

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 30 日現在

機関番号：32621

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24760700

研究課題名(和文) 素線配置計測と構造力学モデルによる超電導導体の電磁力下の素線曲げ変形と座屈現象

研究課題名(英文) Strand buckling analysis under large electromagnetic force by using structural mechanics and strand trace measurement

研究代表者

谷貝 剛 (Yagai, Tsuyoshi)

上智大学・理工学部・准教授

研究者番号：60361127

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円、(間接経費) 1,050,000円

研究成果の概要(和文)：核融合用の大型マグネットでは、大電流通電のために直径1mm程度の超電導素線を多数段に分けて撚り合わせ、圧縮して金属ケース(コンジット)に収納した、ケーブル・イン・コンジット導体を用いる。この導体では、通電回数の増加とともに性能が劣化する現象が見られ、素線が大きく曲がって座屈していた。本研究では、素線の熱収縮応力によって座屈に至る現象を、構造力学モデルを用いてシミュレーションし、その挙動に必要な素線の滑り量が実際に起こりうる事を実験的に明らかにした。本研究によって、大型導体の性能劣化のメカニズムが明らかとなった。

研究成果の概要(英文)：The Cable-In-Conduit conductor is commonly used as the most promising one for large-scale fusion magnets, which consists of twisted strands and sub-cables inserted into the metal case called conduit. During test campaign to evaluate the temperature margin for the assessment of the conductor performance, the temperature margin was getting worse as the number of transport current cycle increases. According to the visual inspection of the conductor, strand buckling due to strand movement might cause the deterioration. In order to investigate the mechanism of the buckling, I calculated the strand movement by using structural mechanics. The results showed the slip motion due to thermal contraction force would cause the displacement. Experimental investigation for certification of the slip distance carried out and its result supported the slip obtained by the calculation. The results will be useful for the development of the conductor design activities for large scale magnets.

研究分野：13

科研費の分科・細目：5605

キーワード：核融合 ケーブル・イン・コンジット導体 Nb3Sn 曲げ歪み 熱収縮応力 座屈 超電導特性劣化

1. 研究開始当初の背景

ITER (国際熱核融合実験炉) で用いられる大型のマグネットでは、直径 1mm 程度の Nb3Sn 超電導素線と Cu 線を、多数段にわけて撚り合わせ、合計 100 本を超えるケーブルを、さらに圧縮して金属のケースに収納する。ケーブル・イン・コンジット導体がいられる。スイスの SULTAN 装置において、この導体の性能試験を強磁場中で行ったところ、コンジット内部で導体が偏り、空隙の空いた表面で素線が大きく曲げられて座屈する現象が確認された (図 1)。Nb3Sn 線は脆いため、導体の性能が励磁回数の増加に従って悪くなる現象に深く関与していると、容易に推測された。

この座屈現象は、電磁力が原因ではなく、素線とコンジットの熱膨張係数の違いに起因する収縮応力 (素線軸に平行) であると考えられている。現在すでに材料調達に入っており、試作導体で発見された座屈現象の機構解明は急務である。

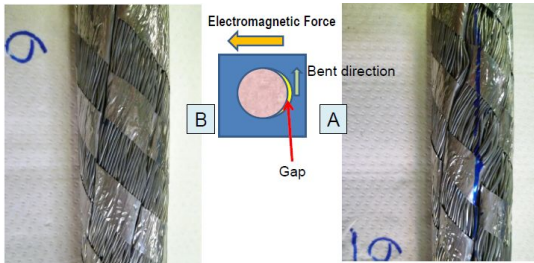


図 1 CIC 導体で観測された素線の座屈現象

2. 研究の目的

曲げ歪みに敏感な Nb3Sn では、この現象は致命的であり、繰り返し運転が行われる核融合の実験装置では、マグネットとしての所望の性能が発揮されないことになる。

従って本研究では、大型 CIC 導体における電磁力下での素線曲げ歪みおよび座屈・クラックの現象を、

- ・素線の実配置 (3D) の計測
- ・構造力学モデルおよび塑性力学を用いた電磁力下の素線配置の変位計算によって、定量的に解明するものである。

3. 研究の方法

(1) まず構造力学モデルを用いた理論解析を行った。電磁力ではなく (剪断力) 熱収縮応力 (軸力) によって、曲がった円柱が縮み、大変位を起こして座屈する現象をシミュレートする。初期形状として 2 次元のクロソイド曲線を仮定し、素線が静止摩擦力を受けずに自由に動ける (どこにも接触していない) 特性長約 30mm とする。片端は固定とし、もう片端を素線軸に対して平行に移動でき

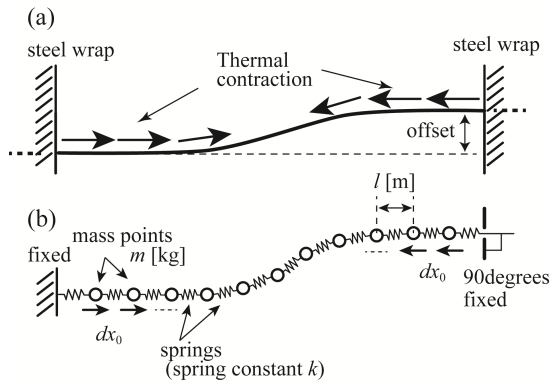


図 2 撚り線の構造力学モデル概略図

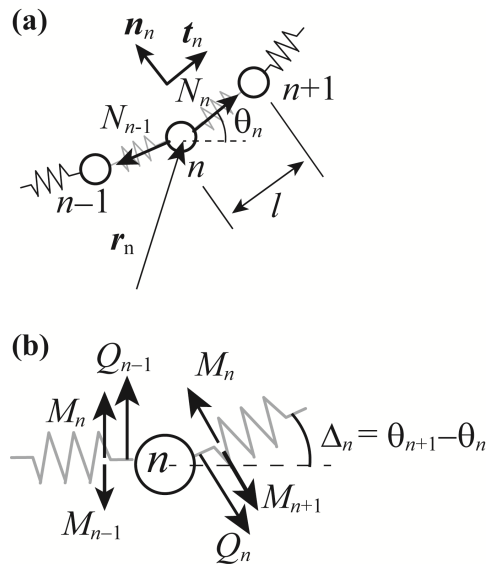


図 3 フレネ・セレ座標と質点周りのモーメント

る自由端条件とする (図 2 (a))。超電導素線は、n 分割され、質量 m の質点と、それをバネ定数 k のスプリングで連結してモデル化する (図 2 (b))。これは離散ストリングモデルと呼ばれる。このモデルは、非線形の塑性力学を用いる事無く、座屈に至るような大変形を計算できる特徴がある。

図 3 は、離散ストリングモデルを拡大したものである。図 3 (a) に示したように、質量 m の質点が、長さ l のバネによって接続されている。t_n と n_n は、フレネ・セレ座標である。N_n は軸力を表している。図 3 (b) で示される M_n, Q_n は、各々曲げモーメントと剪断モーメントである。

以上より、フレネ・セレ座標を用いて n 番目の質点の運動方程式を立てると、次のようになる。

$$\rho \frac{d^2 \mathbf{r}_i}{dt^2} = (N_i - N_{i-1} \cos \Delta_{i-1} + Q_{i-1} \sin \Delta_{i-1}) \frac{\mathbf{t}_i}{l} + (N_{i-1} \sin \Delta_{i-1} - (Q_i - Q_{i-1} \cos \Delta_{i-1})) \frac{\mathbf{n}_i}{l}$$

ここで ρ は質量密度を表し、 \mathbf{n}_i は、

$$\Delta_{i-1} \equiv \theta_i - \theta_{i-1}$$

である。軸力 N_i は、次のように表せる。

$$N_i = k \frac{(r_{i+1} - r_i) - l}{l} \equiv k \frac{(G_i - l)}{l}$$

ここで、 k はバネ定数を表しており、ヤング率 E と断面積 S を用いて

$$k = \frac{ES}{l}$$

である。曲げモーメント M_n と剪断モーメント Q_n は、各々

$$M_i = EI \frac{\Delta_{i-1}}{l} \equiv K \frac{\Delta_{i-1}}{l}$$

$$Q_i = \frac{M_{i+1} - M_i}{G_i}$$

ここで I は断面 2 次モーメント、 G_n は軸力 N_n の式で定義済みである。質点の位置は、次の式で表すことができる

$$r_i = r_0 + \sum_{k=0}^i G_k t_k$$

運動方程式を数値解析によって解くことで、素線の大変位を計算する。

(2) 上記のモデルによって素線が大変位を生じるためには、熱収縮応力によって生じる弾性変形では説明ができない。そのため、自由端が他の素線やコンジット内壁との間の静止摩擦力を超えて滑り、動き出す必要がある。そこで、素線を平均接触長程度の長さで周辺を素線に囲まれ、かつ最大電磁力 (~400kN/m) までで押さえつけられている状況を模擬し、熱収縮応力によって滑る現象を実験的に確かめることにした。

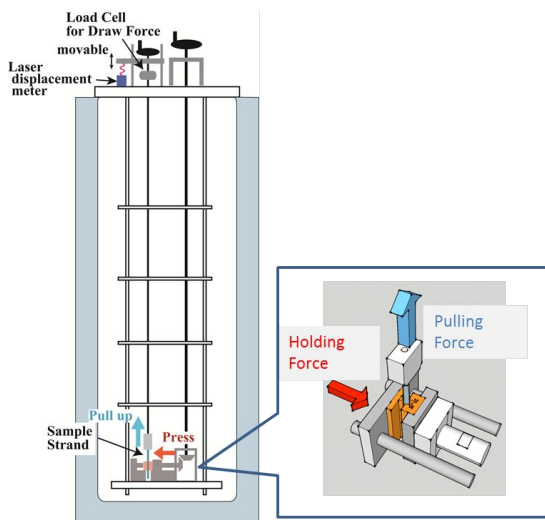


図4 熱収縮応力による素線の滑り量測定装置

図4は、他の素線と接触して摩擦を受けている素線が、熱収縮応力によって滑る量を測

定するための装置概略図である。液体ヘリウム環境下で実験するため、深いクライオスタットに上部のフランジから吊すような構成になっている。最下部には、Cu素線を模擬した圧縮部(10mm長)と、それに挟まれるNb3Sn素線が配置できるようになっており、各々に圧縮力(底面に平行方向)、引っ張り力(垂直方向)が印加出来るようになっている。引っ張り、圧縮力はロードセルによって、滑り量はレーザー変位計によって、それぞれ測定できる。レーザー変位計の分解能は、数μmである。圧縮力は、最大電磁力に相当する400kN/mまで印加でき、通電中のCIC導体内部の素線の圧着状況を模擬できるようになっている。

4. 研究成果

(1) 素線の大変位挙動の理論的解析結果

図5は、すでに記述した運動方程式の解について、初期の素線形状を曲率の異なる2つの場合において示した結果である。図5(a)は、初期の最大曲率が1%の場合であり、この時の時間発展を複数の曲線で示している。計算された最大変位は、中心付近で約0.5mmの変位であった。

一方、初期の最大曲率が3%の場合(図5(b))であるが、これはCIC導体製作過程における撚り線加工の中で最大値に近い曲率になる。このケースでは、計算の結果、最大変位が1.89mmになることがわかった。図6は、変位の時間発展と局所曲率の変化を3Dプロットしたものである。変位が進展していくに従って、曲率が5%を超える部位が増えていることがわかる。これは、素線の座屈に至るのに十分な変位である。このとき素線の自

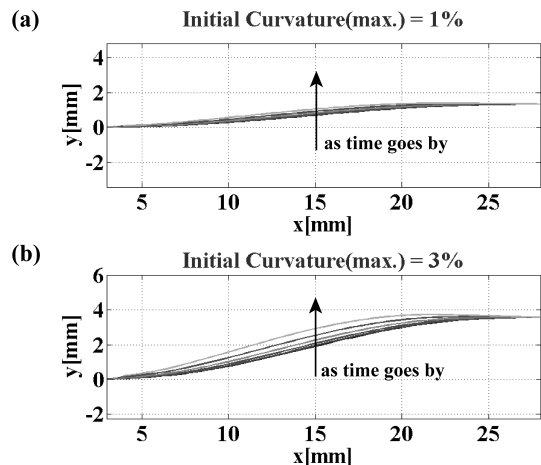


図5 初期曲率の違いと素線変形シミュレーション

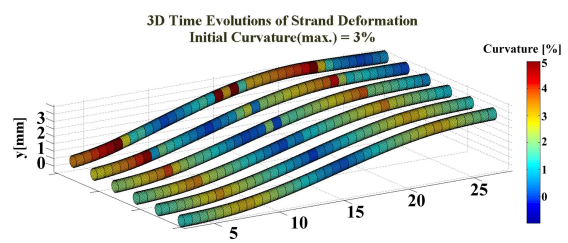


図6 熱収縮による変位と曲率の時間変化

由端は、約 80 μm 収縮応力方向に移動する必要がある事もわかった。弾性論による変位は約 10 μm 程度なので、この移動は、摩擦によって固定された素線の端部が滑ることによって説明できると考えられる。

(2)変形する素線の両端の静止摩擦力と滑り量の測定

CIC 導体では、素線同士が複雑に絡み合っており、導体全体が圧縮されているため、他の素線との接触部から、大きな摩擦力によって、熱収縮応力を受けても素線は動くことが出来ない。

そこで素線の静止摩擦力及び滑り始めてから終わるまでの滑り量を測定することによって、熱収縮応力に起因する素線大変位および座屈現象の解明を試みた。

図 4 に示したように、Nb3Sn 素線を同径の Cu 線に囲まれた圧縮部によって最大電磁力相当の 400kN/m で圧縮する。圧縮部の長さは約 10mm であり、これは先行研究によって、素線軌跡計測から明らかになった、CIC 導体の素線間接触長の平均値である。

圧縮力が最大電磁力相当の場合、計算された 45N の熱収縮応力では、素線は滑らない事が判った。そこで、連続的に圧縮力を下げていき、素線が静止摩擦力を超えて動き、滑る量を計測する実験を複数回行った。その結果を図 6 に示す。再現性が良いため、図では 2 回分のデータだけを示している。図 7 (a) は、熱収縮応力を模擬した引っ張り力 (初期値 45N) の変化を、同図 (b) は素線の変位量を、各々電磁力模擬圧縮力に対してプロットしたものである。

素線の滑りは圧縮力が約 60kN/m になったときに徐々に現れており、約 40kN/m で瞬間的に約 3 μm 滑る事がわかる。この圧縮力は最大電磁力の約 1/10 程度の弱い応力である。素線は一度滑ると、圧縮力の減少に伴って徐々に滑り、熱収縮応力を緩和させていく。レーザー変位計で計測された変位量は、約 72 μm であり、引っ張りに用いているステンレスロッドの弾性変形分を考慮しても、約 60 μm 程度の滑り量であった。この結果は、上記シミュレーションの結果を裏付けるものであり、熱収縮応力によって素線の大変位が生じ、その結果として座屈に至ると考えられる。

以上の結果を総括すると、以下のような素線座屈のシナリオが考えられる。

素線の動きと励磁・減磁過程の関係を模式的に表したものが図 8 である。はじめ、導体はコンジット内部に均一に収まっており、冷却過程で素線には熱収縮応力がかかっている (i)。はじめの励磁によって最大電磁力に至ると、導体は電磁力の方向に寄せられ、ボイド率 (空隙率) の低い、密な部位と、その反対側にボイド率の高い、空隙の目立つ部位が発生する (ii)。この時点で空隙部の導体表

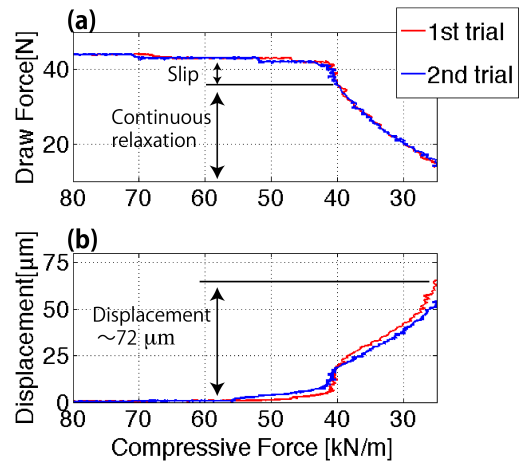


図 7 圧縮力の減少に対する引張力の緩和と滑り量

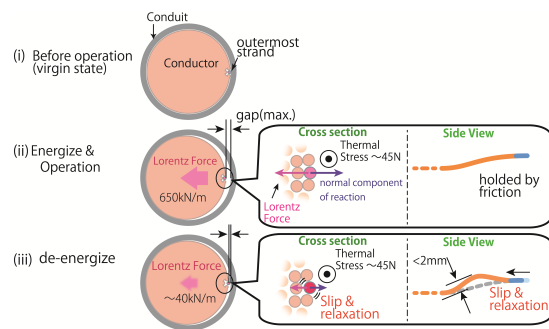


図 8 励磁・減磁過程と素線の大変位と座屈現象のシナリオ

面にある素線は、他の素線に押さえつけられているので、熱収縮応力によって動くことはない。しかし、減磁過程に移行すると、電磁力は徐々に弱くなっていき、最大電磁力の約 1/10 程度で素線間接触による摩擦力が熱収縮応力よりも小さくなる。よって、素線固定端が滑って熱収縮応力の緩和が生じ、素線の大変位および座屈に至ると考えられる (iii)。

以上より、大型 CIC 導体内部における、励磁・減磁の繰り返し過程で生じる導体性能の劣化の原因と考えられる素線の座屈現象を定量的に解明する事ができた。

今後、導体の内部構造を詳細に計測することによって、今後の導体製造方法が交流損失や臨界電流特性などの性能に、どのように関与しているのかを明らかにしていきたい。

5 . 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 10 件)

- (1) T. Yagai, S. Nakazawa, M. Tsuda, T. Hamajima, "Curvature Analysis of Nb3Sn Strands in React and Wind CIC Conductor for Fusion Magnets", IEEE Transaction on Applied Superconductivity, 査読あり, vol. 22, no.3,(2012),pp4802304.
- (2) S. Nakazawa, S. Teshima, D. Arai, D.

- Miyagi, M. Tsuda, T. Hamajima, T. Yagai, Y. Nunoya, N. Koizumi, K. Takahata, T. Obana, "Optimal Pitch Analysis Governing Contact Strand Number and Lengths With Cu Sleeves at CIC Joints", 査読あり, vol.22, no.3, (2012), pp.4802004.
- (3) D. Miyagi, S. Teshima, S. Nakazawa, D. Arai, M. Tsuda, T. Hamajima, T. Yagai, N. Koizumi, Y. Nunoya, K. Takahata, T. Obana, "Analysis of 3-D locations of All Strands in CIC Conductor", 査読あり, vol. 22, no.3, (2012), pp.4802104.
- (4) T. Yagai, K. Yoshida, K. Hamano, "Buckling Analysis of Nb3Sn Strand for Large Scale Cable-In-Conduit Conductor", IEEE Transaction On Applied Superconductivity, 査読あり vol.23, no.3, (2013), pp.4802504.
- (5) K. Nakamura, Y. Kawahara, T. Takao, T. Yagai, H. Murakami, K. Yoshida, T. Obana, K. Takahata, "AC Loss of Nb3Sn Butt Joint for JT-60SA Central Solenoid", IEEE Transaction On Applied Superconductivity, 査読あり, vol.23, no.3, (2013), pp.4200304.
- (6) D. Miyagi, S. Nakazawa, D. Arai, T. Morimura, M. Tsuda, T. Hamajima, T. Yagai, N. Koizumi, Y. Nunoya, K. Takahata, T. Obana, "Comparison of Analytical Estimation and 3-D Measurement of All Strands Location in CIC Conductor", IEEE Transaction on Applied Superconductivity, 査読あり, vol.23, no.3,(2013), pp.8400904.
- (7) T. Takao, Y. Kawahara, K. Nakamura, Y. Yamamoto, T. Yagai, H. Murakami, K. Yoshida, K. Natsume, S. Hamaguchi, T. Obana, K. Takahata, S. Imagawa, T. Mito, "Thermal Stability of Butt Joint for CS Conductor in JT-60SA", IEEE Transaction on Applied Superconductivity, 査読あり, vol. 24, no. 3,(2014),pp4800804.
- (8) T. Morimura, D. Miyagi, M. Tsuda, T. Hamajima, T. Yagai, Y. Nunoya, N. Koizumi, K. Takahata, T. Obana, "Study on Resistance Distribution Between Superconducting Strand and a Copper Sleeve in a CICC Joint Considering Three-Dimensional Strand Path", IEEE Transaction on Applied Superconductivity, 査読あり, vol.24, no.3, (2014), pp.4801404
- (9) T. Yagai, H. Kudo, K. Hamano, K. Yoshida, S. Hamaguchi, K. Natsume, T. Obana, "Investigation of Frictional Force Applied to Strands Surrounded by Other Strands and Tribological Analysis of Contact Surface in CIC Conductor", IEEE Transaction on Applied Superconductivity, 査読あり, vol.24, no.3,(2014),pp.8800404.
- (10) H. Kudo, T. Yagai, K. Hamano, K. Yoshida, K. Natsume, S. Hamaguchi, T. Obana, "Theoretical and experimental analysis of Nb3Sn strand buckling in large scale CIC

conductor", Fusion Engineering and Design, 査読あり、出版決定 (2014).

〔学会発表〕(計 7 件)

- (1) 22th Magnet Technology, 2011, Marseille, フランス Sep. 12-16
- (2) Applied Superconductivity Conference 2012, Portland アメリカ, Oct. 7-11
- (3) 23th Magnet Technology, Boston アメリカ, Jul. 14-19.
- (4) ISS2012, 東京, Dec. 3-5
- (5) ISS2013, 東京, Nov. 18-20
- (6) ITC23, 岐阜, Nov. 18-21
- (7) 平成 24 年秋期低温工学・超電導学会

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

名称：
 発明者：
 権利者：
 種類：
 番号：
 出願年月日：
 国内外の別：

取得状況 (計 0 件)

名称：
 発明者：
 権利者：
 種類：
 番号：
 取得年月日：
 国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等 「なし」

6. 研究組織

(1) 研究代表者

谷貝 剛 (Yagai Tsuyoshi)

上智大学理工学部 機能創造理工学科

研究者番号：60361127

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：