

## 20. エネルギー貯蔵用応力最小化電磁力平衡コイルの実証と解析

嶋田研究室 01M19070 梶田真也

### 1 はじめに

電力供給システムにおいて電力の有効利用の下、負荷平準化を可能とする電力貯蔵装置が必要とされている。そして、その中でも、超電導磁気エネルギー貯蔵装置 (SMES) は、高い貯蔵効率、速い応答性などの利点から、多様な機能を持ち、将来の電力系統において重要な役割を果たすものとして期待されている。しかし、超電導コイルには巨大な電磁力が発生するため、SMES 装置の大容量化を妨げる大きな課題となっている。そこで、電磁力支持材量の低減化を可能とする電磁力平衡コイル(FBC)の概念を用いて、応力を最小化できるコイル形状について、実証と解析により検討することを本研究の目的としている。

### 2 ビリアル限界条件

電磁力の作用する物体のみに電流が流れている場合、

$$\int_v \sum_i \sigma_i dv = \int_v \frac{B^2}{2\mu_0} dv = E$$

が成り立つ。 $\sigma_i$  は主応力、 $B$  は磁束密度、 $E$  は磁気エネルギーを表す。この関係式をビリアル定理と呼び、主応力の総和が磁気エネルギーに等しいことを表す。そして、磁気エネルギーを蓄積するとき、主応力の総和は必ず正となり、引張応力 (正の応力) となることを意味する。主応力の体積積分の総和を磁気エネルギーで規格化すると、

$$Q = \frac{\int_v \sum_i \sigma_i dv}{E} = 1$$

となり、これを規格化平均応力と呼ぶ。ここで、図1のような厚さの無視できるトーラス円環において、この関係式は、

$$Q_\phi + Q_\theta = 1$$

となる。そして、各応力成分が等しくなると、

$$Q_\phi = Q_\theta = \frac{1}{2}$$

が成り立つとき、応力分布を平滑化し構造材量を最も低減することができる。つまり、構造材量が最小となるのは一様な引張応力分布を形成するときである。この条件をビリアル限界条件という。そして、この条件を電磁力平衡コイルに適用したとき、図2のようなコイル形状となる。これをビリアル限界コイル(VLC)と呼ぶ。

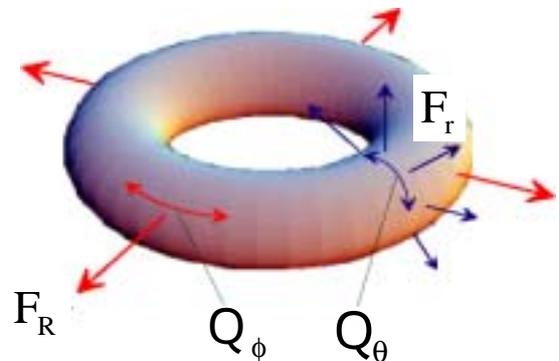


図1 トーラス環に生じる応力

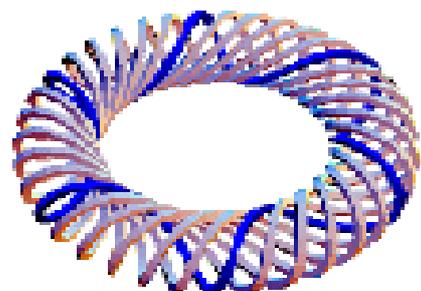


図2 ビリアル限界コイル (VLC)

### 3 ビリアル限界実証実験

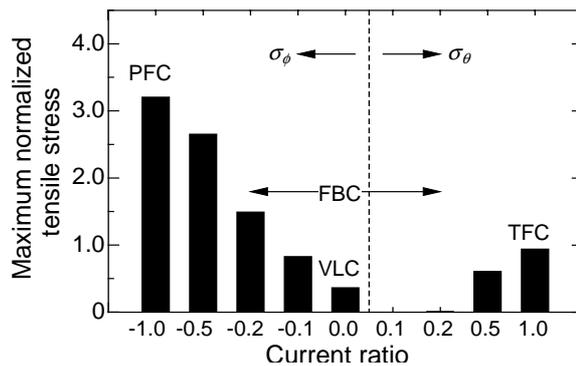
応力を最小化するコイル形状として、ビリアル限界コイルの妥当性を実験的に示すために、ビリアル限界実証実験を行った。この実験において使用した実験用コイルを図3に示す。このコイルは、内層と外層のビリアル限界コイルから成る2層構造となっており、各層に流れる電流の大きさと方向を変えることによって、ピッチ数（ポロイダル巻数/トロイダル巻数）の異なるコイル形状を模擬することができる。

この実験用コイルでは、超電導状態を保てなくなり、運転が維持できなくなる時のクエンチ電流値を最大で1039Aを達成し、このとき、最大蓄積エネルギー31kJを達成した。また、最大経験磁束密度は2.8Tを達成した。

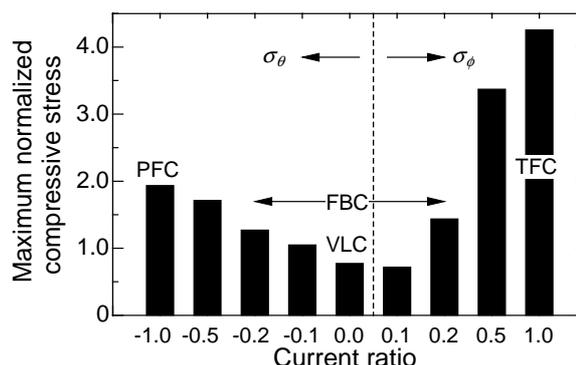
磁場測定から各コイルの模擬の実現を確認した。そして、ひずみ（応力）測定からは、各模擬条件のひずみ特性の違いが現れていた。各模擬条件について同じ条件下で比較するため、規格化応力として応力値を蓄積エネルギーと体積で規格化した。これについて、5つの測定地点で最大となる規格化応力を引張応力と圧縮応力に分けて図4のように示した。図4より、FBCはTFC（トロイダル磁界コイル）やPFC（ポロイダル磁界コイル）よりも最大応力値が小さくなり、電流比0付近において最小となることがわかる。よって、FBCは電磁力の低減を可能とし、その中でもVLCは応力を最小化できるコイル形状として有効であると言える。



図3 実験用コイル



(a) 引張応力（正の応力）



(b) 圧縮応力（負の応力）

図4 規格化応力の最大値

### 4 三次元応力解析の必要性

ビリアル限界実証実験において、応力分布の結果は測定位置全体的に引張よりも圧縮の傾向を示していた。また、VLCにおいても、ビリアル定理の意味する引張応力分布とはならなかった。この原因として、小半径方向応力が生じたことや、内力が生じる導体と巻棒の位置関係による相違があったことなどが考えられる。そこで、三次元モデルを想定した構造解析が必要であると考へ、三次元解析で広く用いられている有限要素法（FEM）による応力解析を行うことにした。また、この解析では実験における応力・ひずみの測定結果の検討及び応力分布・降伏地点についての検討を行うことを目的として行った。

### 5 有限要素法を用いたVLCの応力解析

#### 5.1 解析手順

本解析においては、解析対象をビリアル限界

実証実験において使用した外層のビリアル限界コイルとした。そして、簡単なモデルの構築を前提として以下の条件を用いた。

- (1) 電磁力のみの入力として自重などを考慮しない。
- (2) 導体及び巻枠を一体化したモデルを想定することで、境界条件がなく、均質な材料特性とする。

そして、有限要素分割は6面体 (HEX) としてを行った。また、解析対象はトロイダル方向に対して  $20^\circ$  の周期性を持つことから、図5のような18分の1のモデルを構築した。このようにして、周期的境界条件を用いて解析を行うことにより、要素数の削減を行い、厚み分割数を確保した。一方、電磁力計算については導体領域に含まれる要素を抽出したのち、体積力として電磁力を求めた。そして、有限要素法による応力計算では構造解析ソフト ABAQUS を利用して行った。

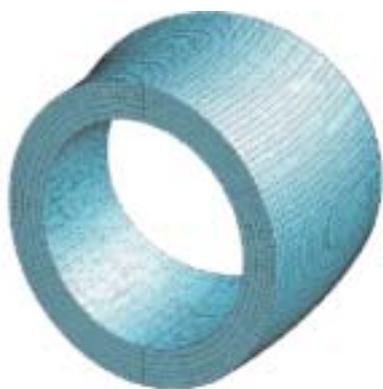
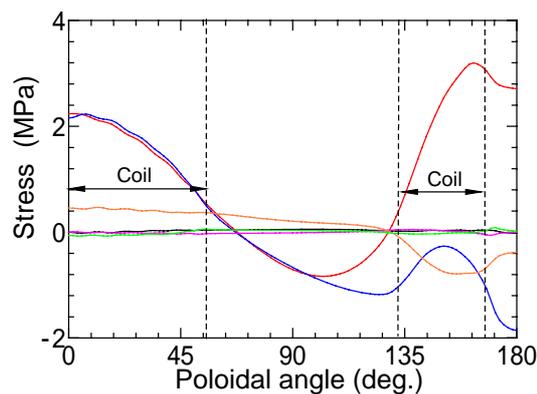


図5 三次元モデル (18分の1モデル)

### 5.2 巻枠表面における応力分布

トロイダル座標系における各応力成分のポロイダル角分布を図6に示す。図6より広範囲に渡って  $\sigma_{rr}$ ,  $\sigma_{\theta\theta}$ ,  $\sigma_{\phi\phi}$ ,  $\sigma_{r\theta}$ ,  $\sigma_{r\phi}$ ,  $\sigma_{\theta\phi}$  の関係が成り立ち、小半径方向応力成分を無視することができることがわかる。よって、実験において平面応力分布 ( $\sigma_{\theta\theta}$ ,  $\sigma_{\phi\phi}$ ) として、応力・ひずみは十分に評価できたと言える。



垂直応力: せん断応力:  
 — 小半径成分  $\sigma_{rr}$       —  $(r, \theta)$ 成分  $\sigma_{r\theta}$   
 — ポロイダル成分  $\sigma_{\theta\theta}$       —  $(\theta, \phi)$ 成分  $\sigma_{\theta\phi}$   
 — トロイダル成分  $\sigma_{\phi\phi}$       —  $(r, \phi)$ 成分  $\sigma_{r\phi}$

図6 トロイダル座標系における各応力成分の分布 (トロイダル角  $= 0^\circ$ )

### 5.3 実験結果と解析結果との比較

実験値と計算値 (殻モデル解析・FEM 解析) について、VLC の規格化応力のポロイダル角分布を図7に示す。ここで、殻モデルとは厚みのない軸対称のトーラス円環のことである。図7より、実験値は殻モデル解析よりも FEM 解析の計算値に近い傾向を示し、測定位置 (巻枠表面) ではビリアル限界条件の示す引張応力分布とはならないことがわかる。つまり、引張・圧縮の応力集中の影響により、実験における測定値は全体として圧縮の傾向にあったことが考えられる。

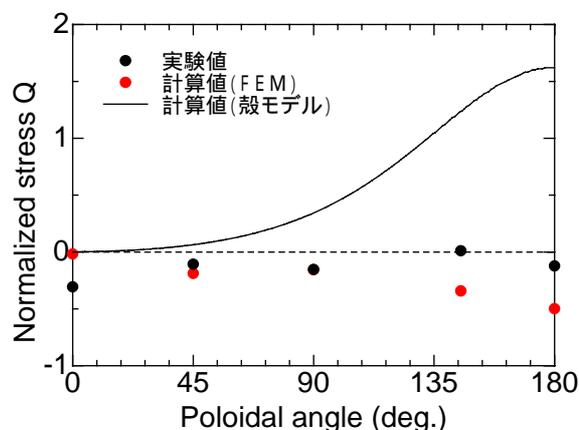


図7 ビリアル限界コイルの規格化応力分布 (トロイダル方向垂直応力)

## 5.4 主応力分布と最大応力発生地点

三次元的に応力分布を評価するために、主応力分布を用いた。図8にコイル上面における主応力分布を示す。図8において破線が導体と巻棒の境界を表している。図8より全体的に導体付近では引張、巻棒では圧縮の傾向を示し、導体と巻棒の位置関係が応力分布に大きく影響を及ぼすことがわかる。次に、図9に示すポロイダル断面における主応力分布を見ると、トーラス内側（左側）において引張と圧縮が最も大きくなっており、この範囲で最も応力が集中していることがわかる。

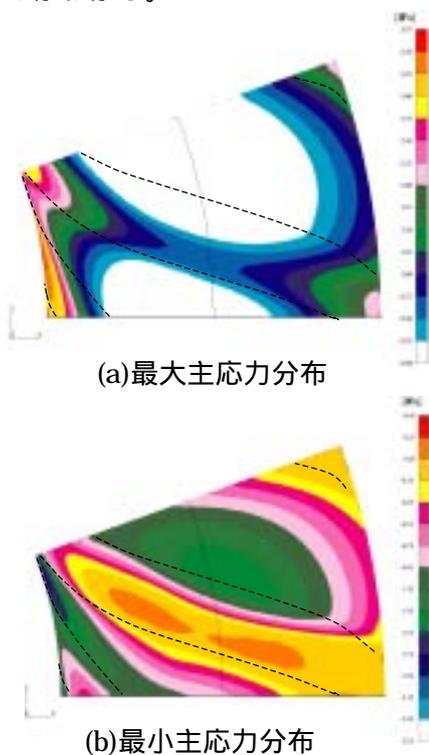
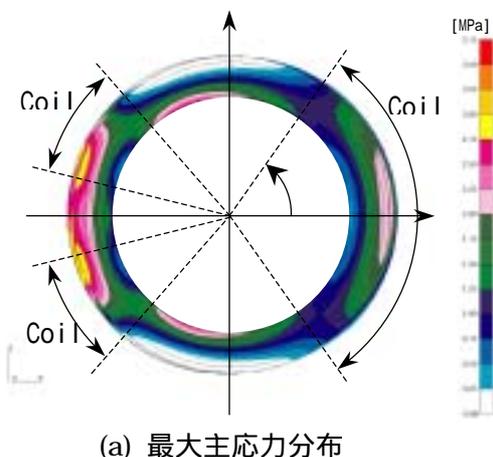
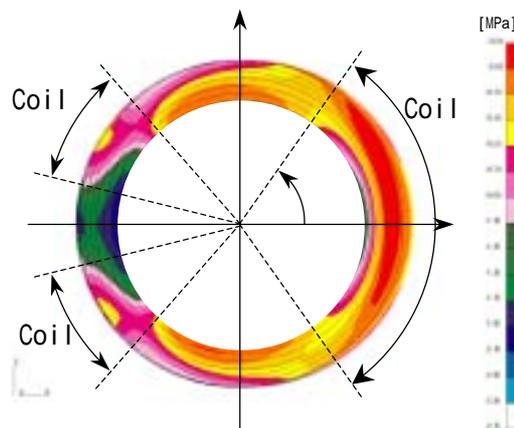


図8 コイル上面における主応力分布



(a) 最大主応力分布



(b) 最小主応力分布

図9 ポロイダル断面における主応力分布

また、主応力分布から最大応力発生地点はトーラス最内周部にあることがわかった。実験用コイルにおいては電流値 800A、磁気エネルギー19.2kJでミーゼス応力最大値 4.2MPa となった。そして、Cu の降伏応力約 290MPa より、実験用コイルは磁気エネルギーを最大で約 1.3MJ まで蓄積可能であることがわかった。

## 6 結論

### 6.1 本研究のまとめ

1. 実験用コイルにおいて最大蓄積エネルギー 31kJ、最大経験磁束密度 2.8T を達成した。
2. FBC は TFC や PFC よりも応力を低減することができ、その中でもビリアル限界コイルは応力を最小化できるコイル形状として、有効性を実証した。
3. 解析結果から、ビリアル限界実証実験における応力・ひずみ測定の妥当性を確認した。
4. 応力分布は導体と巻棒の位置関係によって影響し、コイルの降伏地点は磁束密度が最大となるコイル最内周部に位置することがわかった。

### 6.2 今後の課題

コイルの初期降伏地点や降伏応力を考慮して、SMES 装置におけるコイルの支持方法や導体量・電磁力支持材量の低減化についての検討を行う。