

# 数値解析および疲労試験を援用した ロボットアーム用複合ケーブルの断線寿命評価



研究ノート

倉敷 哲生\*, 神鳥 遼人\*\*

Evaluation of Fatigue Life of Flexible Cables for Robot Arms  
based on Numerical Analysis and Fatigue Test

Key Words : Flexible Cable, Numerical Analysis, Fatigue Life, Reliability

## 1. はじめに

近年、IoTの進展に伴い産業機械による省人化・自動化の普及ならびにロボット機器の需要が増加し、ロボットアームの品質保証の重要性が高まっている。中でもロボットアーム用の導電ケーブルは、繰り返し利用に伴うロボットアームの性能や寿命に大きく影響を及ぼす。ロボット溶接等に使用される導電ケーブルは、ロボットアームの稼働に追従し引張り・曲げ・ねじりなど複雑な負荷を受けるため、断線寿命評価を困難なものとしている。

JIS C 3005では、曲げ、衝撃、摩耗等を受ける絶縁電線の試験規格を定めている<sup>1)</sup>。試験装置の回転子の試料貫通孔を通じて試料両端を固定し、回転子を連続回転させ試料に生じる破損や割れ等の有無や導体素線の断線本数を目視により調査するものである。また、JIS以外にも、ケーブルメーカーが独自で試験を行い、屈曲試験や摺動試験、ねじり試験、

伸縮試験等が行われている。

一方で、ケーブルには、素線の径や本数、素線を束とした際の撚り方向や撚りピッチ、さらに複数の束をさらに撚って複合化したケーブルの本数や撚り方向など、多くの設計パラメータが存在する。これらのパラメータを変更する毎に長時間を要する断線寿命試験を行うのでは、時間・経済コストの増加となり設計の長期化を招く。

実証試験に先立って数値解析を援用し、断線寿命を評価することは、設計パラメータの絞り込みや設計の最適化に繋がると考える。このような観点から著者らは複合ケーブルの数値モデリング・応力解析と、ケーブル構成材料の最小要素である素線の疲労試験を併用した複合ケーブルの断線寿命評価に取り組んでいる<sup>2)</sup>。本稿ではその研究成果の一部について報告する。

## 2. 断線寿命評価手法

本研究ではケーブルの最小構成要素である銅素線と、素線の集合体であるストランド、さらにそのストランドが複数撚られた形態で構成された複合ケーブルを研究対象とした。断線寿命評価は以下の手順により実施した。

- (1) ケーブルの最小構成要素の素線に対し疲労試験を行い、S-N線図を取得(第3節)。
- (2) ケーブルに作用する複合荷重を有限要素解析によりケーブル内の応力状態を評価(第4節)。
- (3) 疲労試験結果より疲労限度線図を作成し、応力解析結果を参照し初期断線発生回数を推定(第5節)。

以下、各項目について概説する。

## 3. 銅素線に対する疲労試験

素線を複数本束ねたストランド(繊維束)の構造



\* Tetsusei KURASHIKI

1971年2月生まれ  
大阪大学大学院工学研究科 生産加工工学専攻 博士後期課程修了  
現在、大阪大学大学院工学研究科  
ビジネスエンジニアリング専攻 教授  
博士(工学)  
複合材料工学・信頼性工学  
TEL: 06-6879-7563  
E-mail: kurasiki@mit.eng.osaka-u.ac.jp



\*\* Haruto KAMITORI

1993年5月生まれ  
現在、大阪大学大学院工学研究科  
ビジネスエンジニアリング専攻  
博士前期課程2年

であっても、断線の起点は1本の素線であり、素線の断線挙動評価が基礎となる。そこで、JIS C 3102を満たす軟銅線（直径0.45mm）を用いて、疲労試験機（島津オートグラフAG-X）により平均応力を一定として銅素線の引張疲労試験を行った。試験結果として得られた応力振幅—破断寿命関係を図1に示す。試験結果を基に日本材料学会の「金属材料疲労信頼性評価標準-S-N曲線回帰法」<sup>3)</sup>に基づく曲線回帰を行い、S-N曲線を得ている。このS-N曲線を後述する第5節での断線寿命評価において適用する。

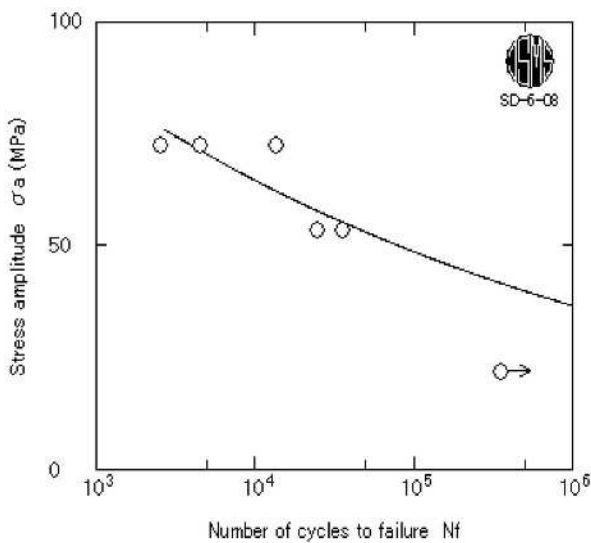


図1 S-N曲線回帰

#### 4. 複合ケーブルの数値モデリング及び応力解析

素線を撚ったストランド、さらにストランドを撚ったケーブルの応力解析を実施するため数値モデリングを行った。図2に有限要素モデルを示す。芯の周りに6本のストランドが撚られている構造であり、芯の部分については、実現象では芯の素線から断線が発生する経験的事実に基づき、芯の部分のみ7本の素線からなる詳細な要素分割を施した。なお、芯の素線と6本のストランドとは撚り方が異なっており、芯部はS撚りであり、6本のストランドはZ撚りと称される構造となっている。図2の(a)、(b)の違いは撚りピッチである。Type IIはType Iに比べて撚りピッチが約6割短くなっている。

非線形有限要素解析 solver Marc を用いて、ストランドや素線間の接触も考慮した応力解析を実施した。ケーブルの端面を完全固定とし、もう片方の

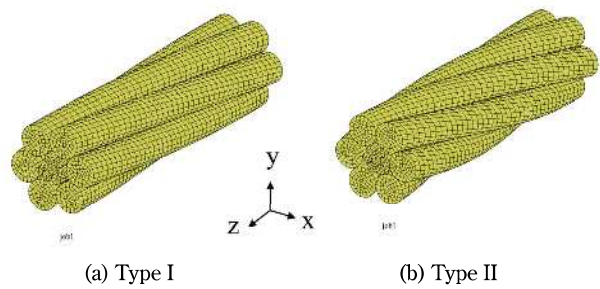


図2 有限要素モデル

端面に対しz方向への引張負荷を加えた後に、z軸に対して $\pm\theta$ の回転変形を与え、素線に生じる応力を評価した。図3には解析結果の一例として、解析最終ステップにおける主応力分布を示す。撚りピッチの違いにより外側ストランドの応力分布も異なる傾向となることが判る。

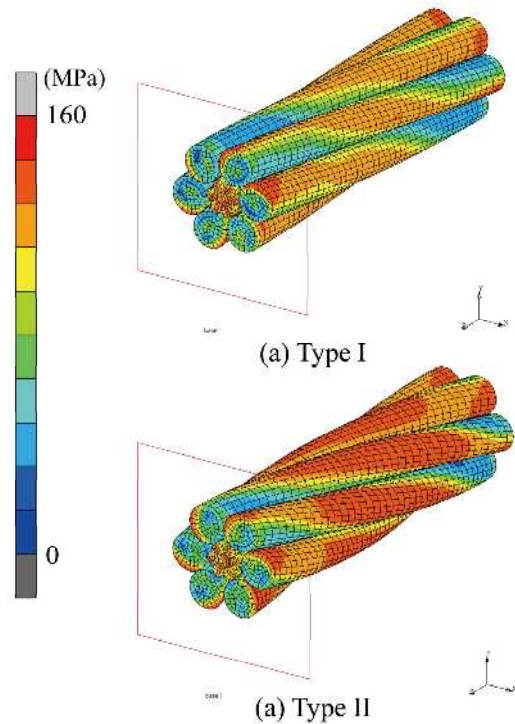


図3 応力分布

#### 5. 疲労限度線図を用いた断線寿命評価

図1より平均応力が一定の場合の素線のS-N曲線を得たが、実際の複合ケーブルの素線では平均応力は変化する環境にある。そこで、S-N曲線と銅素線の静的強度を基に、疲労限度線図を作成し、平均応力・応力振幅の関係として整理する。本研究では疲労限度線図として修正 Goodman 線図を適用した。

この修正 Goodman 線図に基づく断線寿命評価を図4により説明する。

まず、素線の疲労試験による S-N 曲線より例えば繰り返し数 (N) が  $10^5$  での応力振幅を取得する。この時の平均応力、応力振幅ならびに別で求めた静的引張強度を用いることにより図4に示す疲労限度線図を描くことが可能となる。図3の解析結果よりケーブルの各部位ごとに得られる平均応力・応力振幅をプロットする。N= $10^5$ での疲労限度線図を判定基準とし、解析のプロット点が疲労限度線図よりも下側であれば、平均応力・応力振幅が低いため断線には至らない。一方、上側に位置すれば断線に至る。このように、有限要素解析結果と疲労試験結果を併用することにより、任意の繰り返し数での断線を評価することが可能となる。

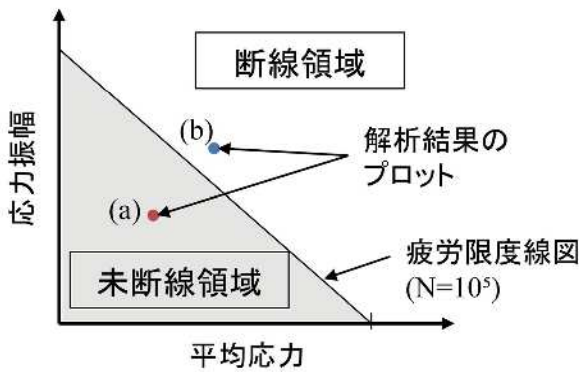


図4 断線寿命評価のイメージ

図5に Type I (撚りピッチが大きい場合) の解析結果を  $N=10^5$  における疲労限度線図上にプロットした結果を示す。Type I における芯部の各素線の部位における平均応力・応力振幅についてプロットしたが、いずれも疲労限度線の下側に位置し、繰り返し数  $N=10^5$  においては断線に至らないと判断することができる。

一方、Type II における (撚りピッチが小さい場合) の解析について同様に  $N=10^5$  における疲労限度線図上にプロットした結果を図6に示す。プロットされた解析点は図5とは異なる傾向にあることが判る。さらに、図中に示した芯部の素線の箇所における解析結果に着目すると、図5,6では異なる傾向にあり、図6の Type II では断線領域として判定されている。図6の Type II について解析結果を調査した結果、図で示す素線の箇所では、隣接するストランドによ

る接触力が Type I と Type II では大きく異なることが判明している (図7)。Type II のような点が現れれば断線に影響を及ぼすこととなる。

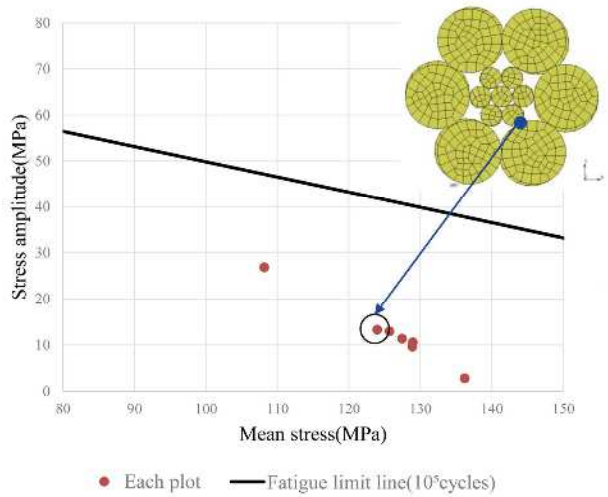


図5 Type Iでの断線寿命評価

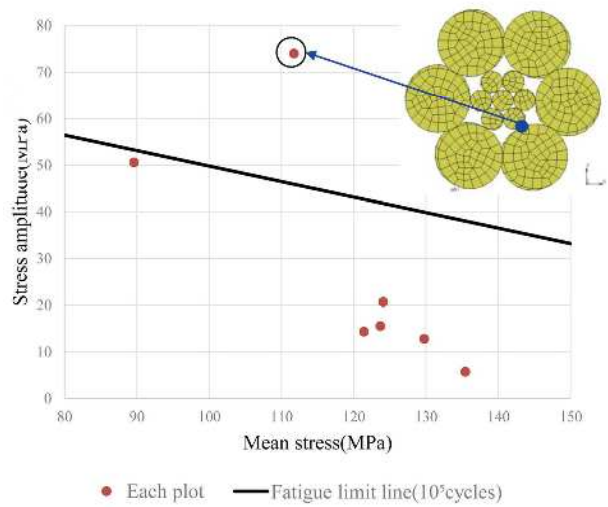


図6 Type IIでの断線寿命評価

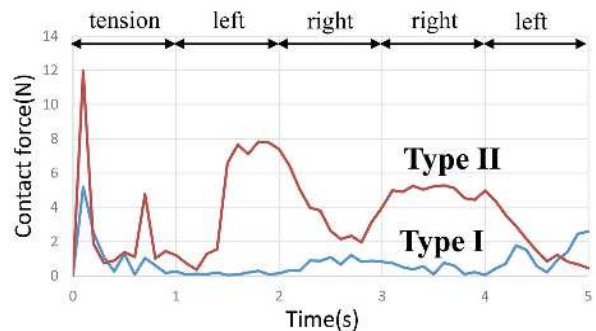


図7 接触力の時間変化

## 6. おわりに

ロボットアーム用複合ケーブルを対象に数値解析と疲労試験を併用した複合ケーブルの断線寿命評価について概説した。数値解析を併用することにより、実験では評価困難な素線間やストランド間の接触状態の評価が可能であり、また、周囲のストランドからの接触力に起因する平均応力・応力振幅の影響が断線に及ぼすメカニズムの解明などに寄与する。

本稿で述べた手法に基づき、実証試験に先立って数値解析を援用して断線寿命を評価することは、複合ケーブルの種々の設計パラメータの絞り込みや設計の最適化など、今後の複合ケーブルの製品設計に寄与すると考える。

最後に、本研究は（社）生産技術振興協会のご支援の下、（株）三ツ星との共同研究の一環として進めたものである。関係各位に感謝の意を表する。

## 参考文献

- 1) JIS C 3005, ゴム・プラスチック絶縁電線試験方法, (2014).
- 2) 神鳥, 倉敷ら, 第11回日本複合材料会議予稿集, (2020).
- 3) JSMS, Standard evaluation method of fatigue reliability for metallic materials -standard regression method of S-N curves, (2008).

