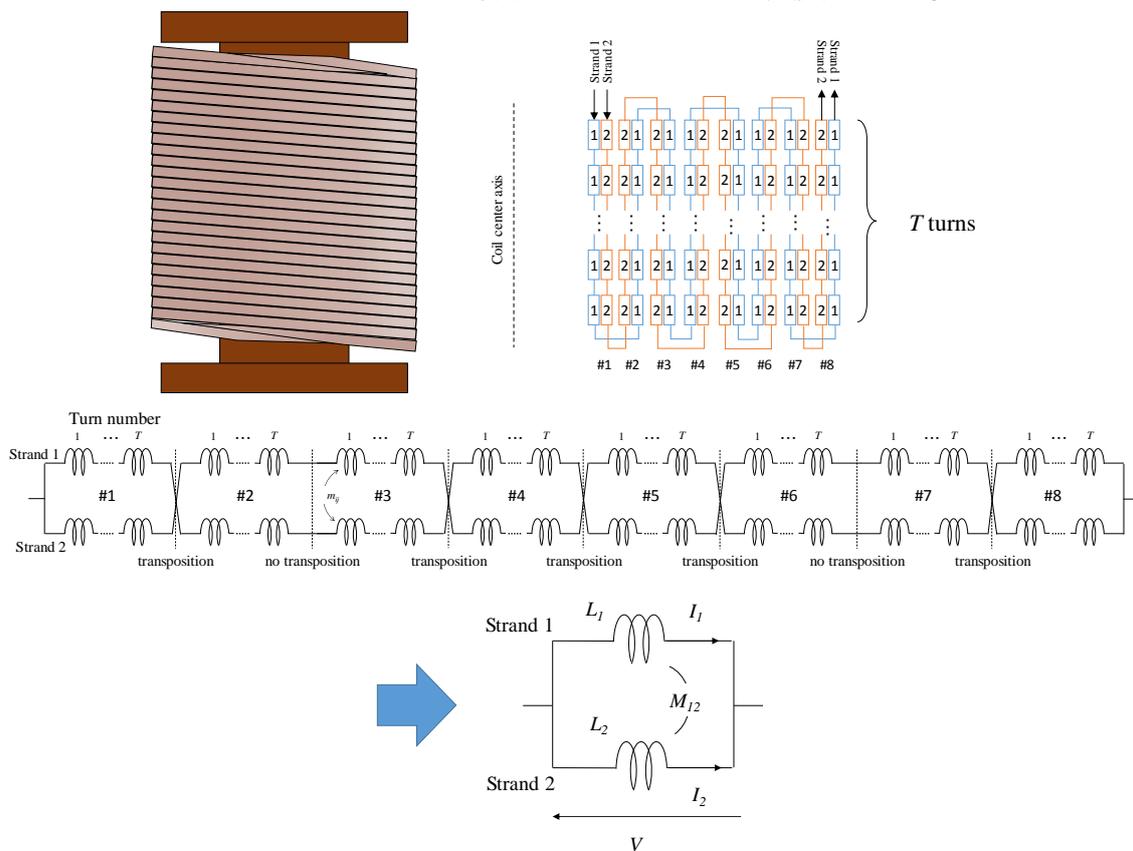


図3-1. 素線1ターンを1つのインダクタンス要素としたソレノイドコイルの等価回路

自己インダクタンスについては諸説あるが、現在の高温超電導線材の加工寸法（表 3-1）と、交流電気機器の巻線が大型となることを考慮すると、コイルの平均直径を  $D$ 、高温超電導線材の幅を  $b$ 、厚さを  $a$  とした場合に、 $0 < \frac{b}{D}, \frac{a}{D} < 0.4$  の関係が成り立つときに精度よくインダクタンスの計算ができる、Weinstein=Stefan<sup>1)</sup>の近似式を用いた。

(Weinstein=Stefan の近似式)

$$L = \mu_0 r N^2 \left\{ \left( 1 + \frac{3b^2 + a^2}{96r^2} \right) \ln \frac{8r}{\sqrt{a^2 + b^2}} - y_1 + \frac{b^2}{16r^2} y_2 \right\} \quad (3-1)$$

ここで、

$$y_1 = \frac{\pi x}{3} - \frac{1}{12x^2} \ln(1 + x^2) - \frac{x^2}{12} \ln \left( 1 + \frac{1}{x^2} \right) - \frac{2}{3} \left( x - \frac{1}{x} \right) \tan^{-1} x - \frac{1}{12}$$

$$y_2 = \frac{1}{6} \left[ \frac{69}{20} + \frac{221}{60} \frac{1}{x^2} - \frac{1}{10x^4} \ln(1 + x^2) + \frac{x^2}{2} \ln \left( 1 + \frac{1}{x^2} \right) - \frac{8\pi x}{5} + \frac{16x}{5} \tan^{-1} x \right]$$

$$x = \frac{b}{a}$$

ただし、 $r$  は高温超電導線材 1 ターンの平均半径である（図 3-2）。 $N$  は巻数であるが、素線 1 ターン毎に計算するため、 $N=1$  となる。

表 3-1. 酸化物超電導線材の加工寸法例

種類	幅	厚さ
Bi-2223	2.3~4.5 mm	0.18~0.23 mm
RE 系(RE : Rare Earth. YBCO,GdBCO など)	4~5 mm	0.11~0.13 mm

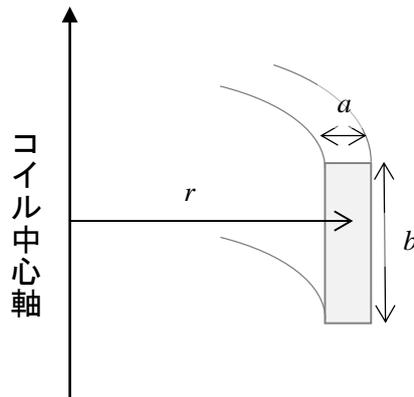


図 3-2. 自己インダクタンスの計算

相互インダクタンスは、線材断面を考慮したノイマンの式を用いる。

$$M = \iiint \mu_0 \sqrt{r \times r'} \left\{ \left( \frac{2}{k} - k \right) K(k) - \frac{2}{k} \times E(k) \right\} dr_1 dr_2 dz_1 dz_2 \quad (3-2)$$

しかし、積分の計算に多大な時間を要するため、図 3-3 のように素線断面をいくつも分割す

ることのできた点を計算点とし、それぞれの点同士の相互インダクタンス  $m$  を式 (3-4) で計算し、平均化することで素線間の相互インダクタンス  $M$  を求める。

$$M = \frac{(\sum m)}{(P_r \times P_z)^2} \quad (3-3)$$

$$m = \mu_0 \sqrt{r \times r'} \left\{ \left( \frac{2}{k} - k \right) K(k) - \frac{2}{k} \times E(k) \right\} \quad (3-4)$$

$$k = \sqrt{\frac{4r \times r'}{(r + r')^2 + (z - z')^2}}$$

$$K(k) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{d\phi}{\sqrt{1 - k^2 \sin^2 \phi}}$$

$$E(k) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1 - k^2 \sin^2 \phi} d\phi$$

ただし、 $P_r$  は厚み方向、 $P_z$  は幅方向の分割数であるため、 $P_r \times P_z$  が計算点の数となる。本論文では、 $P_r=30$ 、 $P_z=30$  とし、900 分割として計算した。

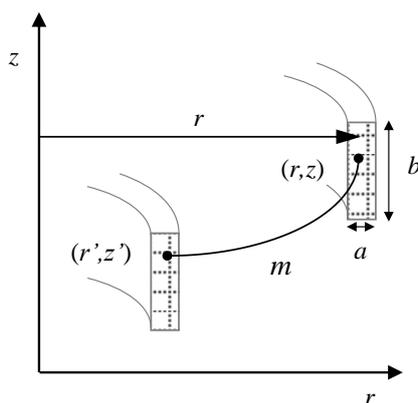


図 3-3. 相互インダクタンスの計算

また、本章で使用するパラメータは、特筆がない限り、表 3-2 のとおりとする。高温超電導線材には次世代線材と呼ばれ、今後の普及が期待されている GdBCO 超電導線材を想定した。図 3-4 に構造を示す。実際の電流は超電導である GdBCO 層に流れる。

表 3-2. 解析に用いたパラメータ

超電導線材	GdBCO
厚み	0.11 mm
幅	5.0 mm
絶縁厚み	0.035 mm

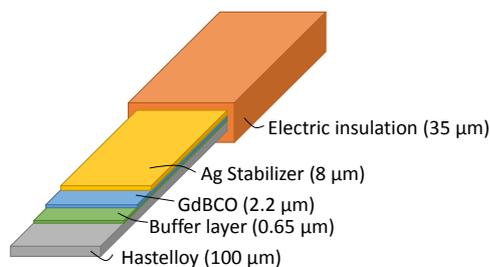


図 3-4. GdBCO 超電導線材の構造

### 3.2 最適転位パターンの数値解析

#### 3.2.1 最適層間転位パターン

層間のみで転位する最適層間転位について、各層における電流分流比の計算を実施した。コイルの基本的なパラメータは表 3-3 に示すとおりである。3 本および 4 本並列導体の最適層間転位パターンを図 3-5 に示す。

表 3-3. 解析に用いたコイルパラメータ

コイル内径	150 mm
ターン数	48 turns
層間距離	1 mm
素線数	3,4

各層における電流分流比の計算結果を図 3-6 に示す。無限ソレノイドコイル近似の計算結果を破線で示している。両者の傾向は類似しており、素線数の 4 倍の層数において、電流分流比が均一となるが、そのほかの層数においては電流分流比が不均一となる。4 倍の層数における転位回数は、層間のみで  $(4N-3)$  回となる。また、3 本並列導体の最適転位層数である 12 層と、電流分流が不均一となる 11 層において、コイル内径を変化させた場合の計算結果を図 3-7 に、ターン数を変化させた場合の計算結果を図 3-8 に示す。電流分流が不均一な場合、コイル内径が小さいほど、ターン数が多いほど電流分流が均一に近づくが、最適転位においては、コイル内径やターン数といったコイル形状に依存せず、均一となることになった。

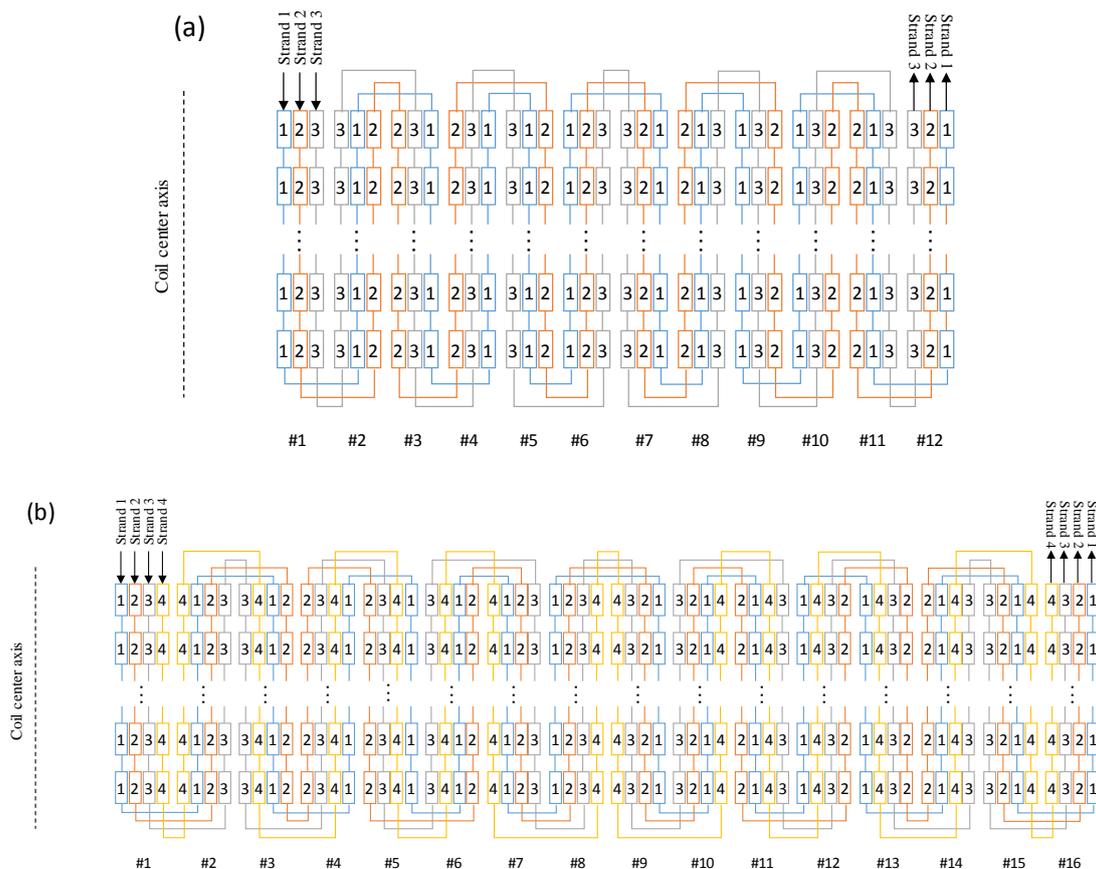
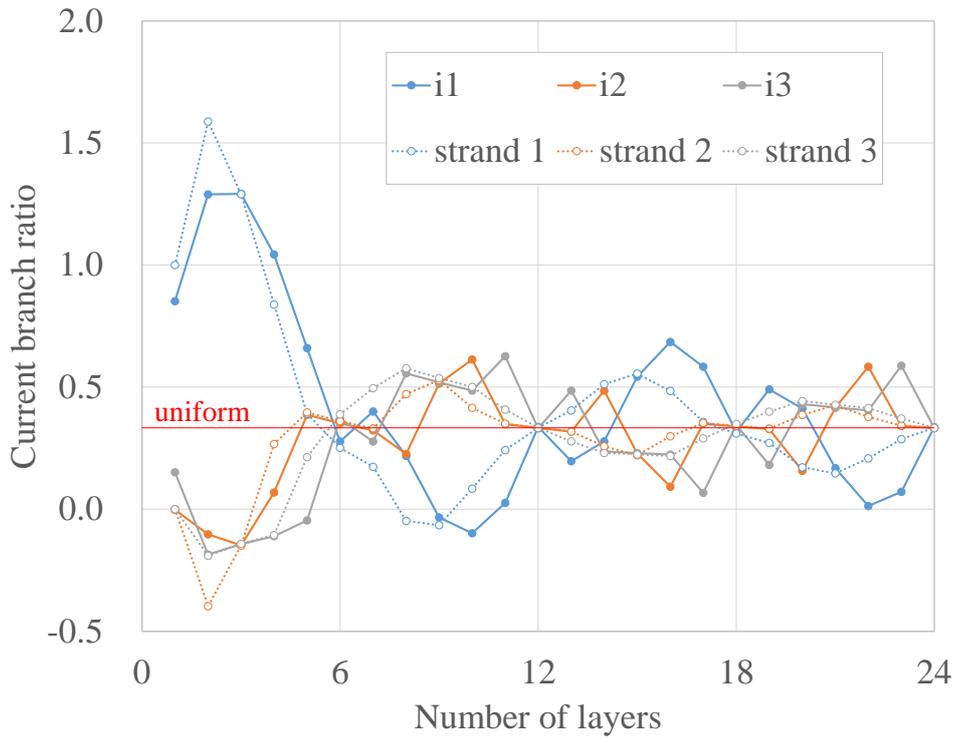
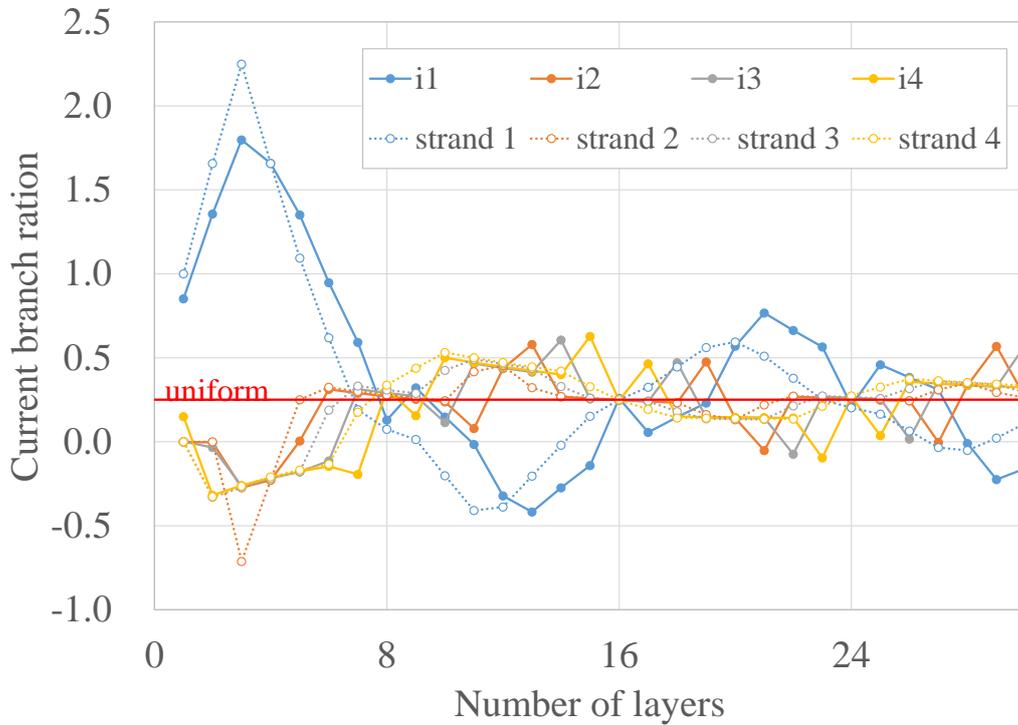


図 3-5. 最適層間転位パターン (a) 3 本並列導体、(b) 4 本並列導体

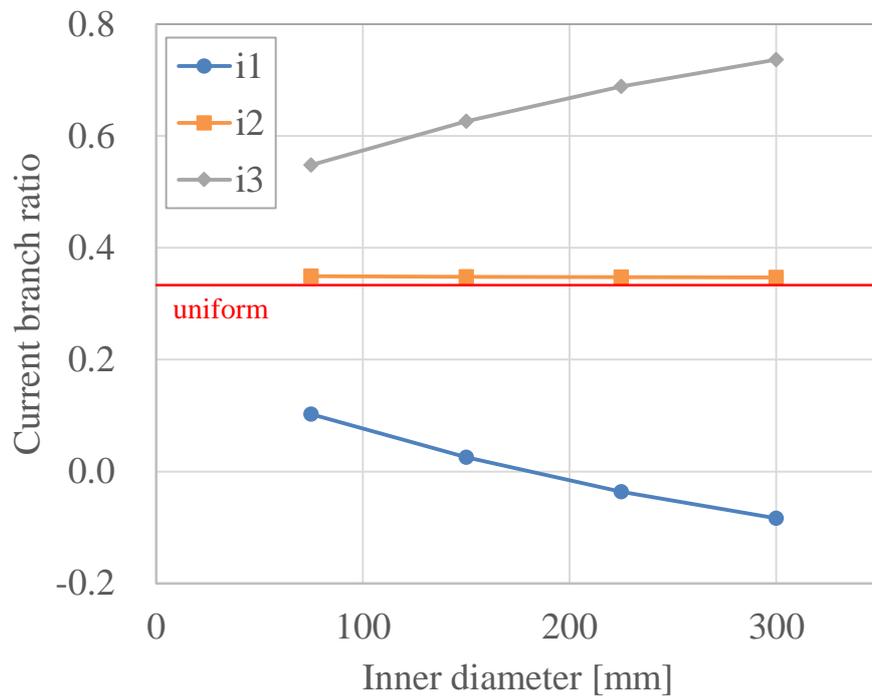


(a) 3本並列導体

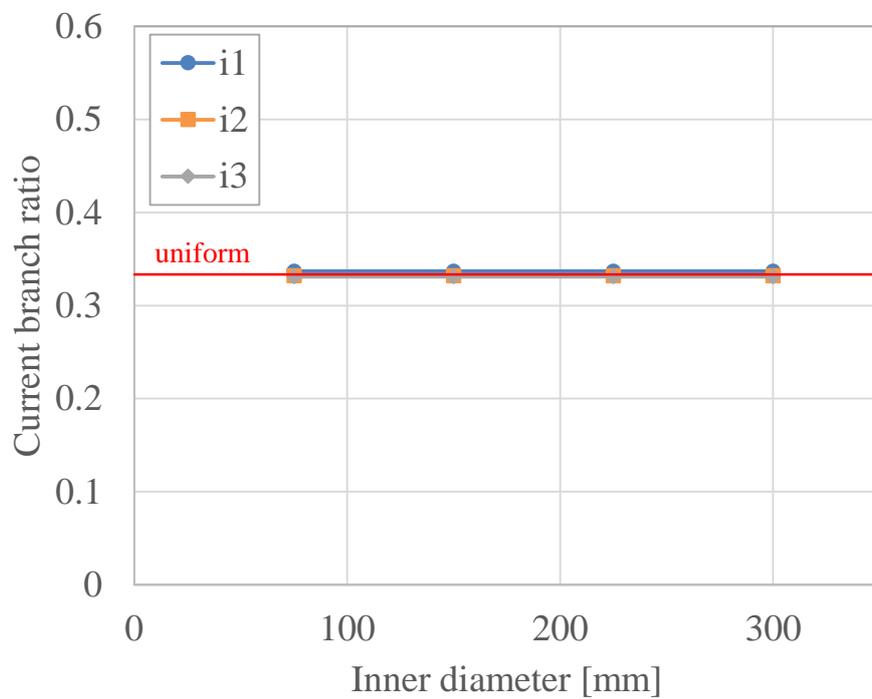


(b) 4本並列導体

図 3-6. 最適層間転位パターンで構成したソレノイドコイルの電流分流比の層数依存性 (破線は無限ソレノイドコイル近似における計算結果)

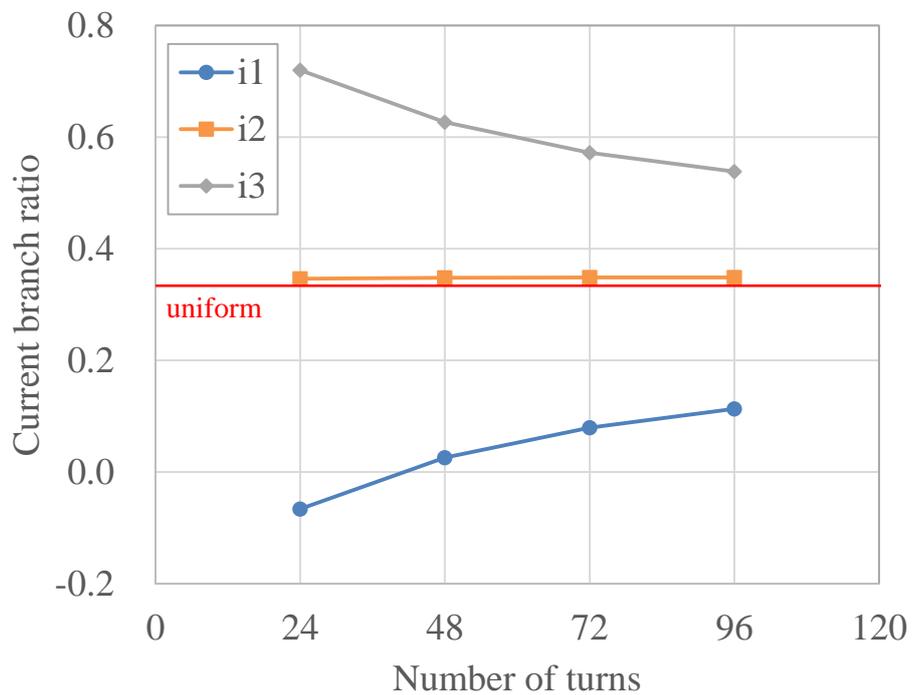


(a) 3 本並列導体 11 層

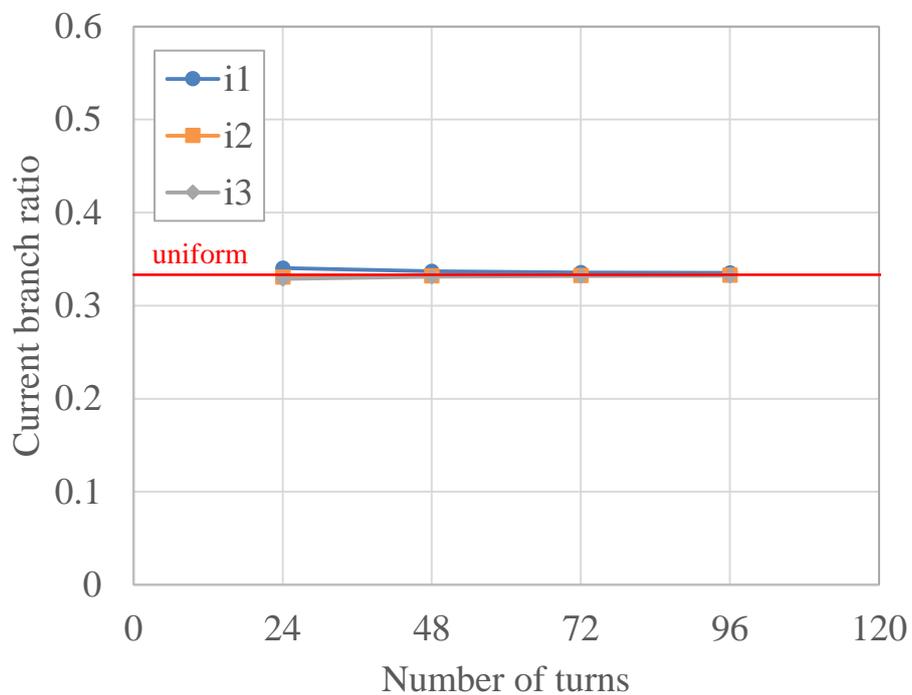


(b) 3 本並列導体 12 層

図 3-7. 最適層間転位パターンで構成したソレノイドコイルの電流分流比のコイル内径依存性



(a) 3 本並列導体 11 層



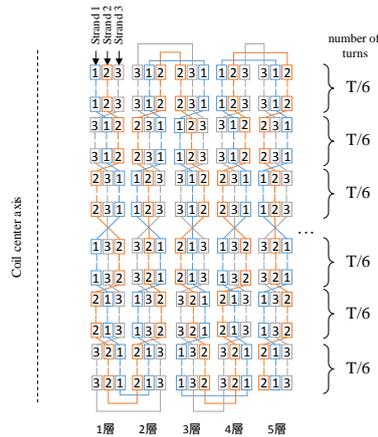
(b) 3 本並列導体 12 層

図 3-8. 最適層間転位パターンで構成したソレノイドコイルの電流分流比のターン数依存性

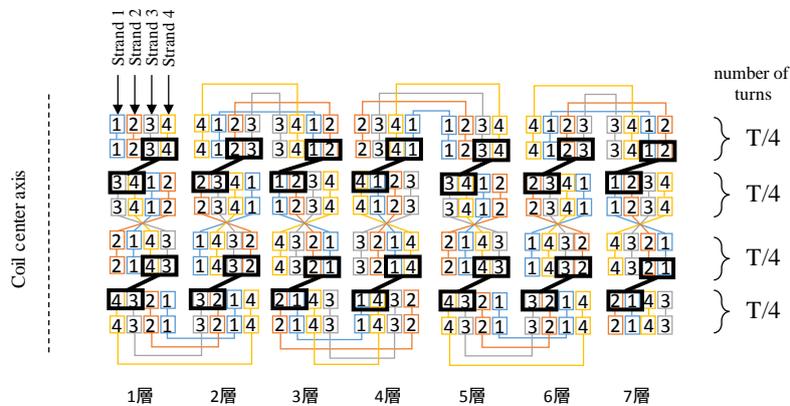
### 3.2.2 最適層内転位パターン

2.3 で提示した最適層内転位パターンについて、単層および最適層内転位を繰り返して多層化した場合の電流分流比の計算を実施した。転位図を図 3-9 に示す。4 本並列導体の場合は、グループ転位を用いて転位回数を削減した。各層における電流分流比の計算結果を図 3-10 に示す。各層でインダクタンスがバランスするため、いずれの層数においても電流分流比が均一になることがわかる。しかしながら、層内における転位回数は、素線数が奇数の場合は  $(2N-1)$  回/層、素線数が偶数の場合は  $(N-1)$  回/層が必要となり、さらに層間でも転位が必要となるため、巻線工程が複雑になる。

また、単層ソレノイドコイルについて、転位を施さない場合と施した場合について、コイル内径およびターン数を変化させ、電流分流比を算出した (図 3-11、図 3-12)。転位を施さない場合は中心の線 (素線 2) にほとんど電流は流れずに、他の 2 本の素線で分担するが不均一となる。この不均一性は、コイル内径が小さくなるほど、また、ターン数が大きくなるほど、増加する。なお、最適層内転位を施した場合は、最適層間転位と同様にコイル内径やターン数によらず均一になることが分かった。

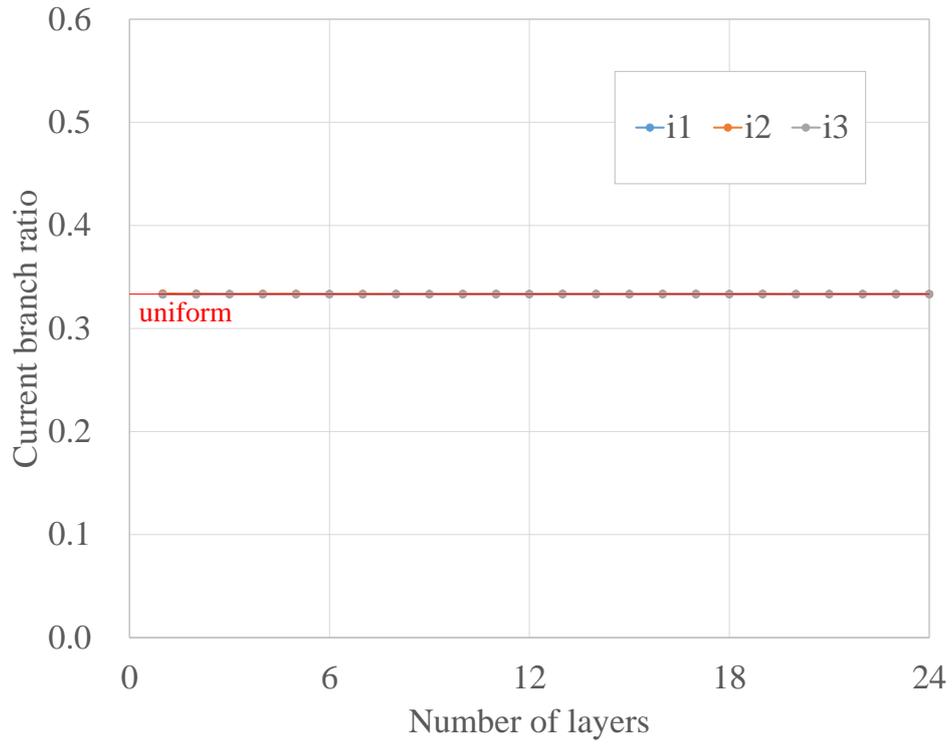


(a) 3 本並列導体

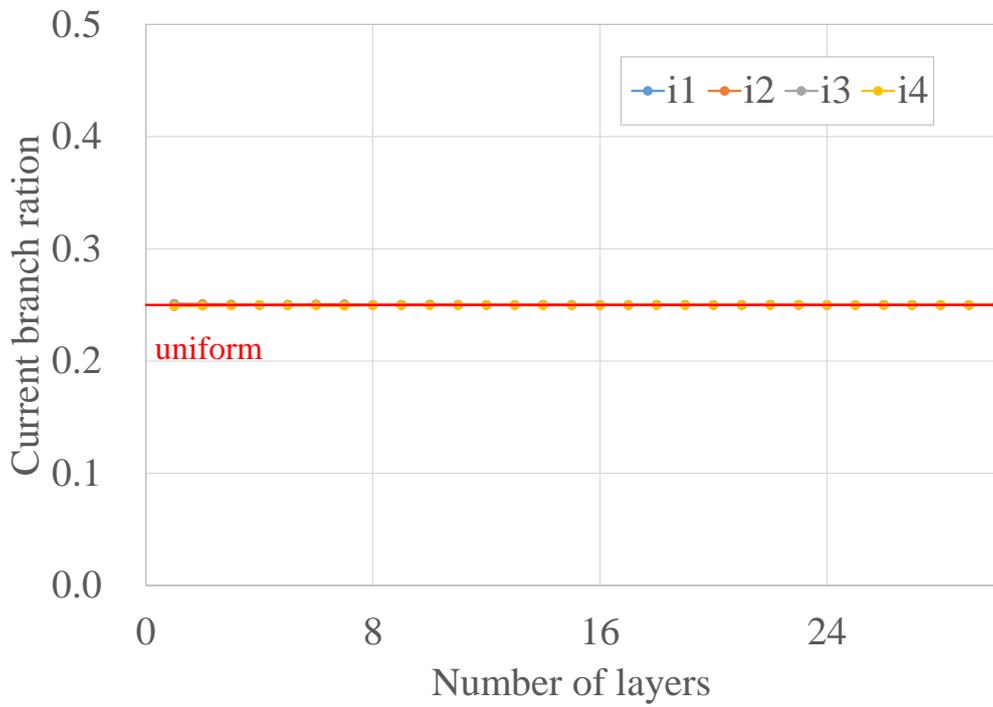


(b) 4 本並列導体、グループ転位

図 3-9. 層内転位パターンで多層化した転位方法

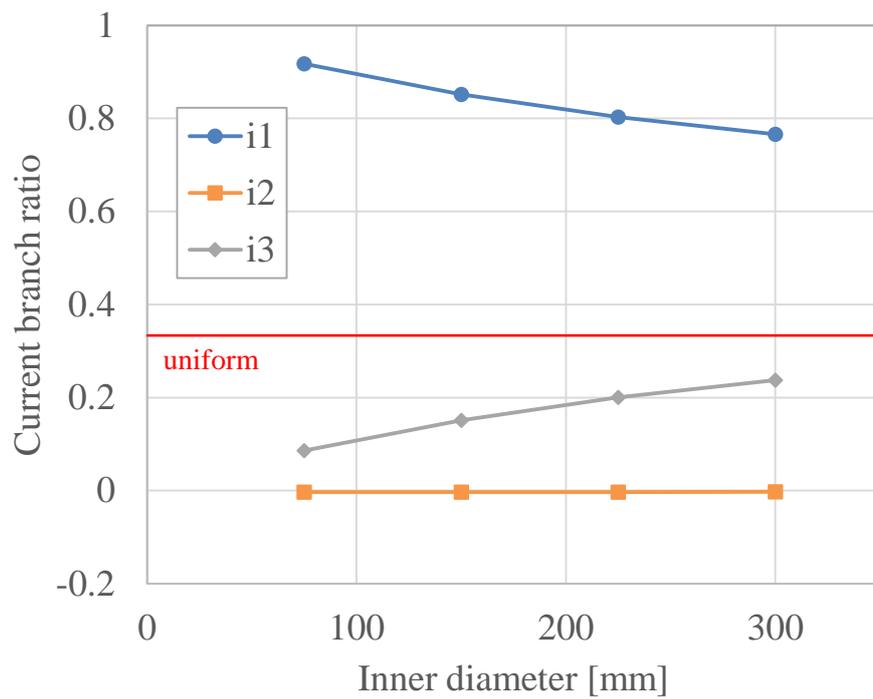


(a) 3本並列導体

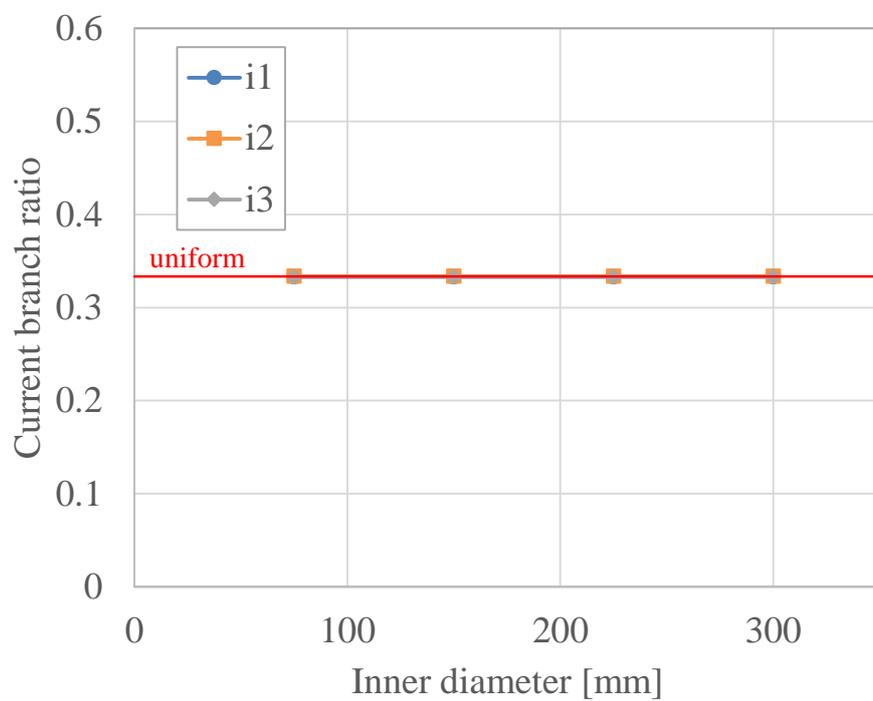


(b) 4本並列導体

図 3-10. 最適層内転位を多層化した場合の電流分流比計算結果

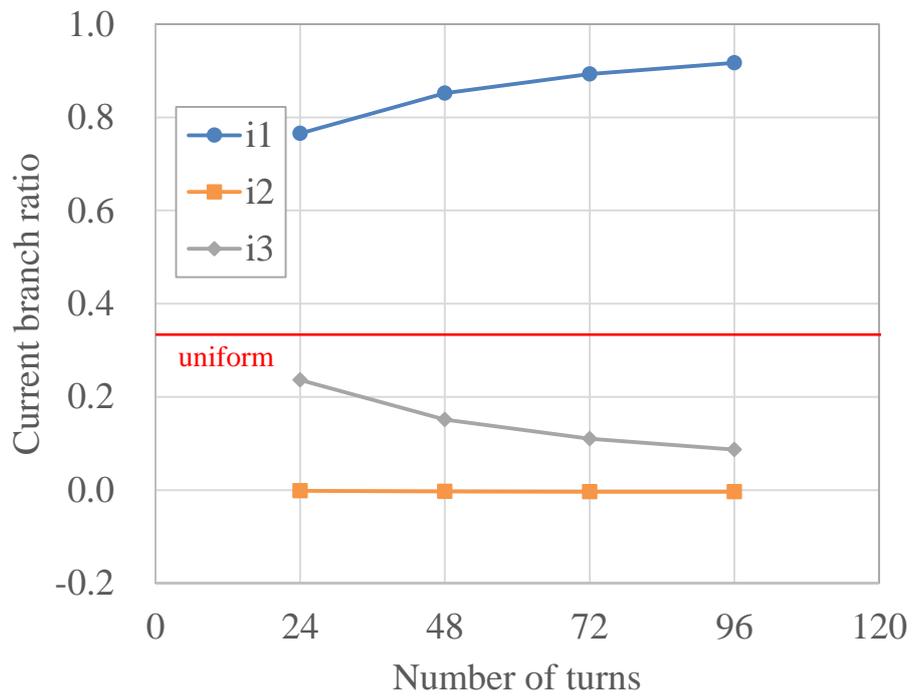


(a) 転位なし

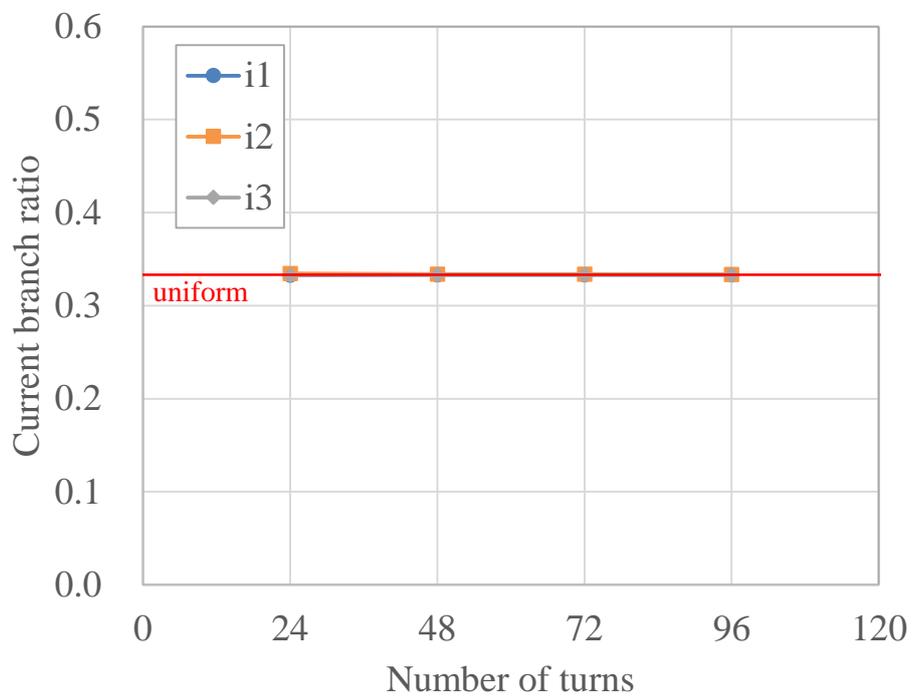


(b) 最適層内転位

図 3-11. 単層ソレノイドコイルのコイル内径依存性



(a) 転位なし



(b) 最適層内転位

図 3-12. 単層ソレノイドコイルのターン数依存性

また、層内における転位箇所の影響を検討するために、図 3-13 に示すように転位スペースを変化させ電流分流比の計算を実施した。転位スペースはblankとして扱い、5 mm ごとにその長さを変化させた。全ての転位箇所の長さを等しく変化させた場合、電流分流比への影響はみられなかった (図 3-14(a))。転位箇所の長さを 1 箇所のみ変化させた場合は、転位スペースが広がるにつれて不均一になる傾向が見られた (図 3-14(b)) が、その影響は微小であることが確認できた。

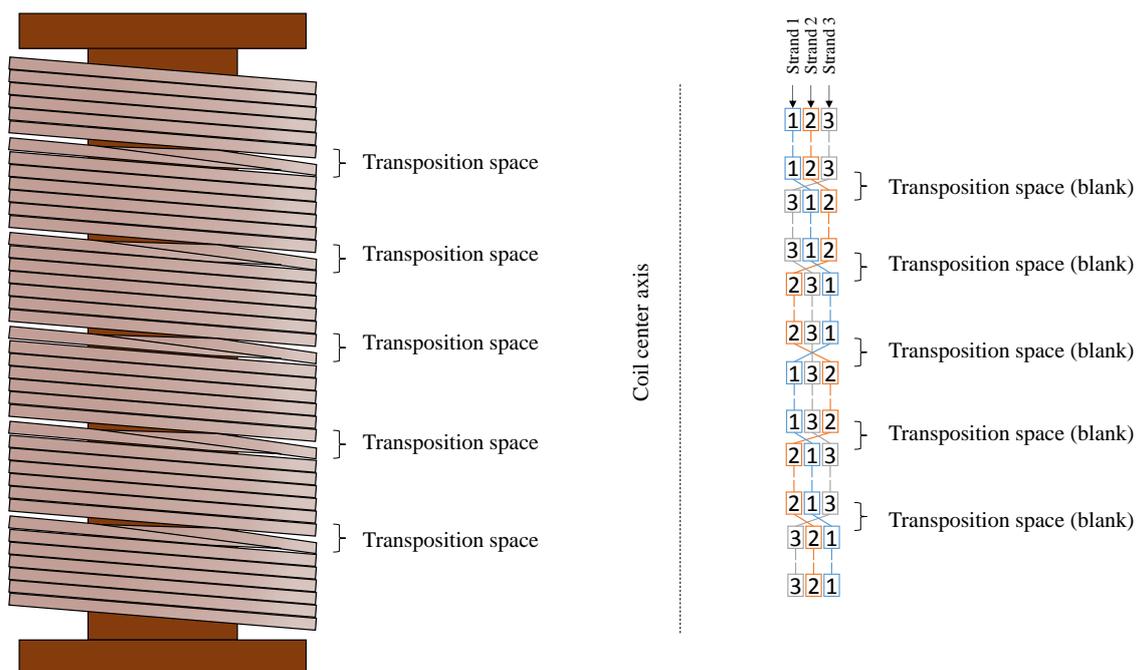
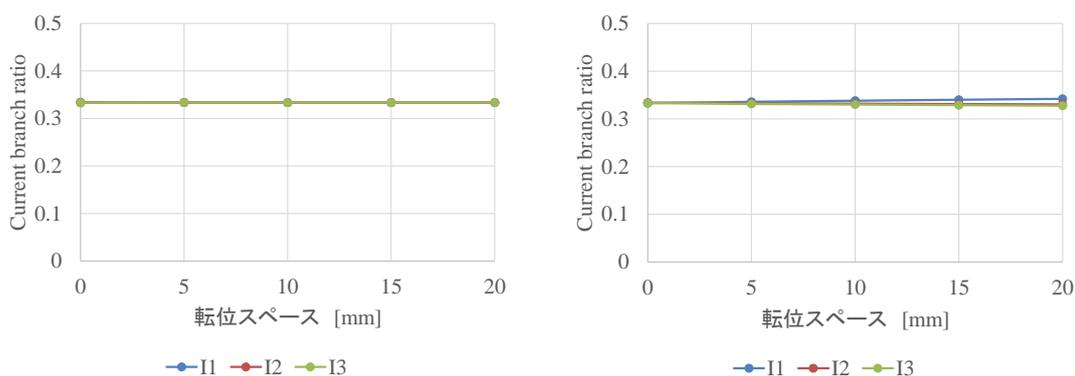


図 3-13. 層内転位ソレノイドコイルの転位スペース

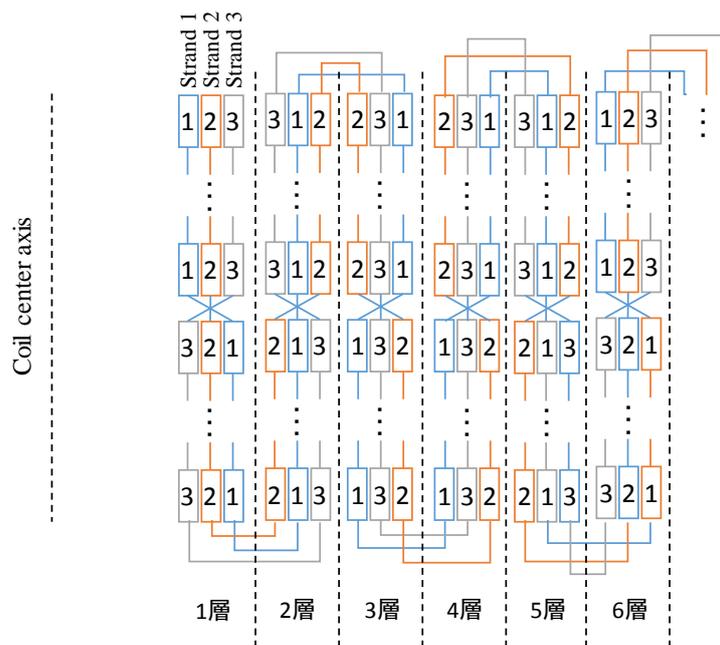


(a) 全ての転位箇所を変化させた場合 (b) 最下部の転位箇所のみを変化させた場合

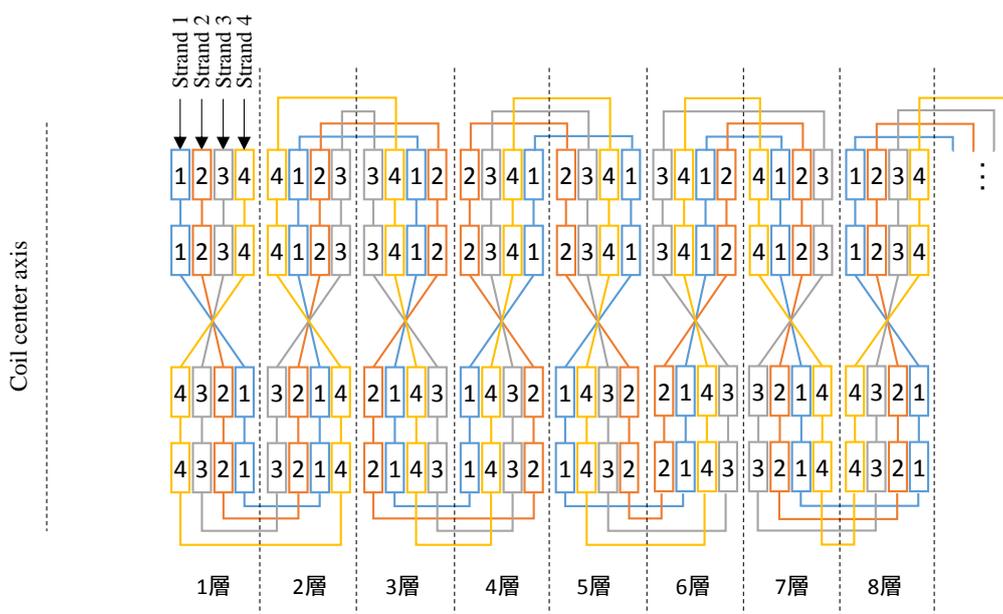
図 3-14. 転位スペースの電流分流比への影響

### 3.2.3 層内全転位を組み込んだ最適層間転位パターン

2.3.2 で提示した層内全転位を組み込んだ最適層間層転位パターンについて、電流分流比の計算を実施した。転位図を図 3-15 に、各層における電流分流比の計算結果を図 3-16 に示す。3 本並列導体の場合について、無限ソレノイドコイル近似における結果を破線で示すが、両者とも素線数の 2 倍の層数で均一になることがわかる。転位回数は、2 倍の層数において、 $(4N-2)$  回となる。

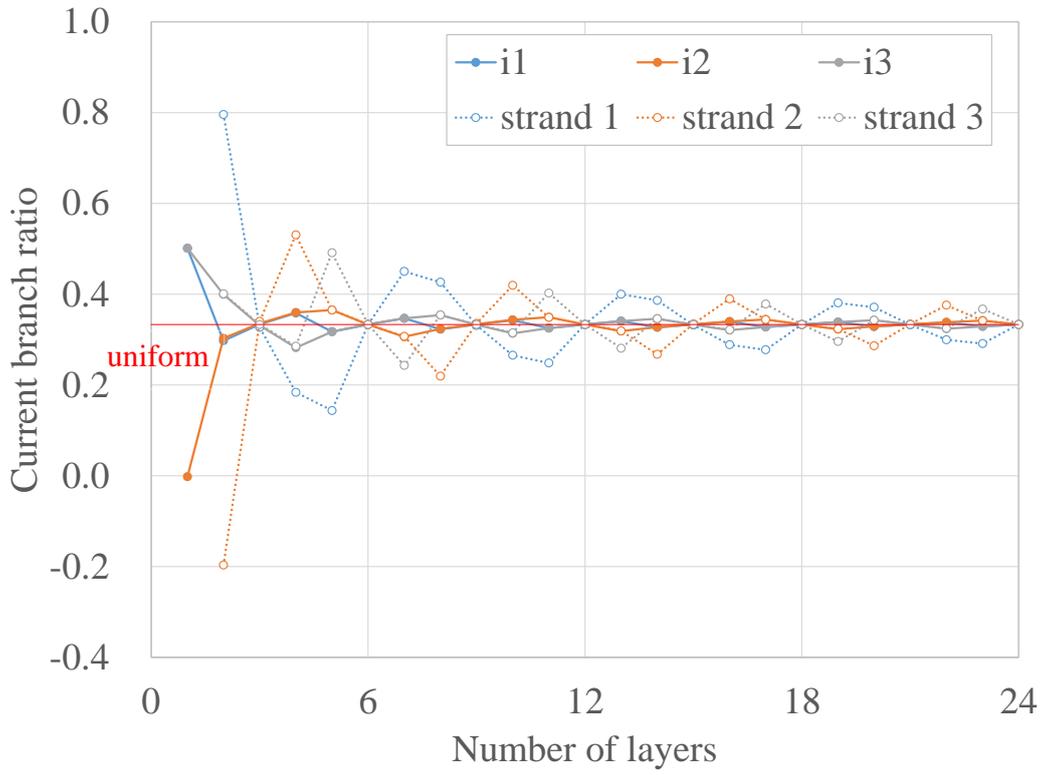


(a) 3 本並列導体

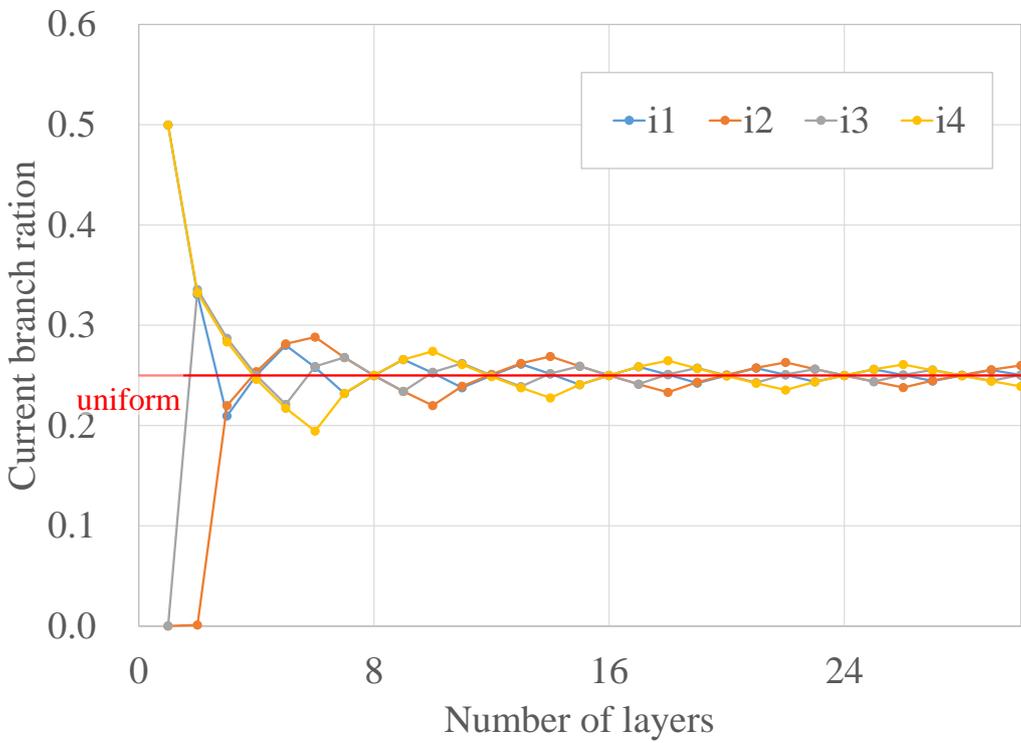


(b) 4 本並列導体

図 3-15. 層内全転位を組み込んだ最適層間転位



(a) 3本並列導体



(b) 4本並列導体

図 3-16. 層内全転位を組み込んだ最適層間転位の電流分流比計算結果

### 3.2.4 任意の層数における最適転位パターン

層間転位のための最適転位には素線数の4倍の層数が必要となる制約がある。そのため、それ以外の任意の層数においては、層内転位を用いる転位パターンを提示した。転位図および転位回数は図3-17に示すとおりである。任意の層数における最適転位を用いて電流分流比を計算した結果を図3-18に示す。いずれの層数においても電流分流比が均一となった。また、3本並列導体11層の場合において、層間転位の場合には図3-7および図3-8で示した通り、電流分流は不均一でコイル内径やターン数の影響を受けたが、最適転位を用いることで、ターン数やコイル内径に依存せず、電流分流比が均一となることがわかった(図3-19)。

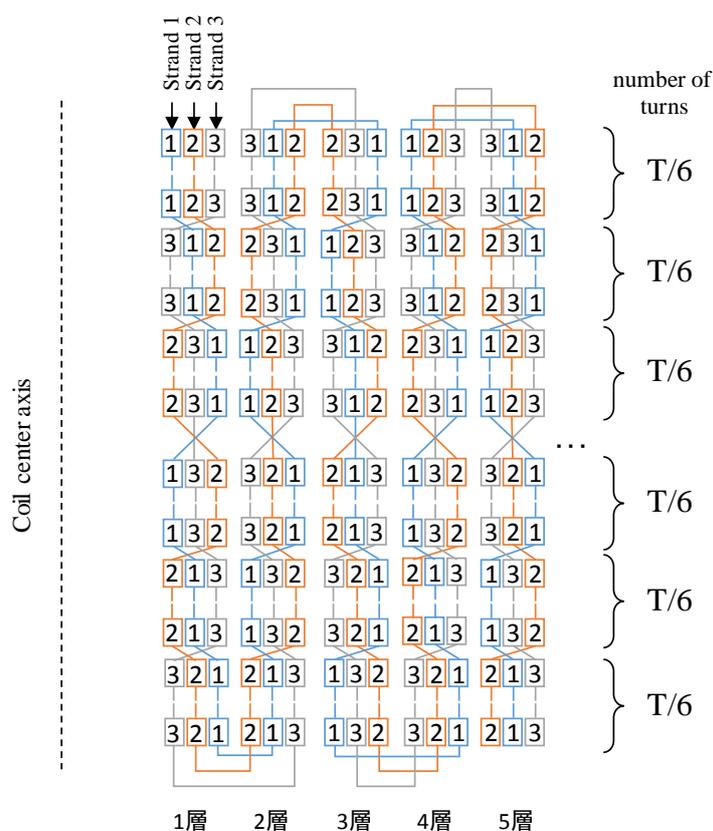


図3-17-(a). (1)  $L < 2N$  : 最適層内転位を繰り返し、層間においても転位する。  
 転位回数 :  $(2NL-1)$ 回 (奇数本)、 $(NL-1)$ 回 (偶数本、グループ転位適用)

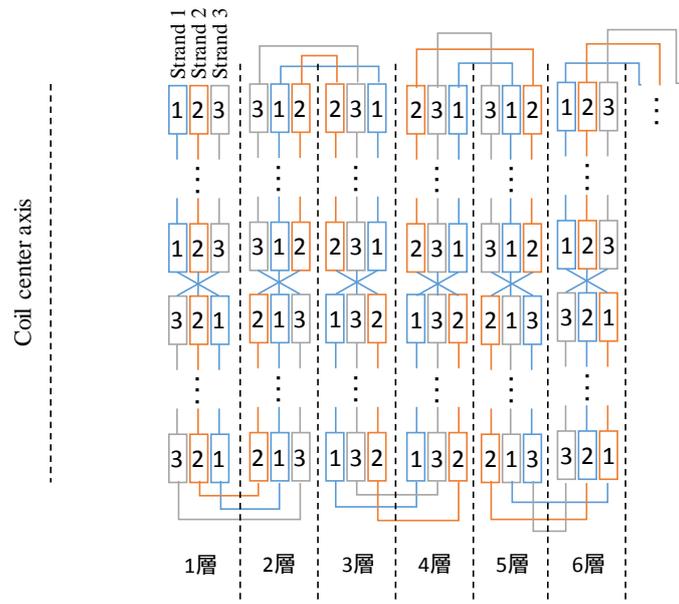


図 3-17-(b). (2)  $L = 2N$  : 層内全転位を組み込んだ最適層間転位  
 転位回数 :  $(4N-2)$ 回

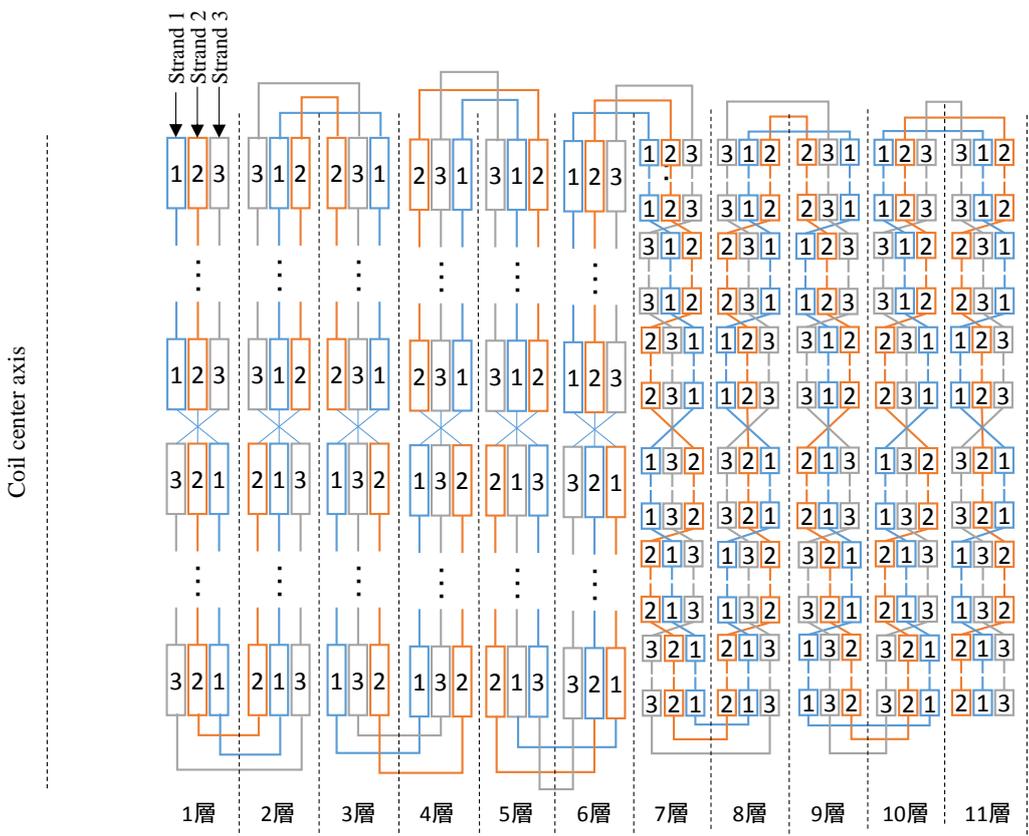


図 3-17-(c). (3)  $2N < L < 4N$  :  $2N$ 層まで全転位を組み込んだ最適層間転位を用い、以降最適層内転位を繰り返す。

転位回数 :  $\{2N(L-2N+2)-3\}$ 回 (奇数本)、 $\{N(L-2N+4)-1\}$ 回 (偶数本)

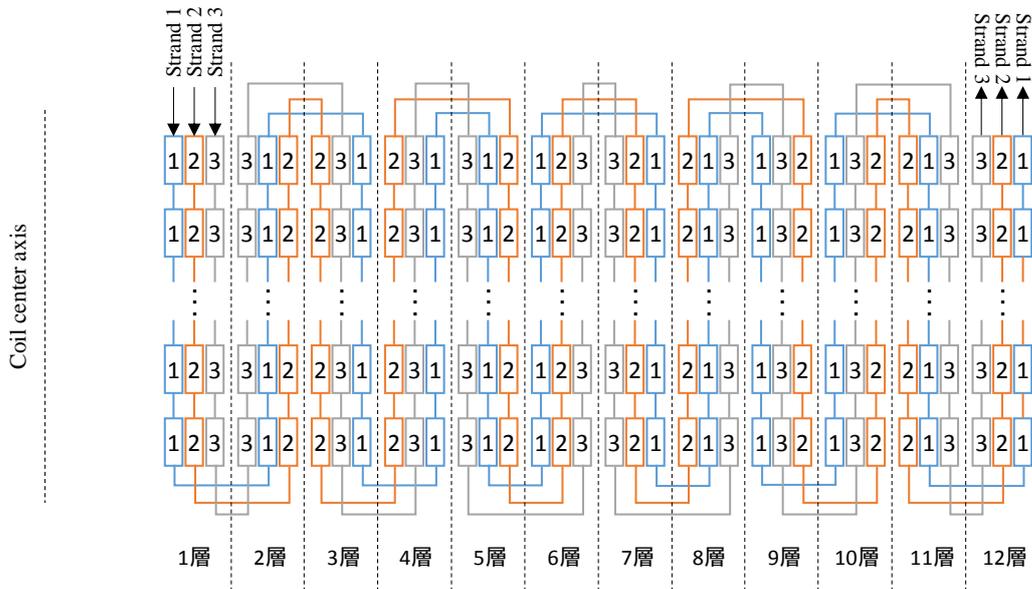


図 3-17-(d). (4)  $L = 4N$  : 最適層間転位を用いる。

転位回数 :  $(4N-3)$ 回

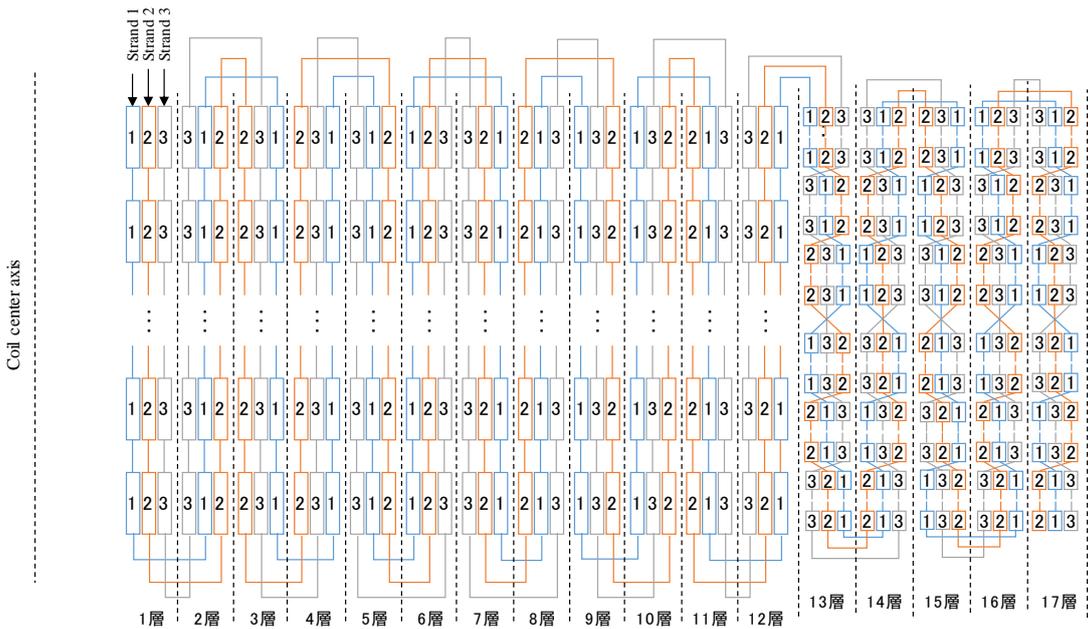


図 3-17-(e). (5)  $4N < L < 6N$  :  $4N$  層まで最適層間転位、

それ以降は最適層内転位を繰り返す

転位回数 :  $\{2N(L-4N+2)-3\}$ 回 (奇数本)、 $\{N(L-2N+4)-3\}$ 回 (偶数本)

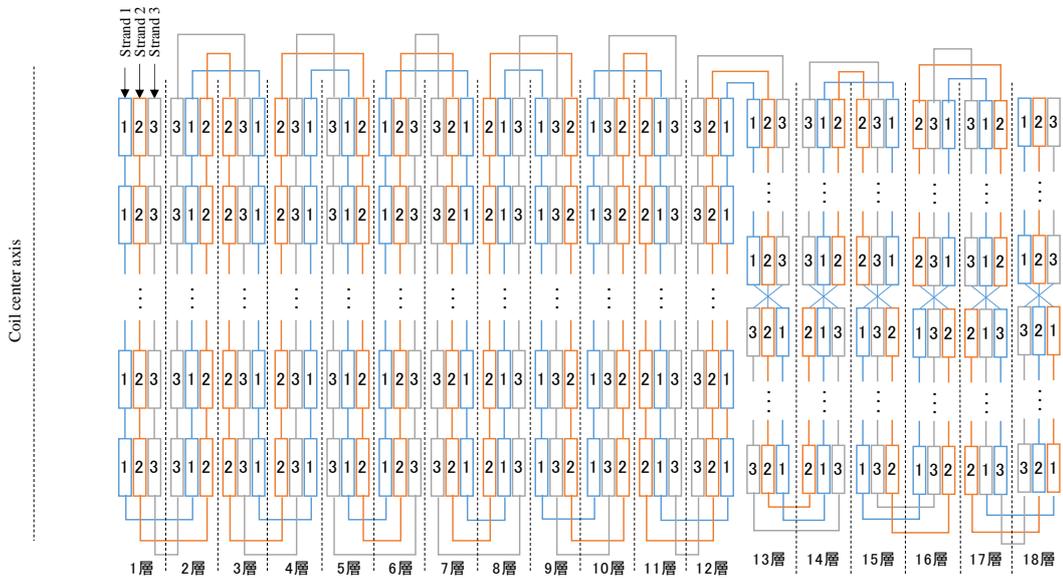


図 3-17-(f). (5)  $L = 6N$  :  $4N$  層まで最適層間転位、  
 $6N$  層まで層内全転位を組み込んだ最適層間転位を施す。  
 転位回数 :  $(8N-4)$ 回

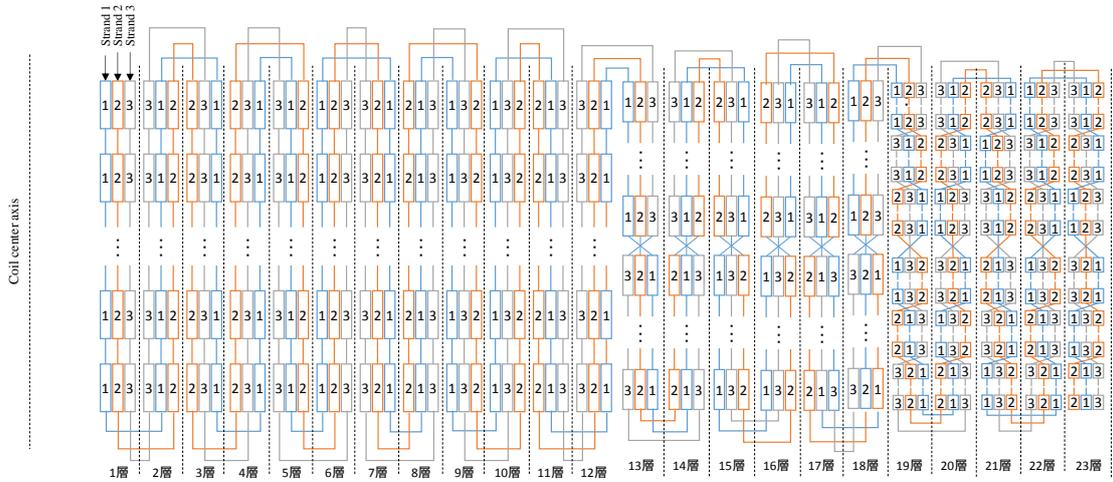
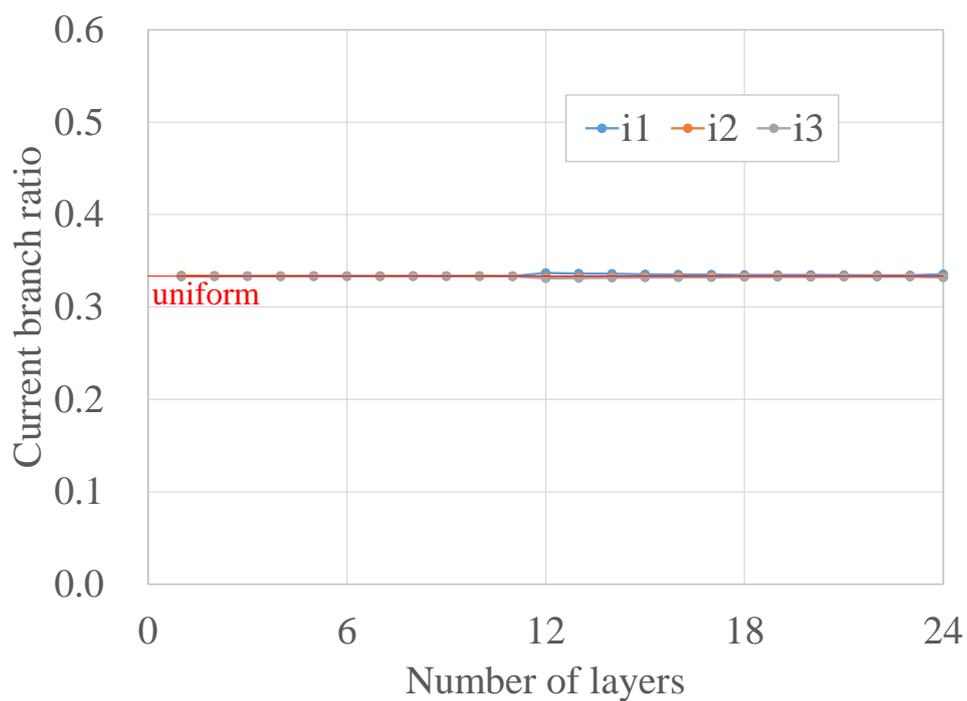
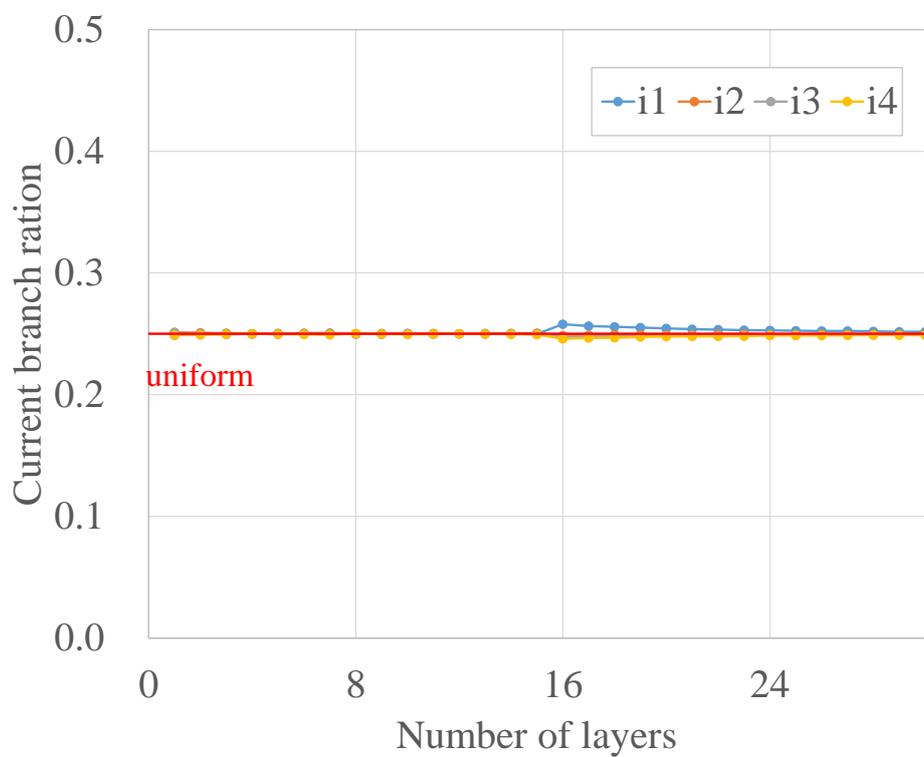


図 3-17-(g).  $6N < L < 8N$  :  $4N$  層まで最適層間転位、 $6N$  層まで層内全転位を組み込んだ最適層間転位、それ以降は最適層内転位を繰り返す。  
 転位回数 :  $\{2N(L-6N+4)-5\}$ 回 (奇数本)、 $\{N(L-6N+8)-5\}$ 回 (偶数本)

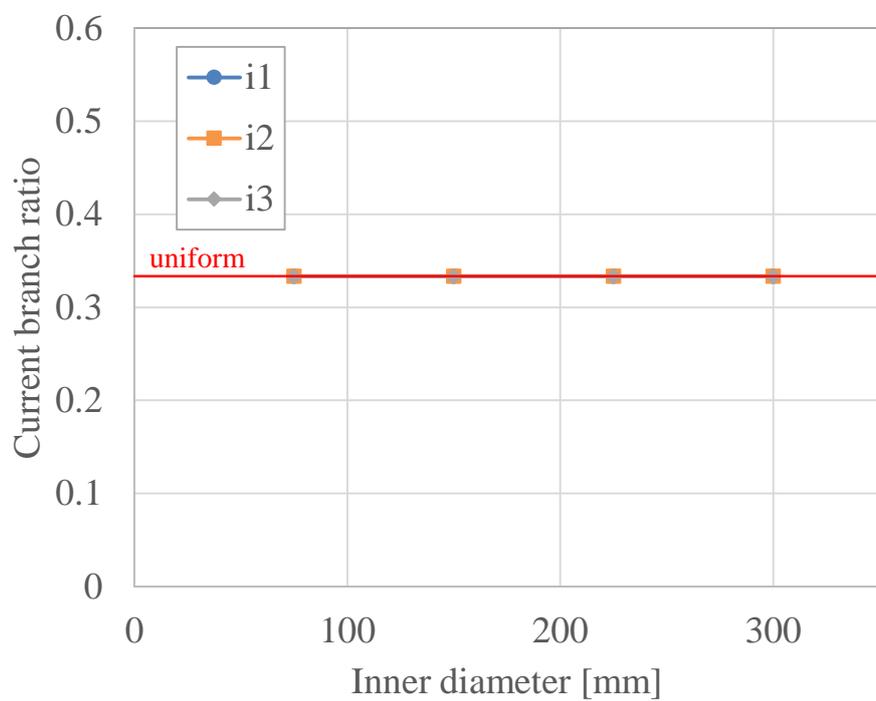


(a) 3 本並列導体

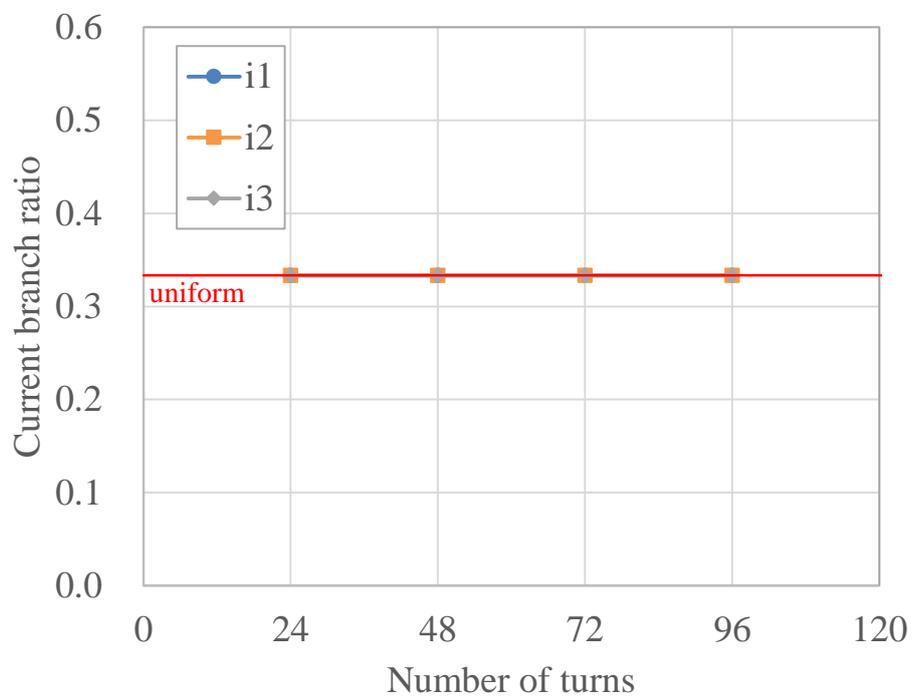


(b) 4 本並列導体

図 3-18. 最適転位を施した電流分流比の層数依存性



(a) コイル内径依存性



(b) ターン数依存性

図 3-19. 最適転位を施した電流分流比のコイル形状依存性 (3 本並列導体 11 層)

### 3.3 超電導コイルによる検証

提示した最適転位パターンおよび本解析の妥当性を確認するため、実際の超電導コイルの電流分流通特性および交流損失特性の評価を実施した。

#### 3.3.1 最適層内転位パターン

最適層内転位を検証するため、表 3-4 に示す超電導コイルを試作した。線材としては高温超電導線材である Bi-2223 を用いた。素線数は 16 本であり、8 重ね 2 並べとして並列導体を構成した。転位図およびコイル外観を図 3-20 に示す。提案しているグループ転位を拡張し、隣り合う 4 本 1 組を 1 つのグループとしたグループ転位を用い、全部で 7 回の転位を施した。

表 3-4. 超電導線材とコイルの緒元

超電導線材	Bi-2223	コイル内径	240 mm
線材幅	2.55 mm	ターン数	64 turns (8turns×8blocks)
線材厚さ	0.18 mm	コイル長	407.9 mm
絶縁厚さ	25 μm	転位回数	7 times
臨界電流値	38 A (77 K) 68 A (66K)	素線数	16 (8 重ね 2 並べ)

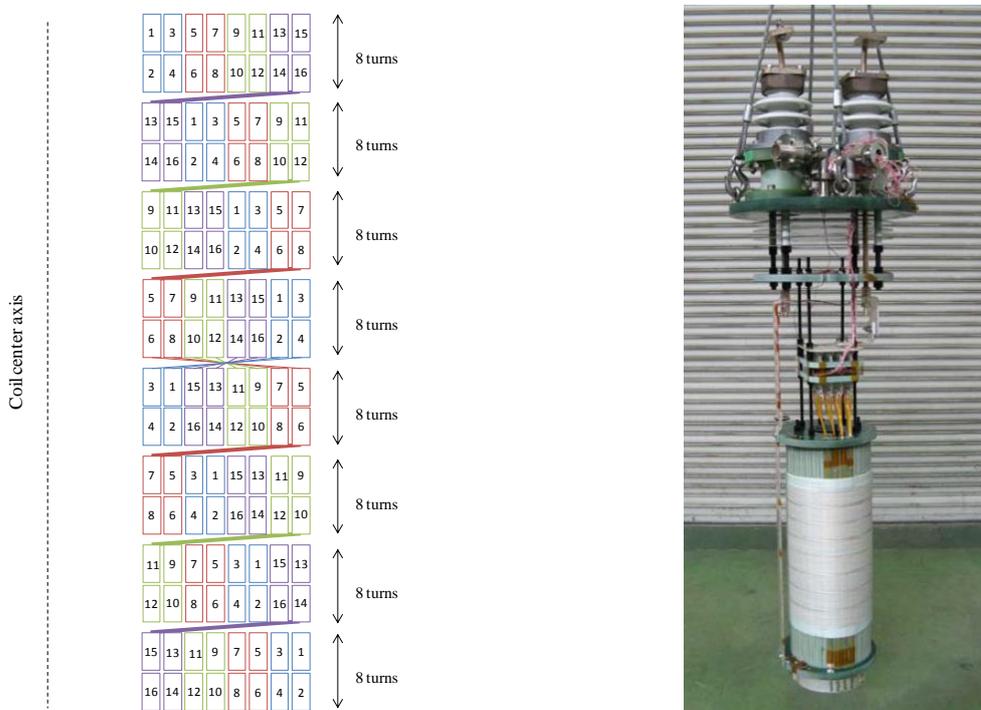
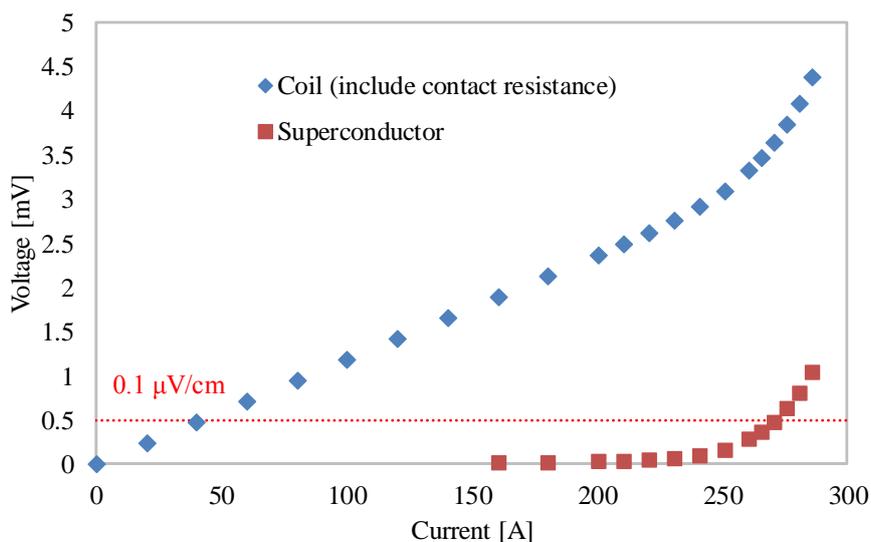
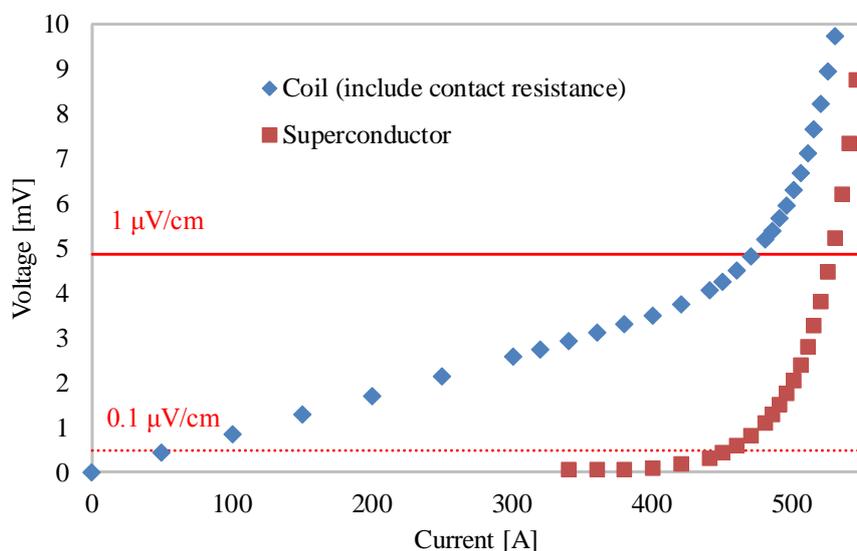


図 3-20. 試作した超電導コイルの転位図と外観

直流通電試験により、超電導コイルの臨界電流値 ( $I_c$ ) を測定した (図 3-21)。超電導部の電圧は接触抵抗を含むコイル電圧から抵抗成分を差し引いて求めた。0.1  $\mu\text{V}/\text{cm}$  基準では、77 K で 270 A、66 K で 455 A であった。1  $\mu\text{V}/\text{cm}$  基準では 66 K で 530 A となった。使用した素線の  $I_c$ - $B$  特性および磁場解析によるロードラインから推測した素線 1 本あたりの臨界電流値は 33 A であり (図 3-22)、それを素線数倍した値 (33 A  $\times$  16 本 = 528 A) とほぼ等しい結果となったことから、巻線工程における素線の損傷はないと判断できる。以上より、交流通電の場合、66 K においては、 $530/\sqrt{2} \approx 375$  Arms が通電可能な実効値となる。



(a) 77 K



(b) 66 K

図 3-21. 超電導コイルの  $I$ - $V$  特性

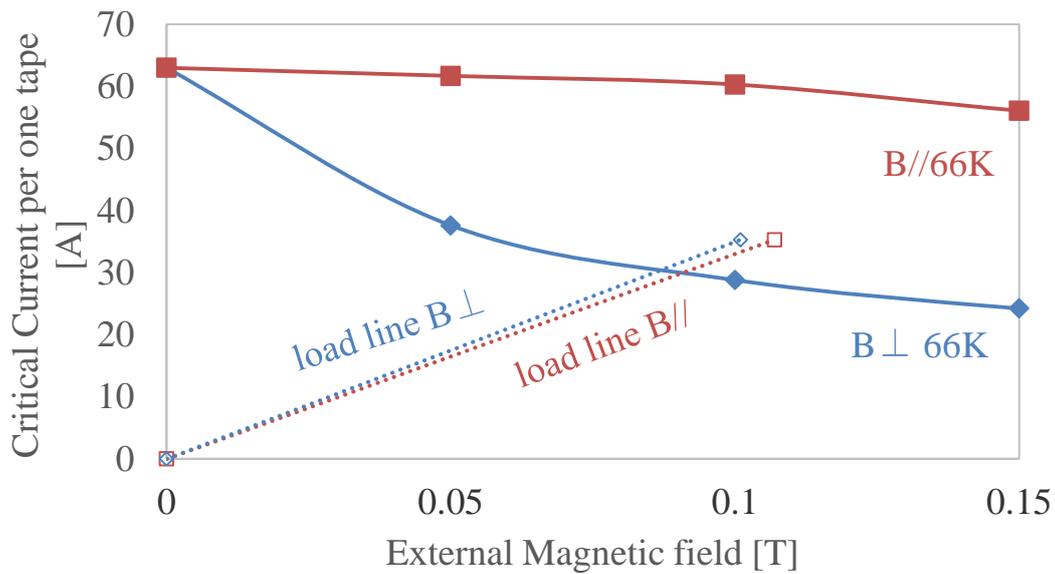


図 3-22. 素線の  $I_c$ - $B$  特性とロードライン (66 K、 $1 \mu\text{V}/\text{cm}$  基準)

電流分流特性および交流損失特性の評価のため、交流通電試験を実施した。各素線の電流分流は、巻線端部にて各素線より引き出したリード線に設置したロゴスキーコイルの発生電圧にて測定した。77 K における電流分流率を表 3-5 に、電流分流特性を図 3-23 に、66 K における電流分流率を表 3-6 に、電流分流性を図 3-24 に示す。電流分流率は、素線電流/(素線電流合計値/16 本) $\times 100\%$ とした。なお、シャントで測定した全電流と素線電流合計値の差異は 0.5 % 以下であることを確認している。

77 K および 66 K の結果から、電流分流は概ね  $\pm 10\%$  以内であることが確認できた。66 K において、350 Arms 付近より様相が変化しているのは、コイル自体の  $I_c$  に近いことから、高温超電導線材の個体差によるものと判断でき、 $I_c$  の低い素線のフラックスフロー抵抗が増大したためである。解析値との比較を図 3-25 に示す。77 K-160 Arms と 66 K-150 Arms は概ね一致している。66 K-350 Arms はこれらから若干ずれが生じ、66 K-500 Arms はフラックスフロー抵抗の影響から変化が大きい。なお、解析値との差は、解析において転位箇所はブランクとしたが、実際には転位のため素線が渡っているため、その影響によるものと考えられる。

表 3-5. 77 K における電流分流率 (シャント電流は Arms)

シャント電流	素線①	素線②	素線③	素線④	素線⑤	素線⑥	素線⑦	素線⑧	素線⑨	素線⑩	素線⑪	素線⑫	素線⑬	素線⑭	素線⑮	素線⑯
161.7	99.9%	99.7%	101.5%	93.1%	101.5%	96.6%	102.0%	99.9%	104.6%	91.7%	108.1%	103.6%	101.1%	93.6%	106.2%	97.0%
142.5	99.4%	99.2%	101.5%	93.2%	101.6%	95.9%	102.4%	100.2%	104.7%	91.6%	108.4%	103.9%	101.4%	93.5%	106.4%	96.5%
121.9	98.8%	98.7%	101.6%	93.1%	101.6%	95.8%	102.8%	100.8%	104.8%	91.0%	108.9%	104.0%	101.8%	93.5%	106.7%	96.1%
101.6	98.2%	98.5%	101.7%	93.0%	101.8%	95.1%	103.2%	100.8%	105.2%	90.6%	109.2%	104.0%	102.4%	93.6%	107.3%	95.5%
82.9	98.0%	98.0%	101.9%	92.8%	101.7%	94.7%	103.7%	101.0%	105.5%	90.3%	109.5%	104.1%	102.8%	93.3%	107.6%	95.2%
60.9	97.5%	98.0%	101.8%	92.3%	101.9%	94.3%	104.0%	100.7%	105.9%	90.0%	109.8%	103.8%	103.5%	93.1%	108.4%	94.8%
41.6	97.4%	97.9%	101.9%	91.9%	102.4%	94.5%	104.5%	100.3%	106.2%	89.7%	110.3%	103.9%	103.9%	92.9%	109.2%	93.4%
20.2	97.2%	97.7%	100.1%	94.2%	103.2%	95.7%	103.1%	99.5%	107.0%	90.0%	109.9%	103.5%	103.8%	92.0%	109.4%	93.6%

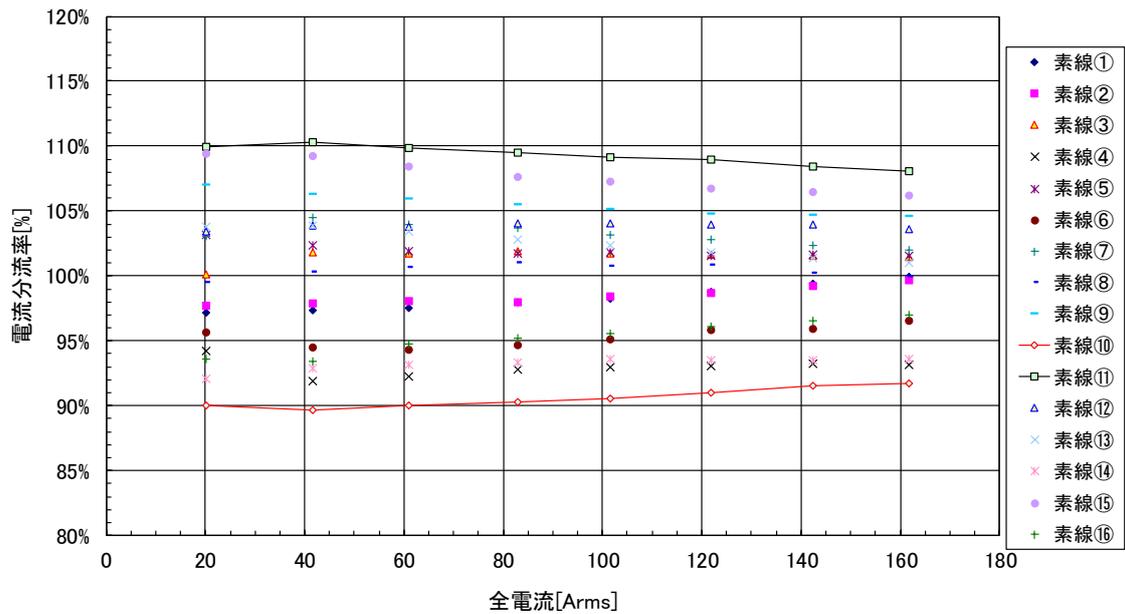


図 3-23. 電流分流特性 (77K, 50 Hz)

表 3-6. 66 K における電流分流率 (シャント電流は Arms)

シャント電流	素線①	素線②	素線③	素線④	素線⑤	素線⑥	素線⑦	素線⑧	素線⑨	素線⑩	素線⑪	素線⑫	素線⑬	素線⑭	素線⑮	素線⑯
503.6	101.6%	100.4%	107.2%	100.9%	103.2%	99.9%	100.4%	98.4%	101.4%	92.5%	102.1%	99.4%	98.0%	98.3%	98.5%	97.6%
453.7	100.6%	99.2%	107.3%	100.1%	103.0%	99.9%	100.0%	98.5%	102.5%	93.1%	103.4%	100.1%	98.8%	98.2%	98.4%	96.9%
402.8	99.6%	98.0%	106.2%	98.1%	102.2%	99.1%	99.9%	97.7%	103.8%	93.5%	105.2%	101.3%	101.0%	97.5%	100.2%	96.8%
351.3	100.1%	99.7%	103.5%	95.0%	101.5%	97.1%	101.1%	98.4%	104.4%	93.5%	106.1%	102.5%	102.2%	95.0%	102.8%	97.1%
299.5	100.2%	100.2%	101.5%	93.7%	101.6%	96.3%	101.8%	99.3%	104.5%	92.4%	107.7%	103.6%	101.1%	93.5%	105.6%	97.1%
251.2	99.5%	99.7%	101.6%	93.7%	101.6%	95.9%	102.5%	100.1%	104.6%	91.8%	108.2%	103.9%	101.3%	93.4%	106.1%	96.3%
203.6	98.6%	98.9%	101.7%	93.6%	101.6%	95.1%	103.0%	100.6%	105.0%	91.3%	108.9%	104.2%	101.9%	93.5%	106.4%	95.8%
153.4	97.8%	98.4%	101.8%	93.4%	101.7%	94.6%	103.6%	100.8%	105.3%	90.7%	109.3%	104.3%	102.7%	93.4%	107.2%	94.9%
101.2	97.4%	98.2%	101.8%	92.7%	102.0%	94.2%	104.3%	100.4%	106.0%	90.5%	109.8%	104.0%	103.5%	93.0%	108.2%	93.9%
50.1	97.3%	98.5%	101.2%	91.5%	102.9%	94.0%	104.4%	99.8%	106.6%	90.2%	110.6%	103.6%	104.2%	92.5%	109.5%	93.3%

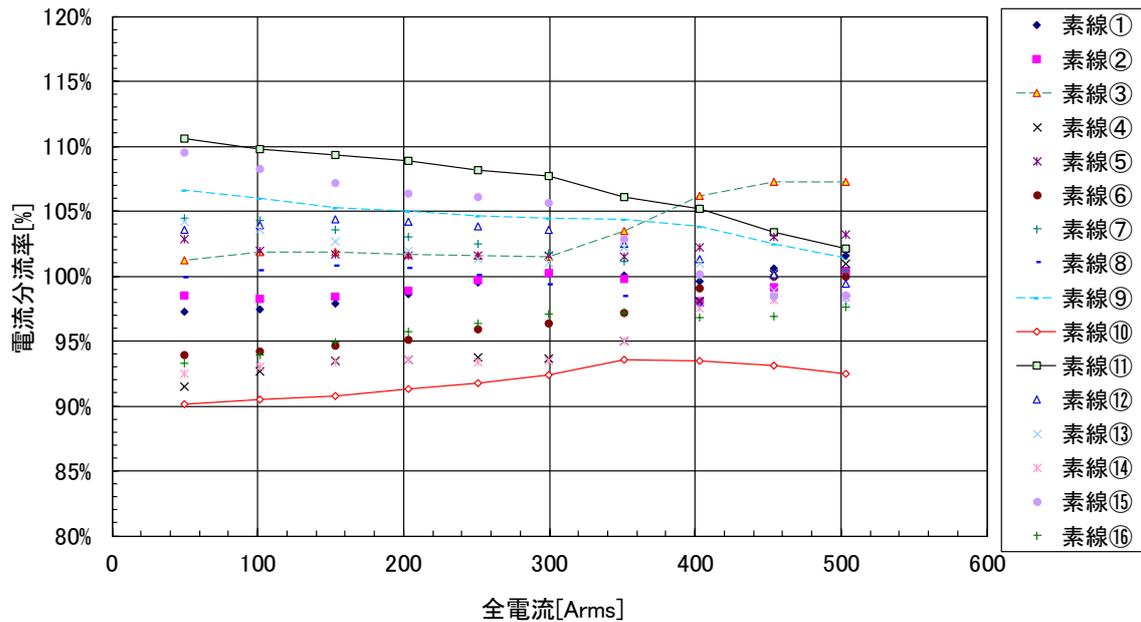
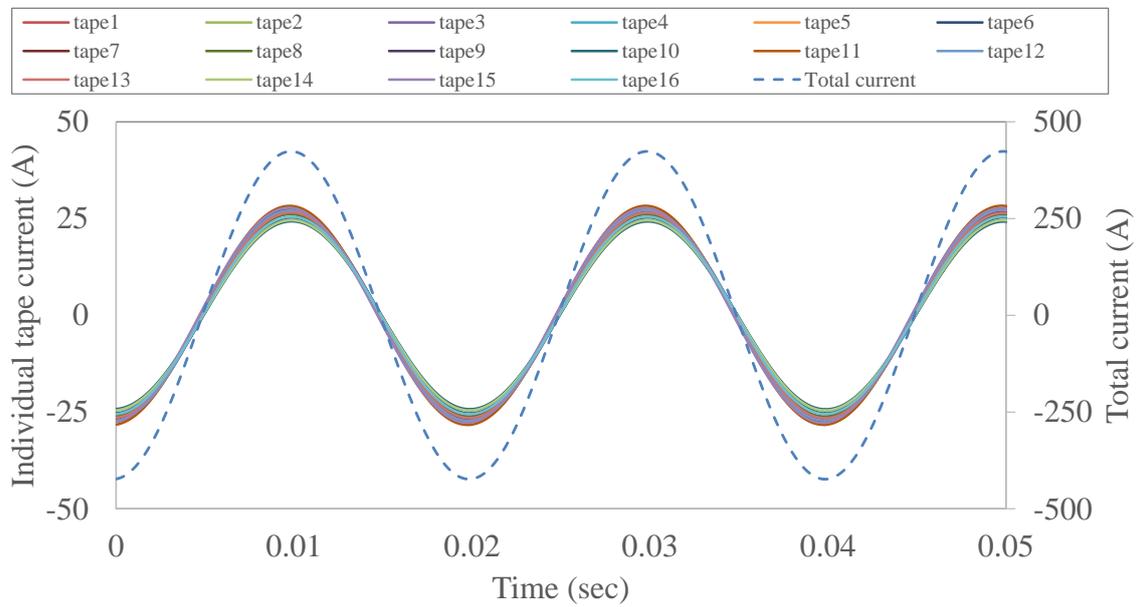
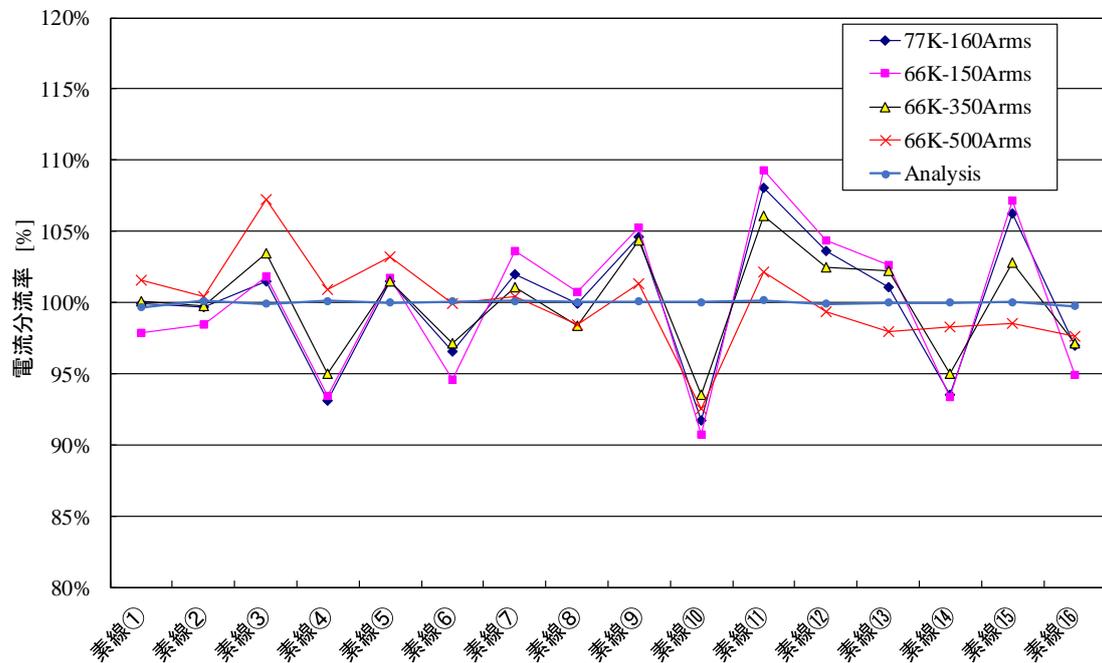


図 3-24. 電流分流特性 (66 K, 50 Hz)



(a) 各素線の電流波形 (66 K-300 Arms)



(b) 電流分流量の測定値と解析値との比較

図 3-25. 交流通電試験結果

交流損失特性を図 3-26 に示す。解析値については、超電導コイルの磁場分布特性と素線の垂直および平行磁場成分に対する交流損失特性から算出した。350 Arms 付近から損失が増大しているが、これはフラックスフロー抵抗の影響であり、それ以下では解析値とほぼ一致している。よって、遮蔽電流による付加的な交流損失は発生していないと判断でき、並列導体化に伴う交流損失は発生していないことを確認した。

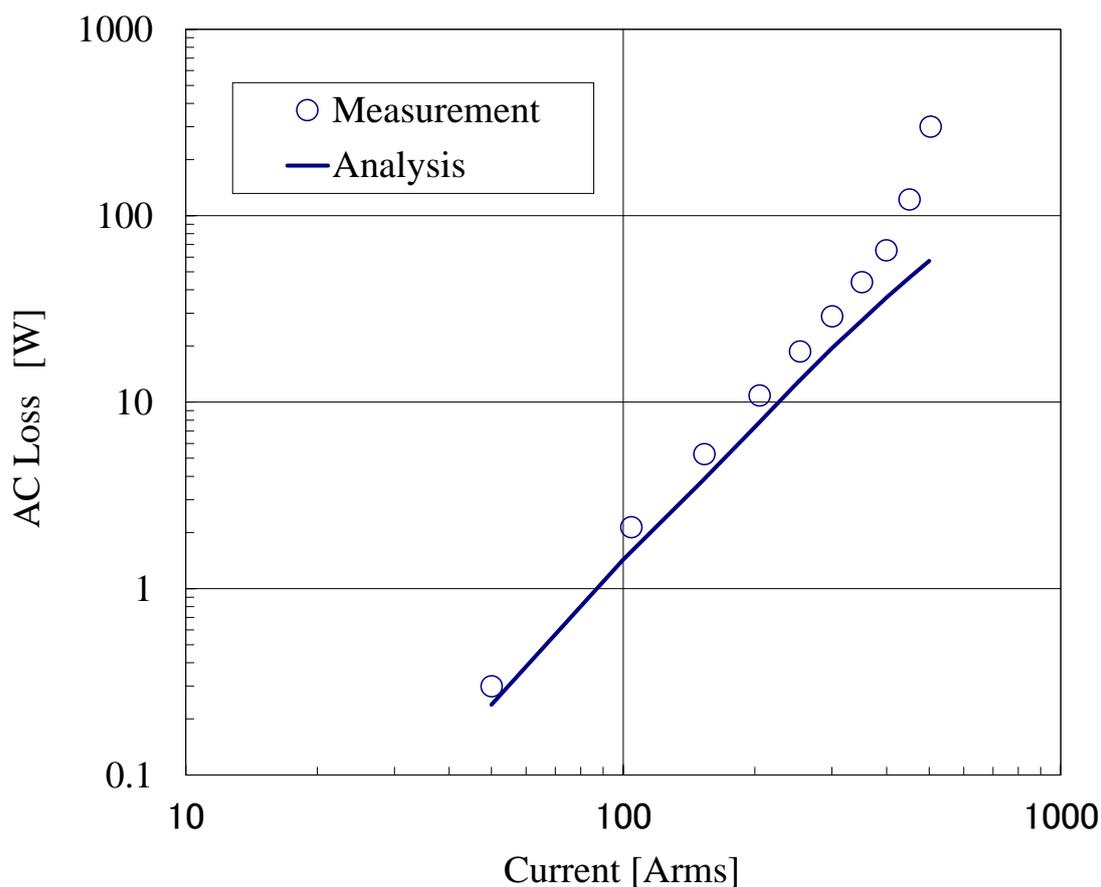


図 3-26. 交流損失特性 (66 K、50Hz)

### 3.3.2 最適層間転位パターン<sup>2)3)</sup>

文献 2)では、最適層間転位を用いた超電導コイルが製作され、電流分流特性と交流損失特性の観測がなされている。4本並列導体を用いた16層の超電導コイルの諸元を表 3-7 に、転位図を図 3-27 に示す。60 Hz で 18.5 Arms を通電したときの電流分流比の測定結果は、解析値とほぼ一致し、均流化が実現できていることが示されている (図 3-28)。

表 3-7. 超電導コイルの諸元

超電導線材	NbTi
コイル内径	60 mm
コイル外径	95 mm
ターン数/層	30 turns
コイル長	34 mm
層数	16

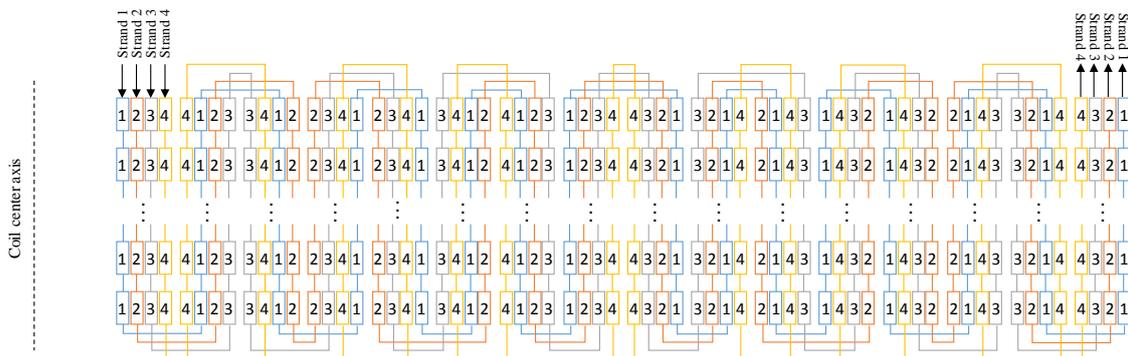


図 3-27. 4 本並列導体を用いた超電導コイルの転位図

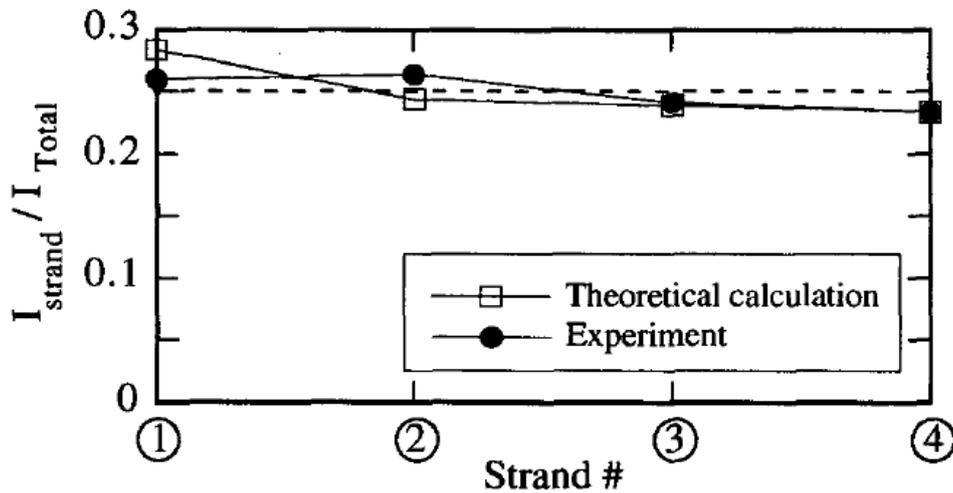


図 3-28. 4 本並列導体を用いた超電導コイルの電流分流比<sup>2)</sup>

また同文献において、Bi-2223 超電導線材を用いたパルスコイルにより交流損失が評価されている。使用された超電導線材およびパルスコイルの仕様を表 3-8 に示す。241 A 通電時に中心磁場 1 T、蓄積エネルギー 220 J の SMES 用のテストコイルであり、磁場分布から、40 K 下における 2T/s (振幅 1 T、周波数 1 Hz の三角波) 掃引時の交流損失は 7.2 W と見積

もられた。三角波および正弦波において交流損失が測定され、交流損失の振幅依存性を図 3-29 に示す。交流損失は、振幅の 2 乗にほぼ比例し、周波数でわずかに増加した。正弦波の交流損失が三角波の交流損失よりも大きいのは、前者の場合、peak to peak の振幅が後者の場合の約 2 倍であるためである。2 T/s 掃引時 (1 Hz Tri) の交流損失は 10.6 W であり、設計値 (7.2 W) に近い値となり、遮蔽電流による付加的な交流損失は発生していないことが示されている。

表 3-8. 超電導線材およびパルスコイルの仕様

Bi-2223 超電導線材		パルスコイル	
幅	3.4, 3.4, 3.7, 3.7 mm	コイル内径	52 mm
厚さ	0.25 mm	コイル外径	111 mm
母材	Ag-1% Mn/Ag-0.5%Sb	コイル長	120 mm
フィラメント数	61	層数	16
銀比	3.2, 3.0, 2.9, 2.7	インダクタンス	7.58 mH
ツイストピッチ	$\infty$	動作電流	241 A
I <sub>c</sub> (77K,0T)	36, 37, 45, 46 A	動作温度	40 K

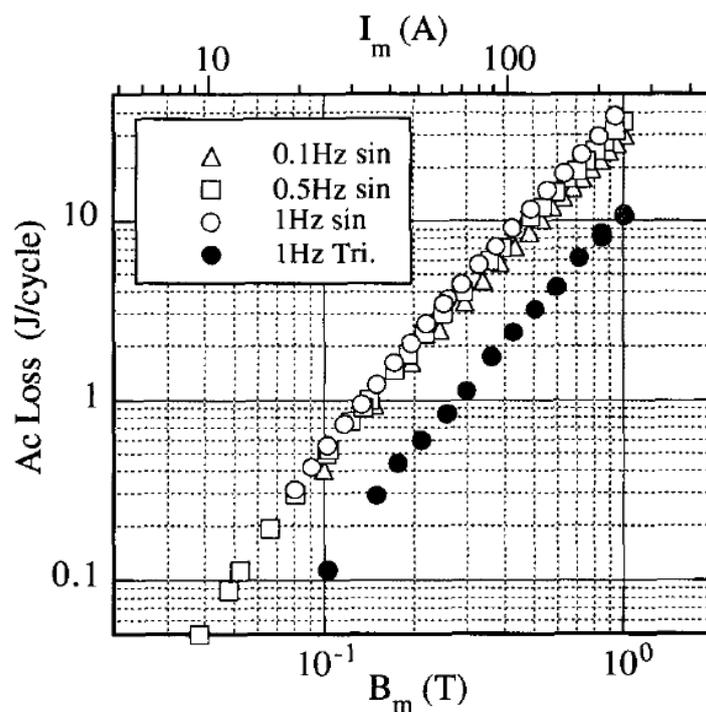


図 3-29. 交流損失特性 (4 本並列導体、16 層パルスコイル) <sup>2)</sup>

同様に、文献 3)においては、6 本並列導体を用いた 24 層パルスコイルの実験結果が報告されている。提案した最適層間転位パターンを用い、測定した交流損失特性は解析値とよく一致しており（図 3-30）、遮蔽電流による付加的な交流損失が発生していないことが報告されている。

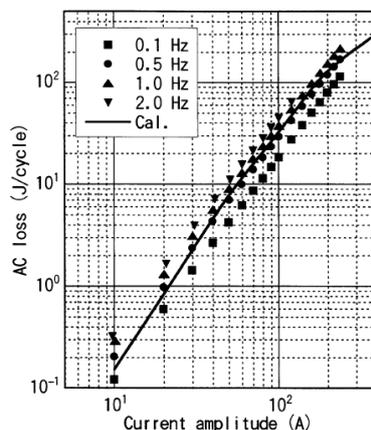


図 3-30. 交流損失特性（6 本並列導体，24 層パルスコイル）<sup>3)</sup>

### 3.4 まとめ

無限長ソレノイドコイル近似で提示した最適転位パターンについて、実際の有限長ソレノイドコイルとして、高温超電導線材の寸法を参照し、素線 1 ターンを 1 つのインダクタンス要素として数値解析を実施した。最適転位パターンを用いることで、ターン数やコイル内径に依存せずに電流分流比が均一となり、それが任意の層数で実現できることを示した。

また、最適層内転位を用いた単層ソレノイドコイルの試作とその評価結果、および最適層間転位による超電導コイルの試験結果を参考文献より参照することで、最適転位パターンにより、均一な電流分流比であること、並列導体化に伴う交流損失は発生していないことを確認した。以上より、高温超電導転位並列導体により、低損失で大電流容量の超電導巻線が実現できることを示した。

### 参考文献

- 1) Frederick W. Grover “Additions to the formulas for the calculation of mutual and self inductance,” Bulletin of the Bureau of Standards, vol.14 (1981) pp.537-570
- 2) M. Iwakuma, et al., “Development of a 1T Cryocooler-Cooled Pulse Coil with a Bi2223 Superconducting Parallel Conductor for SMES”, IEEE Trans. Appl. Supercond, Vol.9, No.2, JUNE 1999
- 3) M. Iwakuma, et al., “Ac Loss Properties of a 4 kJ Conduction-Cooled Pulse Coil Wound With a Bi2223 6-Strand Parallel Conductor for SMES”, IEEE Trans. Appl. Supercond, Vol.13, No.2, JUNE 2003

## 第4章 転位並列導体の直流応用への適用性

低損失で高安定な大容量の電力応用機器の実現に向け、高温超電導線材からなる転位並列導体を用いた超電導巻線について検討を進めてきた。電力応用機器は交流用途が多く磁場乱れも許容されることから、層間や層内で素線の転位を用いた最適転位パターンについて提示し、均一な電流分流による大電流容量と低交流損失を備える超電導巻線を実現できることを示した。しかしながら、超電導の直流応用機器、特に NMR や MRI といった分析機器へ適用する超電導マグネットは、保護の観点からの大電流容量化とともに、時間と空間で ppm オーダーの磁場均一性が要求される<sup>1)</sup>。そのため、素線間の電流分流の不均一性や転位部における磁場乱れは、要求される磁場均一性に影響を及ぼす要因となり、許容されない。さらに、現在の高温超電導線材は、全く同一の特性で量産するのは不可能であり、線材ごとに臨界電流値や通電特性の傾き  $n$  値にばらつきを有する。交流では、インダクタンス成分が支配的となるため、このばらつきはほとんど影響しないが、直流で使用する場合は抵抗成分が支配的となるため、影響は顕著である。さらに、超電導マグネットを構成する素線に印加される磁場は一樣でないため、臨界電流の磁場依存性も影響する。本章では、転位並列導体の直流応用機器への適用性を検証するため、高温超電導線材の特性のばらつき、および、超電導マグネット内の磁場分布を考慮して電流分流特性を理論的に検討し、その対策について提示する。

### 4.1 高温超電導線材の臨界電流の磁場依存性

高温超電導である RE 系超電導線材の  $I_c$  の磁場依存性は、以下のようにあらわすことができる<sup>2)3)</sup>。図 4-1 は、RE 系超電導線材の 50 K における  $I_c/I_{c0}$  の磁場依存性である。ここで、 $I_{c0}$  はゼロ磁場における臨界電流値である。図 4-1 における傾きが変わる磁場値を  $B_b$  とすると、 $B < B_b$  において  $I_c$  は一定と近似でき、 $B_b < B$  においては Irie-Yamafuji<sup>4)</sup>モデルにより  $B$  が増加するにつれて  $I_c$  は減少する。つまり、 $I_c(B)$  は以下の式で与えられる。

$$I_c(B) \cong \begin{cases} I_{c0} & (B < B_b) \\ I_{c0} \left(\frac{B}{B_b}\right)^{\gamma-1} & (B_b < B) \end{cases} \quad (4-1)$$

減衰係数  $\gamma$  は、 $0 < \gamma < 1$  である。図 4-1 においては、 $\gamma=0.76$ 、 $B_b=0.057$  T である。

RE 系超電導線材においては、電流は  $\text{CuO}_2$  面を流れるが、 $\text{CuO}_2$  面に垂直な方向には半導電性または絶縁性中間層が存在するため導電性は悪い。従って上部臨界磁場に異方性が生じ、これは有効質量モデルによって説明することができる (Ginzburg-Landau 理論)<sup>5)</sup>。

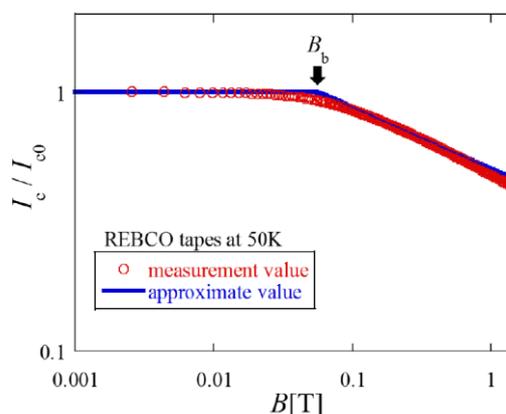


図 4-1.  $I_c/I_{c0}$  の磁場依存性  
(BaHfO<sub>3</sub>-doped Eu-Ba<sub>2</sub>CuO<sub>7</sub> tapes at 50K)

垂直換算磁場  $B_{\perp}(\theta)$  はテープ表面からの磁場角  $\theta$  を用いて次式であらわされる。

$$B_{\perp}(\theta) = B \left[ \sin^2 \theta + \left( \frac{1}{r^2} \right) \cos^2 \theta \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4-2)$$

$\Gamma$  は異方性パラメータであり、一般に REBCO の結晶構造に従って 5~7 であるが、近年、人工ピンニングセンターの導入により改善され、1.4~3.0<sup>(6)7)8)</sup> の範囲であると報告されている。ここでは、異方性パラメータ  $\Gamma$  を 3 に設定した。(4-1)式に(4-2)式を代入すると以下の式が得られる。

$$I(B, \theta) \cong I_{c\perp}(B_{\perp}(\theta)) \cong \begin{cases} I_{c0} & (B < B_{b2}) \\ I_{c0} \left[ \frac{B \left[ \sin^2 \theta + \left( \frac{1}{r^2} \right) \cos^2 \theta \right]^{\frac{1}{2}}}{B_{b2}} \right]^{\Gamma-1} & (B_{b2} \leq B) \end{cases} \quad (4-3)$$

ここで、 $B_{b2}$  は  $I_c$  の角度依存性を考慮した場合の  $B_b$  の値である。(4-3)式により、コイルの磁場分布を考慮した  $I_c$  を求めることができる。

## 4.2 超電導マグネット

直流応用として超電導マグネットを想定し解析を行った。超電導線材およびコイルの仕様を表 4-1 に示す。分析機器への適用を想定し、水素核の共振周波数である 200 MHz を達成するために、コイルの中心磁場が 4.7 T を越えるように巻数、層数、コイル内径を設定した。RE 系超電導線材による 3 本並列導体を用いてダブルパンケーキコイル (DPC) を巻線し、それらを積み重ねるモデルとした。分析機器動作時は一定の電流となるが、マグネッ

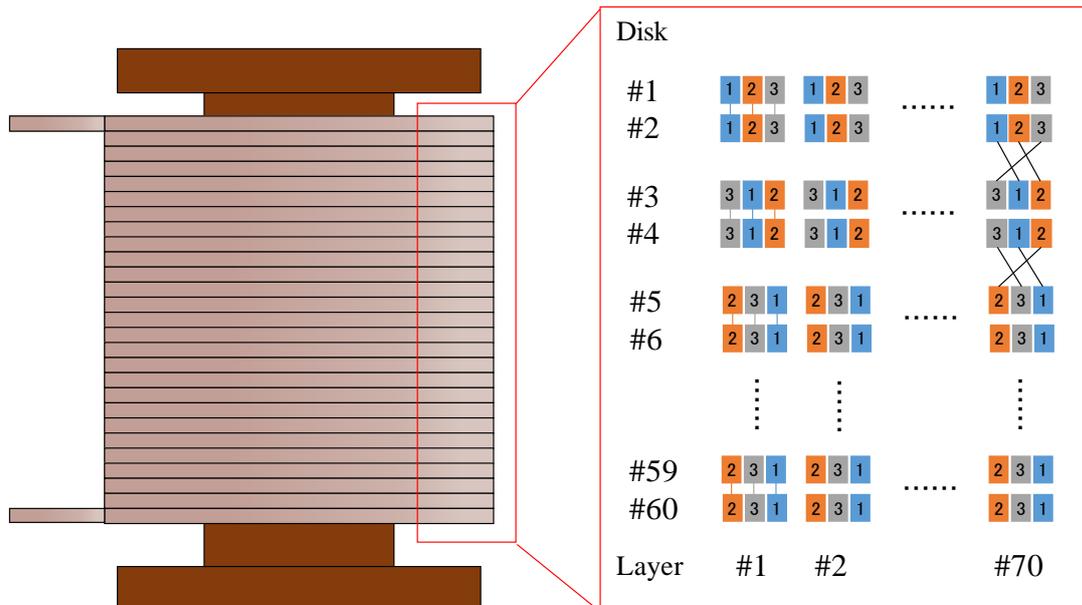


図 4-2. 超電導コイルの転位図

ト励磁のための電流掃引時はインダクタンスに従って電流が分流する。そのため、マグネット内の転位は必要である。転位は、磁場均一性を確保するため、DPC 内では行わず、DPC 間で図 4-2 に示すように転位し、接続するものとした。磁場分布を解析し（図 4-3）、300 A 通電時に中心磁場が 4.97 T であることを確認した。また、素線 30 ターン毎の垂直換算磁場  $B(\theta)$  を図 4-4 に示す。DPC 内側で 1.3 T 程度の垂直換算磁場であり、最大値はコイル端部付近で 1.803 T であった。

表 4-1. 超電導線材とコイルの仕様

超電導線材	REBCO	コイル形状	ダブルパンケーキコイル
線材幅	5 mm	内径	80 mm
線材厚み	0.1 mm	外径	122 mm
安定化層	90 $\mu\text{m}$	高さ	300 mm
バッファー層	1 $\mu\text{m}$	ターン数	70 turns / single-pancake
超電導層	0.7 $\mu\text{m}$	コイル数	30 DPC
		中心磁場	4.97 T

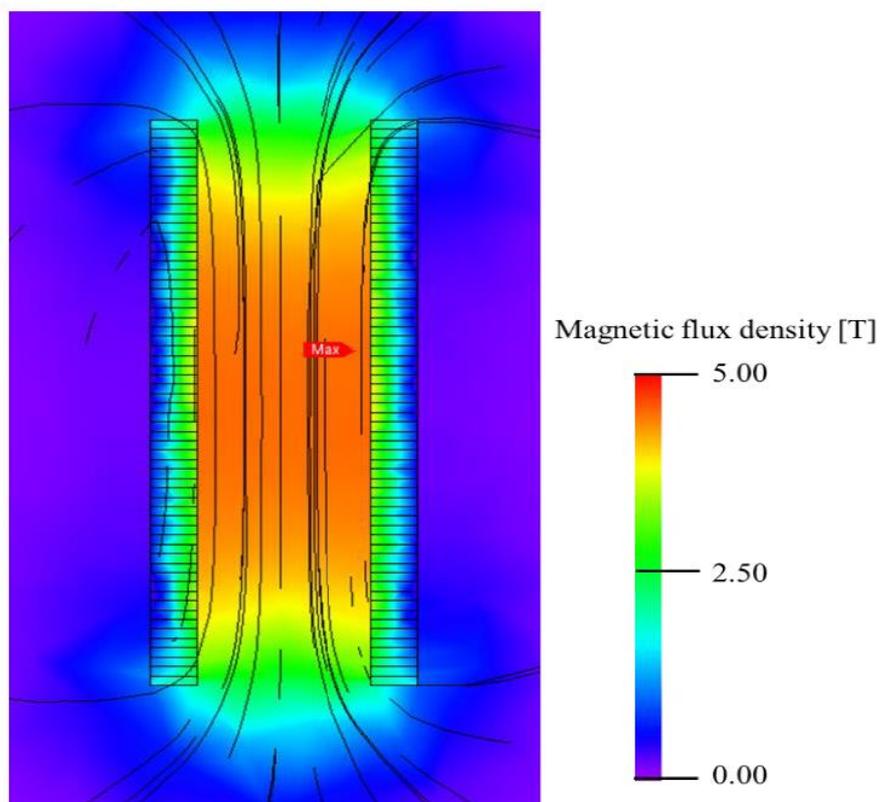


図 4-3. 超電導マグネットの磁場分布計算結果

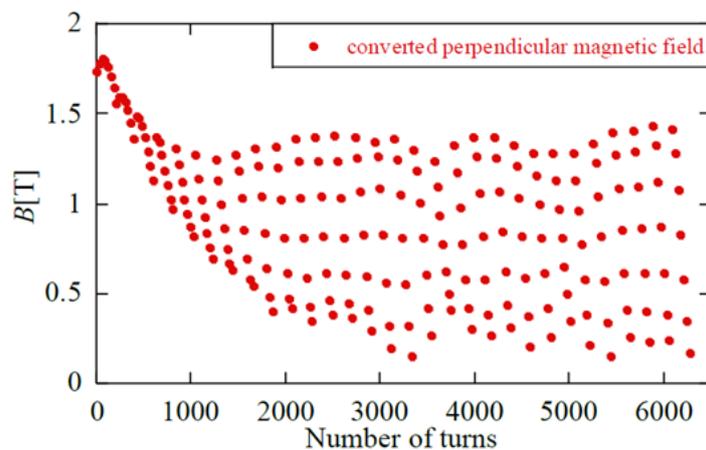


図 4-4. 30 ターン毎の垂直換算磁場

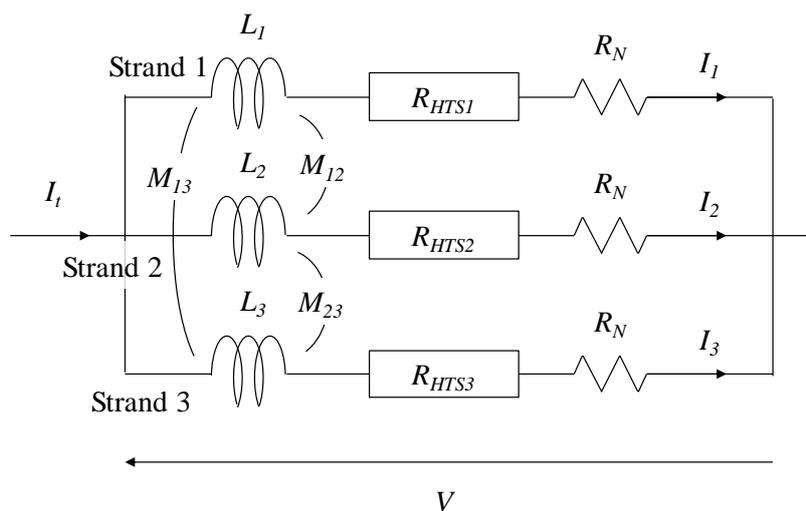


図 4-5. 抵抗成分を考慮した超電導マグネットの等価回路

3 本並列導体を構成する各超電導線材に流れる電流を  $I_1, I_2, I_3$  とすると、総電流値  $I_t$  は、

$$I_t = I_1 + I_2 + I_3 \quad (4-4)$$

と表される。端子の接触抵抗を  $R_N$ 、フラックスフロー抵抗を  $R_{HTS}$  とすると、超電導マグネットの等価回路は図 4-5 のとおりであり、回路方程式は以下となる。

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} j\omega L_1 + R_{N1} + R_{HTS1} & j\omega M_{12} & j\omega M_{13} \\ j\omega M_{21} & j\omega L_2 + R_{N2} + R_{HTS2} & j\omega M_{23} \\ j\omega M_{31} & j\omega M_{32} & j\omega L_3 + R_{N3} + R_{HTS3} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V \\ V \\ V \end{bmatrix} \quad (4-5)$$

$L_i$ は素線  $i$  の自己インダクタンス、 $M_{ij}$ は素線  $i$  と素線  $j$  の相互インダクタンスであり、この場合、 $i=1,2,3, j=1,2,3$  である。この回路方程式より、接続抵抗およびフラックスフロー抵抗を考慮した電流分流通性を求める。

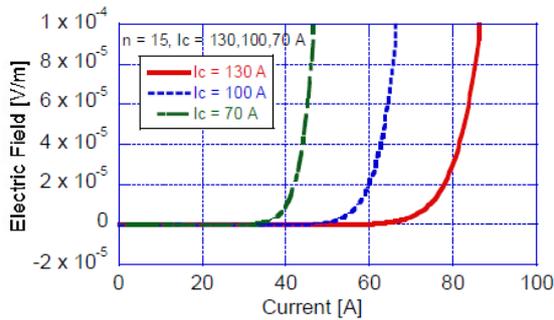
超電導線材の  $I$ - $V$  特性は、低電界領域においても  $n$  値モデルで表すことができる<sup>8)</sup>。

$$V = 10^{-4} \left( \frac{I_x}{I_c} \right)^n \quad (4-6)$$

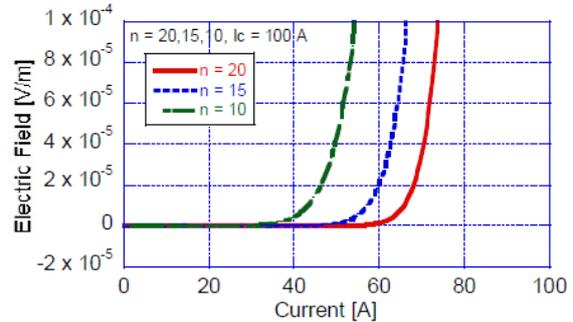
ここで、 $I_x$ は素線の輸送電流である。よって、それぞれのフラックスフロー抵抗は、以下の式で計算することができる。

$$R_{HTS} = 10^{-4} \left( \frac{I_x^{n-1}}{I_c^n} \right) \quad (4-7)$$

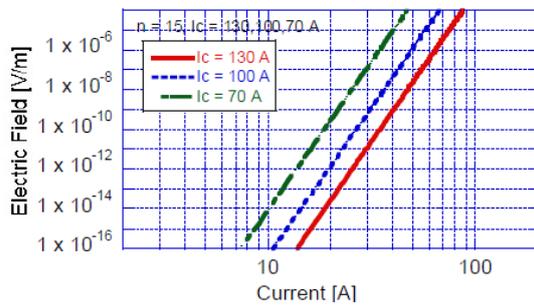
例として、 $n$  値が一定の場合で  $I_c$  が異なる場合の  $I$ - $V$  特性の計算結果を図 4-6 に示す。 $n$  値は 15 とし、 $I_c$  を 130 A, 100 A, 70 A と分散した。また、 $I_c$  が一定で  $n$  値が異なる場合の  $I$ - $V$  特性の計算結果を図 4-7 に示す。 $I_c$  は 100 A とし、 $n$  値を 20, 15, 10 と分散した。いずれの場合においても、低電界領域における波形は異なるため、式(4-7)にて抵抗値を導出する。



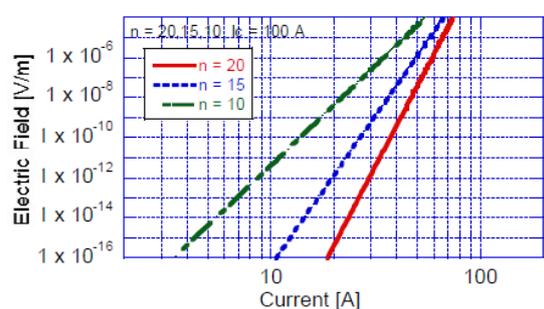
(a) リニアスケール



(a) リニアスケール



(b) ログスケール



(b) ログスケール

図 4-6.  $I$ - $V$  特性の計算結果  
( $n = 15, I_c = 130, 100, 70$  A)

図 4-7.  $I$ - $V$  特性の計算結果  
( $n = 20, 15, 10, I_c = 100$  A)

### 4.3 高温超電導線材の特性ばらつきの影響

高温超電導線材のゼロ磁場における臨界電流値  $I_{c0}$  を 50 K で 400 A とした。磁場分布の計算結果および式(4-3)より、 $B(\theta)$  が 1.803 T の場合、 $I_c$  は最小となり、175.4 A である。素線  $i$  の  $n$  値を  $n_i$ 、ゼロ磁場における臨界電流値を  $I_{c0i}$  とする ( $i=1,2,3$ )。  $n_i$  および  $I_{c0i}$  を様々な条件に設定し、電流分流比の周波数依存性について計算を実施した (図 4-8)。なお、各素線の接続抵抗  $R_N$  はすべての素線で共通とし、 $3.5 \times 10^{-7} \Omega$  とした。(a)は、 $n_i$  を  $\pm 10\%$  程度、(b)は  $I_{c0i}$  に  $\pm 10\%$  程度のばらつきを持たせたものである。さらに、(c)については、 $n_i$  および  $I_{c0i}$  のそれぞれに  $\pm 5\%$  のばらつきを持たせたものである。いずれの場合においても、周波数が 0.01 Hz 以下の場合には、電流分流比が不均一になり、 $n_i$  および  $I_{c0}$  の高い素線への分流比が大きい。これは、 $I_c$  および  $n$  値が増加するほど、 $R_{HTS}$  が減少するためである。また、0.01 Hz より高くなるとリアクタンスは大きくなり、インダクタンスが支配的となる。転位により素線間のインダクタンスが等しくなるため、電流分流比は均等になる。

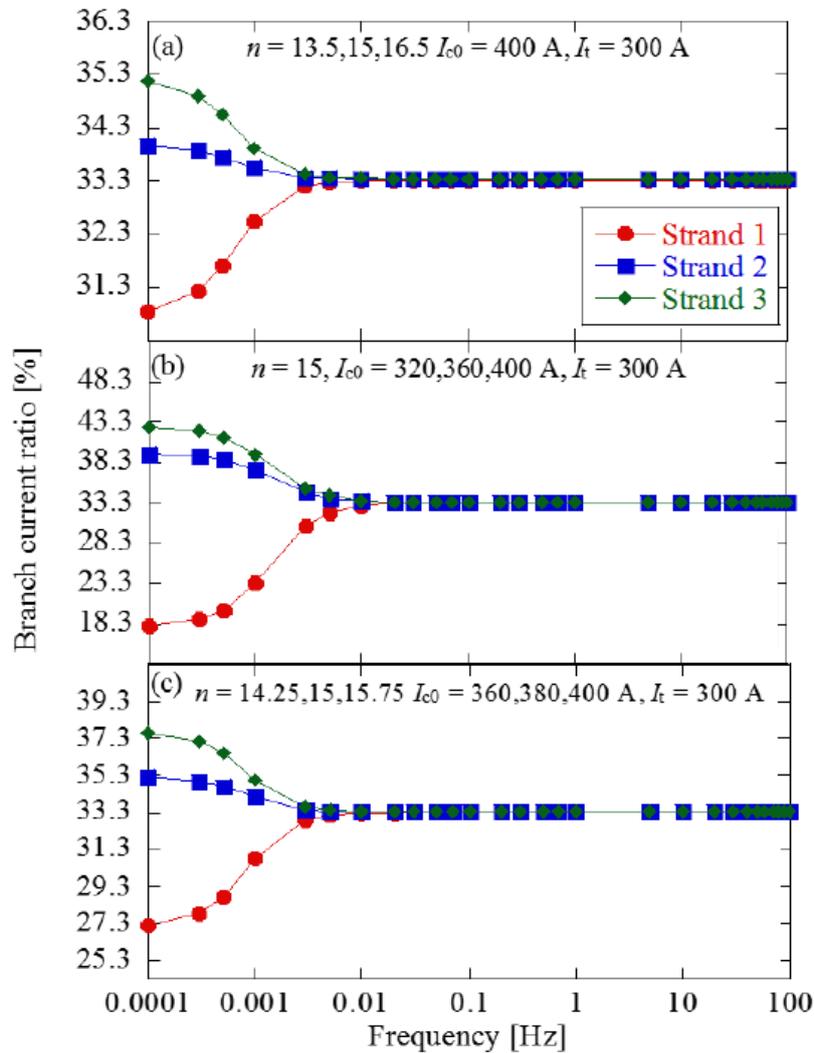


図 4-8. 3 本並列導体で構成した超電導コイルの電流分流比の周波数依存性

NMR などの分析機器は直流動作であるため、 $I_c$  と  $n$  値のばらつきによる直流時の電流分流比について解析を実施した。図 4-9 および図 4-10 は、 $n$  値および  $I_c$  の分散による電流分流比の変化を示す。 $n$  値が 10% のばらつきを有する場合、電流分流値は、 $I_1=85.5$  A、 $I_2=102.9$  A、 $I_3=111.4$  A となった。これら電流の不均一性は、コイルによって生成される磁場の均一性に影響を及ぼす。この解決策としては、各素線の接続端子部において、動作電流に対して適切に制御すればよい。例えば、動作電流が 300 A として、 $I_c$  が 10% 分散している場合、各素線の合成抵抗は、 $1.76 \times 10^{-6} \sim 4.00 \times 10^{-7} \Omega$  の範囲であり、各素線の電流は、 $I_1=35.7$  A、 $I_2=106.5$  A、 $I_3=157.5$  A である。この場合は、素線 2 に  $1.16 \times 10^{-6} \Omega$ 、素線 3 に  $1.36 \times 10^{-6} \Omega$  の抵抗を付加することで、電流分流比は均一となる。

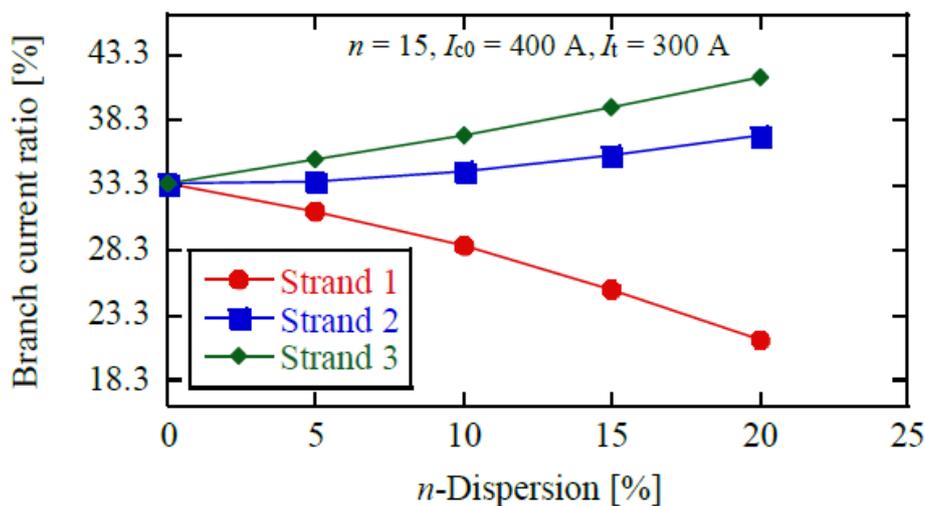


図 4-9.  $n$  値のばらつきによる電流分流比の変化

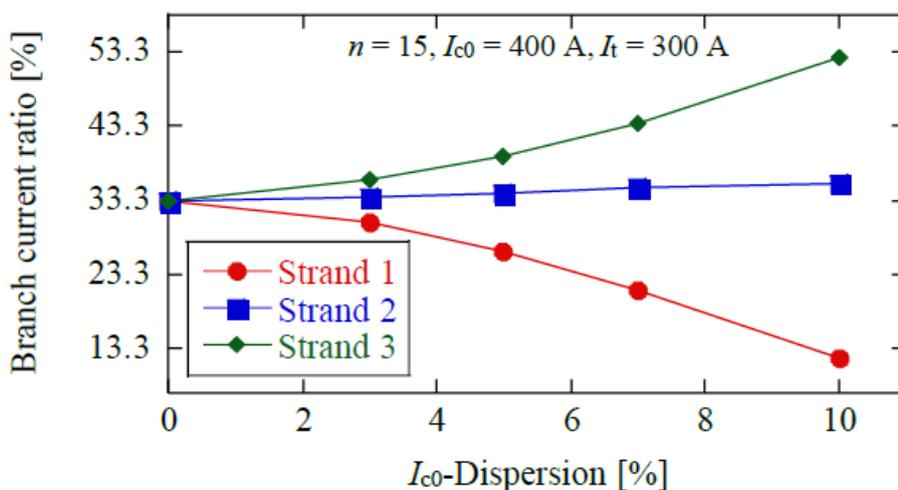


図 4-10.  $I_{c0}$  のばらつきによる電流分流比の変化

#### 4.4 まとめ

高温超電導転位並列導体の直流応用への適用性として、高温超電導線材の特性ばらつきが与える影響について、RE系超電導線材による3本並列導体で構成した超電導マグネットを想定し、電流分流特性について理論的な解析を実施した。超電導マグネットは、3本並列導体で構成したDPCを積層し、DPC間において最適な転位を施したものと仮定した。超電導マグネットの磁場分布と $I_c$ の磁場依存性を考慮し、接続抵抗およびフラックスフロー抵抗といった抵抗成分を導入した回路方程式より素線間の電流分流比を算出した。その結果、交流動作の場合は、非常に低い周波数において、 $I_c$ および $n$ 値のばらつきによる不均一性が見られたが、高周波においてはインダクタンスが支配的となり、均流化することが明らかになった。また、直流動作の場合は、 $I_c$ および $n$ 値のばらつきにより電流分流比が不均一となり磁場乱れの原因となる。これに対して、素線毎に接触抵抗を制御することで、動作電流に対応した各素線のフラックスフロー抵抗を含む合成抵抗の調整により、素線間の電流分流を均一とし、要求される磁場均一性を確保できることを示した。

#### 参考文献

- 1) Y. Yanagisawa, et al., "Operation of a 400 MHz NMR magnet using a (RE: Rare Earth)Ba<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-x</sub> high-temperature superconducting coil: Towards an ultra-compact super-high field NMR spectrometer operated beyond 1 GHz," J. Magn. Reson., vol. 249, pp. 38-48, 2014
- 2) M. Iwakuma, M. Nigo, D. Inoue, et al., "Temperature scaling of ac loss in YBCO superconducting tapes fabricated by the IBAD-PLD technique," IOPscience Appl. Supercond., Vol. 19, No. 4, 2006.
- 3) T. Ueno et al., "Ac Loss Properties of Stacked REBCO Superconducting Tapes," IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 27, no. 4, Article No. 471806, 2017.
- 4) F. Irie and K. Yamafuji: "Theory of flux motion in non-ideal type-II superconductors," J. Phys. Soc. Jpn., Vol. 23, No. 2(1967) pp. 255-268.
- 5) G. Blatter, V. B. Geshkenbein, and A. I. Larkin, "From Isotropic to Anisotropic Superconductors: A Scaling Approach" Phys. Rev. Lett. 68, 875, 1992.
- 6) Z. Chen, D. M. Feldmann et al., "Three-dimensional vortex pinning by nano- precipitates in a Sm-doped YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-x</sub> coated conductor," IOP-science Appl. Supercond., Vol. 20, No. 9, 2007.
- 7) A. Xu, J. J. Jaroszynski et al., "Angular dependence of  $J_c$  for YBCO coated conductors at low temperature and very high magnetic fields," IOPscience Appl. Supercond., Vol. 23, No. 1, 2009.
- 8) T. Puig et al., "Vortex pinning in chemical solution nanostructured YBCO films," Supercond. Sci. Technol., Vol. 21, p. 034008, 2008.
- 9) M. Iwakuma, H. Tanaka, and K. Funaki," Theoretical Analysis on AC Loss Properties of Two-Strand Parallel Conductors Composed of Superconducting Multifilamentary Strands", *Superconductor Science and Technology*, Vol.15, No.11, pp.1525-1536, 2002.

## 第5章 結言

従来の低温超電導線材は  $T_c$  が低く、その不安定性から素線の絶縁が困難であるため、大電流容量、高安定性、低損失な超電導応用機器の実現が不可能であった。しかし、液化ヘリウム温度でしか使用できない低温超電導線材から、液化窒素温度でも使用できる高温超電導線材の発見により、超電導応用機器の実現が具現化してきた。冷媒が液化ヘリウムから液化窒素に代わることで、冷媒比熱は数十倍に大きくなり安定性が格段に向上する。さらに、冷却に要する冷凍機の効率は、約 1/500 から 1/10 へと大きく改善され、交流損失の許容値も大幅に改善される。

直流およびパルス用の超電導マグネットに適用する超電導導体は、保護の観点から一般的に大電流容量化する必要がある。超電導マグネットの起磁力は、通電電流とターン数の積であり、起磁力を確保するだけであればこれらの設定には自由度がある。しかし、起磁力はターン数に比例するが、マグネットのインダクタンスはターン数の二乗に比例する。絶縁耐力の観点から端子間の電圧が特定の値以下に制限される中、クエンチ検出後に蓄積エネルギーを外部抵抗によって回収するに際し、ターン数が少ない、すなわち電流容量が大きいほど電流減衰時定数が短くなり、電流減衰までの温度上昇を抑制することが可能である。一方で、数 MVA 以上の容量を有する交流電気機器は、電圧階級にもよるが、定格電流が kA 以上となることから、単一の高温超電導線材では対応が困難であり、多数本を束ねて導体化する必要がある。従来の低温超電導線材は、円形断面を有する多芯線形状をしており、通常、大電流容量化のためには撚線導体を構成する。しかしながら、高温超電導線材は薄いテープ状であり、撚線導体を構成することはできない。そのため、我々の研究グループでは、複数のテープ線材を多層に重ねる並列導体を導入し、高温超電導変圧器、MRI 用高温超電導マグネット等の開発を行ってきた。

並列導体は、従来から常電導電気機器において銅巻線の大電流容量化のための常套手段として採用されており、通常、電線メーカーの工場において、絶縁された素線を数十 cm のピッチで連続的に転位し、出荷されている。しかしながら、高温超電導線材は歪みの影響を受けやすく、転位によって超電導特性が劣化する可能性が高い。並列導体を構成するにあたって、導体内の電流分流を均一にし、低損失化を図る上で重要なことは、素線間のインダクタンスをバランスさせることである。インダクタンスがアンバランスであれば、輸送電流が均一に流れず、また、素線間で鎖交磁束が異なるため、遮蔽電流が誘起され、並列導体を構成することによる新たな損失が発生する。したがって、我々は、高温超電導転位並列導体を構成するにあたり、転位ピッチを長くし、巻線工程において、素線間のインダクタンスをバランスしうる最低限の転位とすることを提唱している。

そこで本研究では、大容量、高安定、低損失を併せ持つ超電導応用機器の実現を目指し、高温超電導並列導体を構成するにあたり、電流分流を均等にし、導体構成に伴う損失増大を抑制するための最適転位パターンについて考察したものである。以下に各章で検討した概

要および結論の要約を示す。

第1章では、本論文の研究の背景および目的について述べると共に、大容量、高安定、低損失といった超電導の特性を最大限に発揮できる直流およびパルス用の超電導マグネットや交流電気機器等を実現するために必要となる、本研究の意義について述べた。

第2章では、円筒巻線を対象とし、まず、層間のみで転位を行う層間転位の基本的転位パターンについて考察した。無限ソレノイドコイル近似を用いることで巻線端部での磁界の乱れを無視して、素線間の自己および相互インダクタンスを表記し、電流分流の解析式を導出した。その上で、電流分流の層数依存性を明示し、最適層間転位パターンを提示した。しかし、層間のみでの転位では、最適転位を実現するために層数に制約があることから、層内転位を用いた最適転位パターンについても提示し、層内および層間転位を用いた基本的な転位パターンを組み合わせることで、任意の層数に対応する最適転位パターンを示した。

第3章では、無限ソレノイドコイル近似により導出した最適転位パターンについて、現在開発されている高温超電導線材の寸法を参照することで有限長のソレノイドコイルとして計算を実施、自己および相互インダクタンスを算出し、回路方程式を用いて素線間の電流分流比を求め、妥当性を検証した。さらに、実際の巻線の電流分流特性および交流損失特性の観測結果から、提示した最適転位パターンの有用性、および、並列導体構成に伴う付加的な交流損失が発生しないことも確認した。これにより、高温超電導転位並列導体により大容量、高安定、低損失な超電導電気機器が実現できることを示した。

第4章では、高温超電導線材を用いた実際の転位並列導体において、直流動作時には、転位によりインダクタンスをバランスしているにもかかわらず、素線毎に有する臨界電流値、 $n$ 値といった特性のばらつきにより、素線間の電流分流が低周波領域で均等にならず、この電流分流の不均一性が磁場均一性に影響することを実用上の課題として明示し、その対策について検討した。高温超電導線材の特性ばらつきを考慮した数値計算により、フラックスフロー抵抗が電流分流比に与える影響を示し、この対策として、動作電流におけるフラックスフロー抵抗を考慮して各素線の接触抵抗を調整することで、素線間の電流分流を均一にすることができる。これにより、高温超電導線材を用いた直流用超電導マグネットが実現できることを示した。

直流およびパルス用の超電導マグネットおよび交流電気機器への応用のため、超電導体の大電流容量化が必要である。実用的な酸化物高温超電導体の大電流容量化として、転位並列導体を提案し、巻線構成に必要な最適転位パターンについて、理論的に導出した。その最適転位パターンを用いた超電導巻線の試験より、電流分流の均一化が実現できること、並列

導体構成に伴う交流損失が発生していないことを示した。また、転位並列導体の直流応用への適用性として、磁場均一性を考慮した超電導マグネットをモデルとし、高温超電導線材固有の特性が電流分流に及ぼす影響について数値解析を行い、素線の接触抵抗を調整することで対応できることを示した。本研究成果により、高温超電導の機器応用が加速することを期待して、本論文の結びとする。

## 謝辞

本研究を遂行するにあたり、御指導および御教示を賜った岩熊成卓 教授に深く感謝の意を表し、厚く御礼申し上げます。

本研究の遂行にあたり、適切なお助言を賜りました木須隆暢 教授には、心より感謝申し上げます。

九州大学 大学院システム情報科学府 電気電子工学専攻 超伝導工学研究室および超伝導システム科学研究センターの皆様には、本研究を進める上で様々なサポートをしていただき、感謝の意を表します。特に、本田正太郎さん、佐川慎太郎さんには、解析の実施にあたって御協力をいただきましたことに感謝申し上げます。

本研究を進める上で、超電導コイルを試作し、その評価は必須であり、公益財団法人鉄道総合技術研究所および富士電機システムズ株式会社の関係各位には、大変お世話になりました。深く感謝いたします。

富田優 研究開発推進部担当部長には、日頃より研究テーマの遂行にあたって多大なる御指導、御鞭撻を賜るとともに、博士課程進学への推薦および許可をいただくばかりか、本研究の遂行にあたり、適切なお助言、御指導をいただきましたことを感謝いたします。

超電導応用研究室の皆様には、本研究を進める上で業務の負担をかけてしまったことをお詫び申し上げるとともに、配慮いただきましたこと厚く御礼申し上げます。

テス株式会社の西原太一さんには本解析を進める上で多大なる支援をいただきました。厚く御礼申し上げます。

最後に、私の博士課程進学を後押ししてくれた父、母に感謝するとともに、日常生活において協力を惜むことなく心身両面から支えてくれた妻 早織に深く感謝します。また、いつでも明るく応援してくれた2人の娘に感謝の意を表します。本論文の完成は、家族の支えがあったからです。心より感謝いたします。