

自主研究

「屈曲試験データベースの構築（２）」

（研究期間：２０１９年４月～２０２０年３月）

報 告 書

２０２０年３月



一般社団法人 電線総合技術センター

内容

1. はじめに.....	3
2. 電線サンプル試作および出来栄え評価	4
2.1 電線サンプル試作.....	4
2.1.1 ポリ塩化ビニル材料の配合組成.....	4
2.1.2 電線押出.....	4
2.2 試験用電線の出来栄え評価方法	6
2.2.1 被覆材引張試験.....	6
2.2.2 導体引張試験	6
2.2.3 密着力試験	7
2.2.4 寸法測定.....	8
2.2.5 撚り込み率測定.....	9
2.3 出来栄え評価まとめ.....	10
3. 屈曲試験.....	11
3.1 試験条件	11
3.2 試験計画	12
3.3 試験結果	13
3.3.1 導体種類の影響.....	13
3.3.2 屈曲寿命のばらつき検討.....	15
3.3.3 ひずみー寿命曲線	16
3.3.4 Coffin-Manson 則.....	17
3.4 屈曲試験まとめ.....	18
4. 導体観察.....	19
4.1 導体材質に関する観察(#1、#2)	19
4.1.1 屈曲試験後導体の観察(マイクロスコープ)	19
4.1.2 屈曲試験後導体の観察(SEM)	20
4.2 素線寸法、撚り構造に関する観察(#1、#3、#5、#6).....	20
4.2.1 屈曲試験後導体の観察(マイクロスコープ)	20
4.2.2 屈曲試験後導体の観察(SEM)	22

4.3 めっき層に関する観察(#1、#4)	24
4.3.1 めっき層の元素分析	24
4.3.2 屈曲試験後導体の観察(マイクロスコープ)	25
4.3.3 屈曲試験後導体の観察(SEM)	26
4.4 破断前サンプルの導体観察	27
4.5 金属組織観察	29
4.5.1 観察概要	29
4.5.2 導体引張試験	29
4.5.3 五連屈曲試験	29
4.5.4 SEM 観察	31
4.6 屈曲寿命差異要因の考察	33
4.6.1 導体強度の影響(#1、#2)	33
4.6.2 素線細径化の影響(#1、#3)	34
4.6.3 めっき層の影響(#1、#4)	34
4.6.4 導体構造の影響(#1、#3、#5、#6)	35
4.7 導体観察まとめ	35
5. 全体のまとめ	36

1. はじめに

近年産業用ロボットの需要が増大しており、これらのロボットの屈曲部で使用される電線には高い屈曲耐久性が要求されている。電線総合技術センター（JECTEC）では、このようなロボット用電線を代表とする高い屈曲耐久性を有した電線・ケーブル設計に資する知見の獲得を目的として、2018年度から系統的な屈曲試験データベースの構築を行っている。

今年度は、当センター所有の 40mm 押出機にて試作した電線サンプルと恒温槽付屈曲試験装置（図 1）を用い、屈曲特性に対する導体の材質、導体素線の寸法、導体の撚り方の影響を定量的に調査すると共に、破断した導体の SEM 観察等によりメカニズムの推定を行った。合わせて、破断までの寿命のばらつきに関する検討を実施した。



図 1 恒温槽付屈曲試験機

2. 電線サンプル試作および出来栄評価

2.1 電線サンプル試作

屈曲試験用の電線サンプルは、汎用的な軟質ポリ塩化ビニル（以下、PVC）で導体を被覆した機器内配線用電線（UL1007、AWG24 サイズ）を模擬したものを JECTEC の設備で試作した。導体の材質は実際の電線製品を念頭に、タフピッチ銅裸線、0.7%スズ合金線、スズメッキ線の三種を選定した。

2.1.1 ポリ塩化ビニル材料の配合組成

被覆材には過去に JECTEC で評価した可塑剤であるフタル酸エステル系のジイソノニルフタレート（以下、DINP）を配合したコンパウンド（JECTEC4-1）を使用した。コンパウンドの配合組成を表 2.1 に示す。

表 2.1 屈曲試験用電線被覆材の配合組成表

原材料	型番	部数
塩ビレジン	TH-1300（大洋塩ビ）	100 部
可塑剤（DINP）	—	50 部
充填剤（炭酸カルシウム）	ホワイトン SB 赤（白石カルシウム）	30 部
安定剤	RUP-103（ADEKA）	5 部
カーボンブラック	VULCAN 9A32（キャボット）	0.25 部

2.1.2 電線押出

JECTEC の $\phi 40\text{mm}$ 押出機を使用して試験用電線を製作した。本研究に使用した電線を製作した押出機を図 2.1 に示す。



図 2.1 押出機

導体は表 2.2 に示したそれぞれ断面積 0.20mm² のものを使用した。また屈曲試験用に購入した市販品も併記した。

表 2.2 導体構成

	#1 裸線	#2 合金線	#3 裸線細	#4 メッキ線
導体構成[本数/素線径[mm]]	7/0.2	7/0.2	40/0.08	7/0.2
導体材質	TPC	0.7%Sn	TPC	Snめっき

	#5 裸線SZ	#6 裸線SS	市販品
導体構成[本数/素線径[mm]]	3/13/0.08	3/13/0.08	7/0.2
導体材質	TPC	TPC	Snめっき

試作で使用了材料および試作条件を以下に示す。

・材料

導体材質：タフピッチ銅（TPC）、0.7%スズ合金、スズめっき銅(TPC)

導体径：0.60mm（素線径 0.2mm / 0.08mm）

絶縁体材料：ポリ塩化ビニル（JECTEC4-1 コンパウンド）

絶縁厚さ：0.45mm（仕上がり外径：1.45mm）

・押出条件

ダイス内径：1.5mm

ニップル内径：0.7mm

押出線速：15m/分

押出機各部位の温度を表 2.3 に示す。

表 2.3 押出温度条件

	シリンダ1	シリンダ2	シリンダ3	ネック	ヘッド	ダイス
設定温度 [°C]	140	160	180	180	185	180

2.2 試験用電線の出来栄え評価方法

社内で製作した電線の特性を確認するために、製作した電線の始端と終端からサンプルを採取し以下の試験を実施して、市販電線との比較を行った。

2.2.1 被覆材引張試験

JIS C 3005 に準拠して被覆材の引張試験を繰り返し回数 $n=5$ で実施した。

試験試料：被覆材単独の管状試験片

標点間距離： 50mm

引張速度： 500mm/min



図 2.2 引張試験機

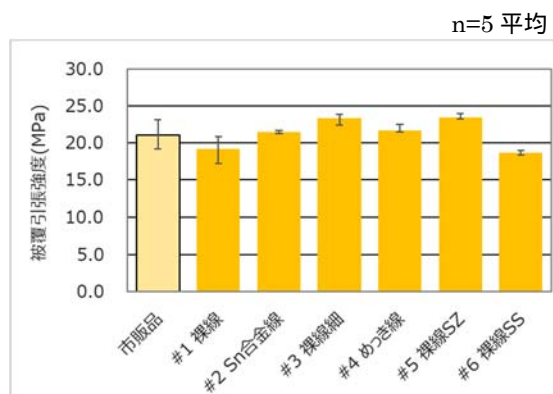


図 2.3 引張試験結果（始端）

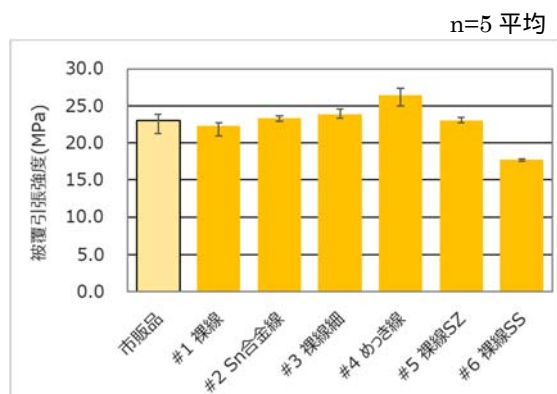


図 2.4 引張試験結果（終端）

図 2.3、2.4 の結果から、#1～#6 のいずれのサンプルも市販品と同程度の被覆強度を有しており試料として適切な出来栄えであることを確認した。

2.2.2 導体引張試験

JIS C 3002 に準拠し、試作で使用した各導体について撚り線の状態で引張試験を繰り返し回数 $n=3$ で実施した。

試験試料：導体 6 種+1 種（市販品）

標点間距離： 500mm

引張速度： 100mm/min

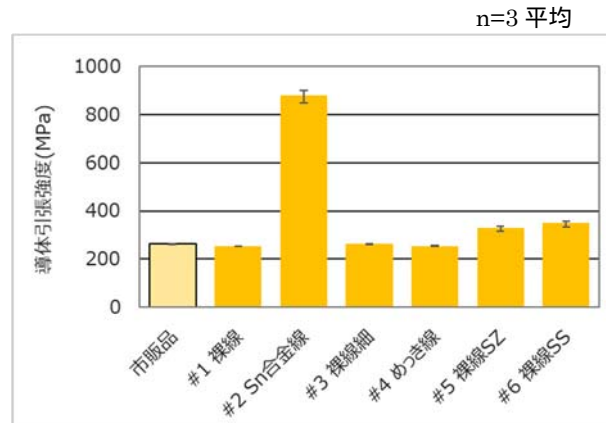


図 2.5 導体引張試験結果

結果、試作で使用した#1、#3～#6 の導体は市販品と類似した強度であることを確認した。また#2 スズ合金線はタフピッチ銅の 3 倍以上の引張強度を有していることがわかった。

2.2.3 密着力試験

JASO D 618 に準拠して被覆材と導体の密着力測定を n=3 で実施し最小値を記録した。

引張方向： 押出方向

試料長さ： 50mm

引張速度： 250mm/min

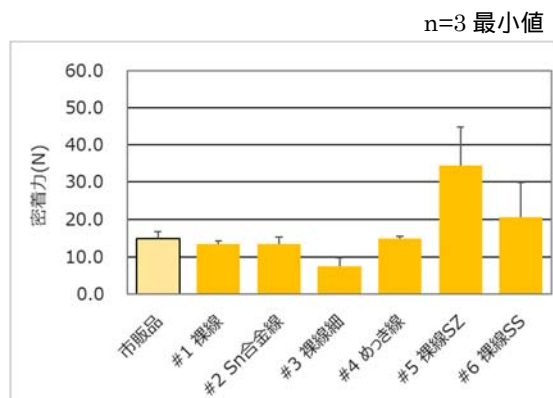


図 2.6 密着力測定結果（始端）

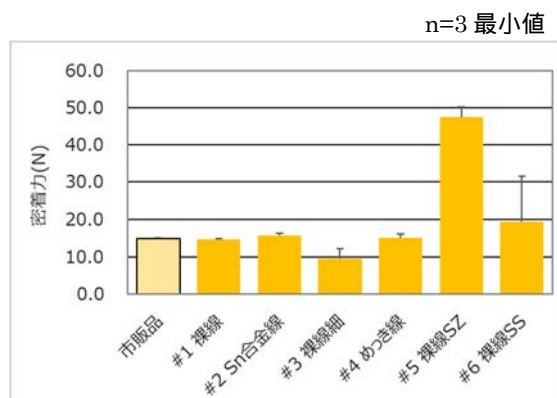


図 2.7 密着力測定結果（終端）

図 2.6、2.7 の結果から、導体構成が同じ 7/0.2 である市販品、#1、#2、#4 は同程度の密着力であることを確認した。導体構成が異なる#3（40/0.08）#5（3/13/0.08 SZ）#6（3/13/0.08 SS）の 3 種は、表面の凹凸が少ない#3 については密着力が低く、凹凸が最も大きい#5 については密着力が高いことを確認した。

なおロープ撚り導体は図 2.8～2.11 のように、SS 撚りと SZ 撚りで凹凸が大きく異なる。

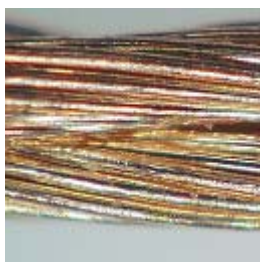


図 2.8 #5(SZ)導体



図 2.9 #5 被覆

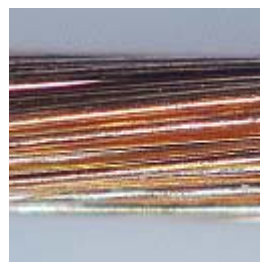


図 2.10 #6(SS)導体



図 2.11 #6 被覆

2.2.4 寸法測定

JIS3005 に準拠し外径と被覆厚さを投影機を用いて測定した。

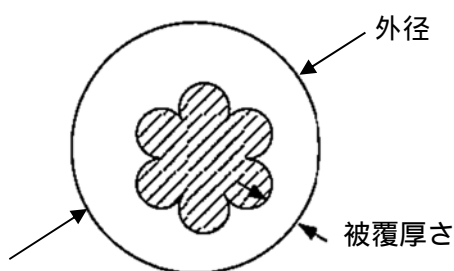


図 2.12 外径、絶縁体厚さの測定

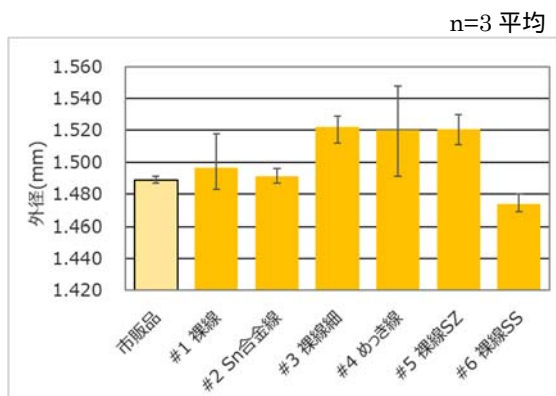


図 2.13 外径測定結果（始端）

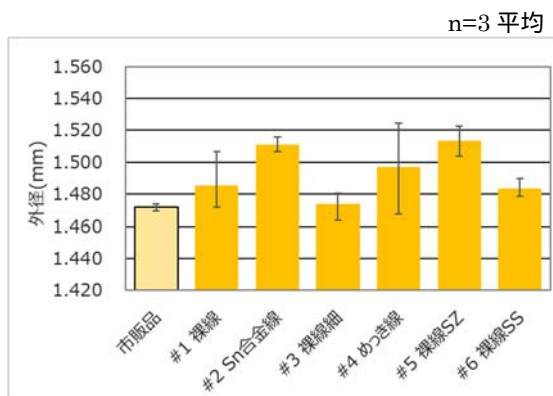


図 2.14 外径測定結果（終端）

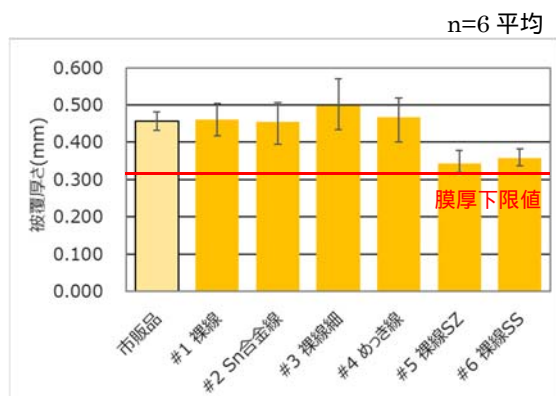


図 2.13 被覆厚さ測定結果（始端）

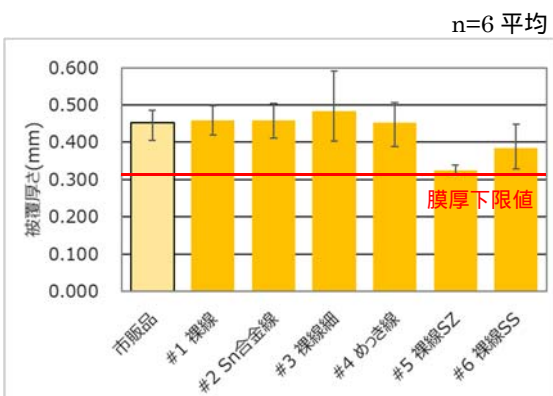


図 2.14 被覆厚さ測定結果（終端）

図 2.11、2.12、2.13、2.14 に示すように、#1～4 については市販品と同等の外径、被覆厚さを持つサンプルを試作できたことを確認した。#5、#6 についてはローブ撚り導体の最大外径が大きいため被覆厚さは狙いよりも薄くなったが、最小膜厚が規格の範囲内であるためこのまま使用した。

2.2.5 撚り込み率測定

集合撚りやローブ撚りの様に、撚り方によって単位長さ当たりの重量（撚り込み率）が異なる場合には、撚り込み率が高い（単位長さ当たりの重量が高い）ほど素線ごとの曲げひずみ量が緩和されるため耐屈曲特性が向上することが知られている。このため#3、#5、#6 について 1m 当たりの重量を測定した。

試料：#3、#5、#6 導体（各 1m）

装置：島津製作所製電子天びん UX4200H

表 2.4 1m あたりの導体重量

	#3 裸線細	#5 裸線SZ	#6 裸線SS
1mあたり重量[g/m]	1.93	2.50	2.52

結果から、#5、6 は#3 と比較して撚り込み率が高いため耐屈曲特性が高い可能性がある。

2.3 出来栄え評価まとめ

市販品 1 種と JECTEC で試作した電線 6 種の出来栄えを評価した結果を以下の表に示す。

表 2.5 出来栄え評価結果（始端）

項目	市販品	#1 裸線	#2 合金線	#3 裸線細	#4 めっき線	#5 裸線SZ	#6 裸線SS
被覆引張試験 [MPa]	21.0	19.2	21.5	23.4	21.7	23.5	16.6
導体引張試験 [Mpa]	262	255	879	263	255	328	349
密着力 [N]	15.0	14.8	15.8	9.6	15.1	34.4	20.5
導体構成	7/0.2TA	7/0.20A	7/0.2TA	40/0.08A	7/0.2TA	3/13/0.08A	3/13/0.08A
仕上がり外径 [mm]	1.489	1.497	1.491	1.522	1.520	1.521	1.474
皮膜厚 [mm]	0.458	0.461	0.455	0.498	0.467	0.343	0.358

表 2.6 出来栄え評価結果（終端）

項目	市販品	#1 裸線	#2 合金線	#3 裸線細	#4 めっき線	#5 裸線SZ	#6 裸線SS
被覆引張試験 [MPa]	23.0	22.1	23.3	28.4	26.6	23.0	17.7
導体引張試験 [Mpa]	262	255	879	263	255	328	182
密着力 [N]	14.9	13.4	13.4	7.4	14.9	37.5	19.2
導体構成	7/0.2TA	7/0.20A	7/0.2TA	40/0.08A	7/0.2TA	3/13/0.08A	3/13/0.08A
仕上がり外径 [mm]	1.472	1.485	1.511	1.474	1.497	1.513	1.484
皮膜厚 [mm]	0.453	0.459	0.458	0.484	0.453	0.324	0.385

これらの結果から、試作した電線サンプルはいずれも UL1007 を満足しており、市販品と比較し遜色ない特性をもつことを確認した。

3. 屈曲試験

JIS、IEC 等の工業規格ではロボット用などの細径高屈曲特性電線に関する屈曲試験規格は 2019 年時点で定められていない。このため、本検討では 2018 年度に JECTEC にて実施した屈曲試験データベース（K18-025）の条件を参考に屈曲試験を実施した。

本試験に使用する恒温槽付き屈曲試験機の構造を図 3.1 に示す。

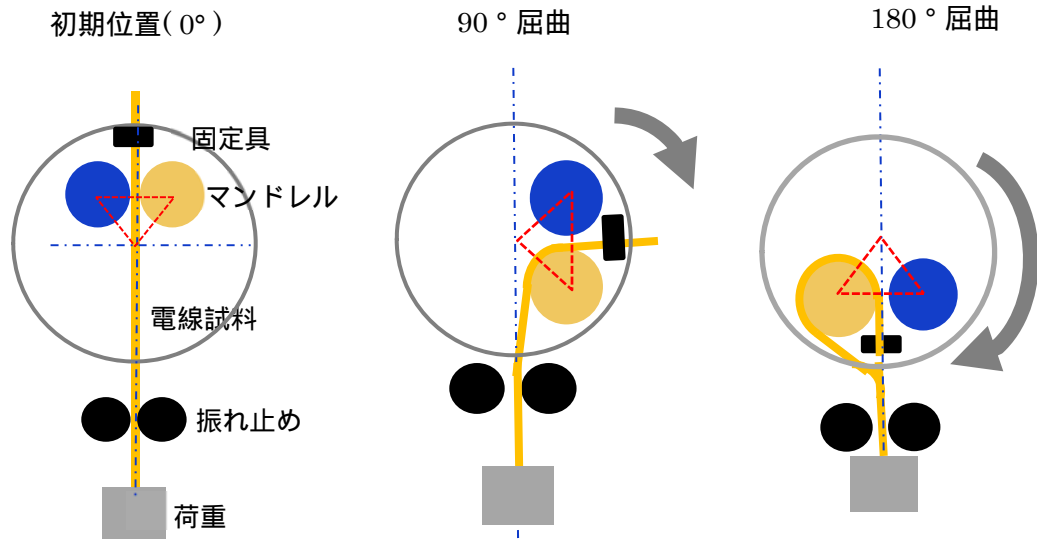


図 3.1 恒温槽付き屈曲試験機の構造

屈曲試験は電線に錘を吊り下げ、試験機上部のマンドレルを固定した円盤が設定した角度を回転することで電線が左右に屈曲される。マンドレルの左 中央 右 中央の動きを1サイクル（屈曲回数1回）とし、1 分間当りの屈曲回数が屈曲速度である。

試験中の導体抵抗をモニタリングし、この値が 3Ω 以上になったら全破断と判断した。

3.1 試験条件

試験条件については 2018 年度の検討結果を参考に屈曲角度と錘の重さ（荷重）を以下のよう
に決定した。なお屈曲速度をひずみ量 0.037、0.018 で変更した理由は、事前検討において
マンドレル径が大きい場合には 60 回/分では電線サンプルの上下動の距離が大きく、荷重の暴
れが発生したためである。昨年度の検討から、この変更は屈曲寿命に大きな影響を与えないこ
とがわかっている。

試験装置：ユアサシステム機器製恒温槽付き屈曲試験機 CL40 Type-E01（図 1）

曲げひずみ量：0.145（ $\phi 10\text{mm}$ ） 0.037（ $\phi 40\text{mm}$ ） 0.018（ $\phi 80\text{mm}$ ）

屈曲角度：180° 荷重：50g

屈曲速度：60 回/分（ひずみ量 0.145） 30 回/分（ひずみ量 0.037、0.018）

試験温度：23

3.2 試験計画

本検討では試作した 6 種のサンプルがそれぞれ一定の曲げひずみ量においてどのように異なる寿命を示すか、また寿命の差異がどのような要因に由来するか調査することを目的とした。

このため、各サンプルの試験を曲げひずみ量 0.145 および 0.037 で実施し、ひずみ - 寿命曲線を作成することとした。またさらに低ひずみ側の傾向を見るため、#1 (裸銅線) #4 (めっき線) については曲げひずみ量 0.018 での試験も行った。表 3.1 に実施した試験条件を示す。

なお#5、#6 の曲げひずみ量 0.037 試験については検討過程で寿命が 100 万回を超えると予想されたため本年度は試験を見送った。

データの収集は来年度曲げひずみ量 0.074 で実施する予定である。

表 3.1 屈曲試験計画

曲げひずみ量	試料	屈曲速度 [往復/分]	荷重 [g]	屈曲角度
0.145	#1,#2,#3,#4,#5,#6	60	50	180°
0.037	#1,#2,#3,#4	30	50	180°
0.018	#1,#4	30	50	180°

3.3 試験結果

3.3.1 導体種類の影響

各曲げひずみ量における屈曲試験結果を図 3.2、3.3、3.4 に示す。

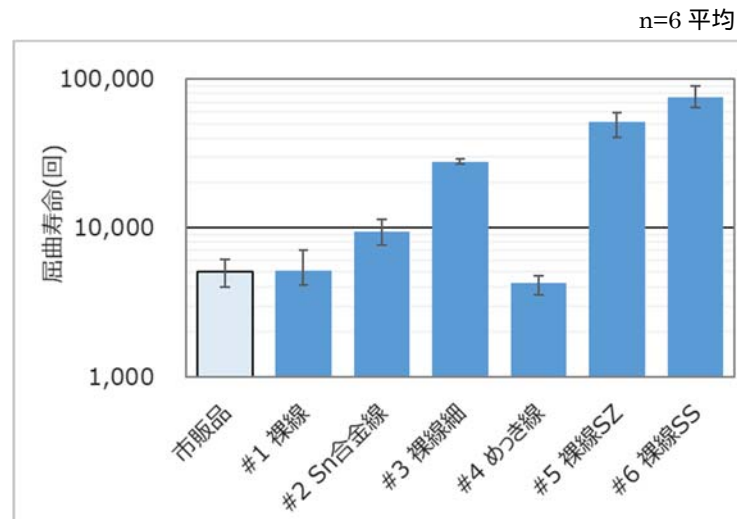


図 3.2 曲げひずみ量 0.145 での各サンプル屈曲試験結果 (屈曲速度 60 回/分)

表 3.2 曲げひずみ量 0.145 での各サンプル屈曲試験結果 (屈曲速度 60 回/分)

	市販品	#1 裸線	#2 合金線	#3 裸線細	#4 めっき線	#5 裸線SZ	#6 裸線SS
平均	5004	5116	9390	27518	4215	51045	75606
最大	6078	6992	11342	28849	4724	59166	89615
最小	3994	4089	7576	26908	3570	40537	64047
変動係数	17%	20%	16%	2%	10%	15%	15%

曲げひずみ量 0.145 の結果 (図 3.2、表 3.2) から、市販品と #1 (裸線)、#4 (めっき線) の屈曲寿命は同程度であることがわかった。また、#2 (合金線) の寿命は、#1 (裸線) のおよそ 2 倍程度であった。

また、#1 (裸線、7 本 / 0.20mm) と #3 (裸線細 40 本 / 0.08mm) の比較から、素線の細径化により屈曲寿命が約 5.4 倍に増大した。

#4 と #5 (ローブ撚り SZ) および #6 (ローブ撚り SS) を比較すると、単純な集合撚りである #3 よりも #5、#6 は長寿命化 (#5 : 1.9 倍、#6 : 2.7 倍) し、#6 (SS 撚り) は #5 (SZ 撚り) よりも長寿命であった。これは撚り構造毎の撚り込み率 (素線の 1 ピッチ当たりの実際の長さとの割合、大きいほど素線ごとの曲げひずみ量は小さくなる) の違いや、素線同士の摩擦状態の違いに由来するのではないかと推測され、検討結果は別途第 4 章にて示す。

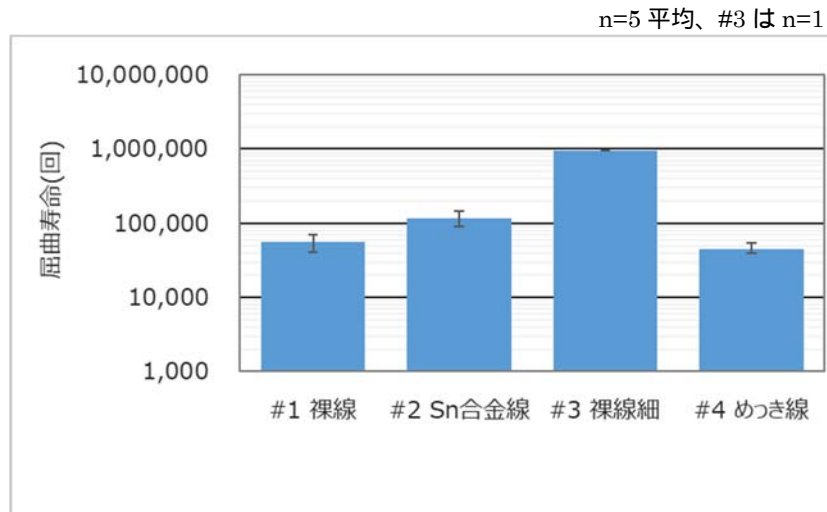


図 3.3 曲げひずみ量 0.037 での各サンプル屈曲試験結果（屈曲速度 30 回/分）

表 3.3 曲げひずみ量 0.037 での各サンプル屈曲試験結果（屈曲速度 30 回/分）

	#1 裸線	#2 合金線	#3 裸線細	#4 めっき線
平均	56275	114968	959867	45207
最大	68977	145709	-	53382
最小	41230	91168	-	39854
変動係数	17%	20%	0%	12%

曲げひずみ量 0.037 の結果（図 3.3、表 3.3）から、#1、#4 の寿命は同程度、#2 は#1 および #4 の 2 倍程度であった。

なお#3 の 1 サンプル以外は 100 万回でも破断しなかったため途中で試験を終了した。したがって、屈曲寿命は 100 万回よりも長いものと推定される。

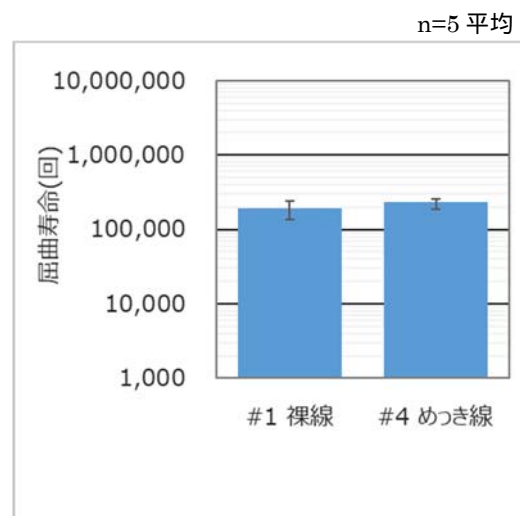


図 3.4 曲げひずみ量 0.018 での各サンプル屈曲試験結果（屈曲速度 30 回/分）

表 3.4 曲げひずみ量 0.018 での各サンプル屈曲試験結果（屈曲速度 30 回/分）

	#1 裸線	#4 めっき線
平均	203507	235927
最大	241590	259326
最小	154903	185850
変動係数	17%	12%

図 3.4、表 3.4 に示すように曲げひずみ量 0.018 の#1（裸線）、#4（Sn めっき線）の寿命は、曲げひずみ量 0.145 と同様に、同程度であることを確認した。また、#2（合金線）も試験を実施したが 100 万回以上でも破断しなかったため試験を打ち切った。

3.3.2 屈曲寿命のばらつき検討

サンプル#1 を $n=30$ 回試験したデータをヒストグラムで図 3.5 に示す。この結果から、中央値よりも長寿命側のばらつきが大きく、極端に短寿命なものは少ない傾向にあることがわかった。

屈曲試験における疲労破壊の寿命分布は一般にワイブル分布に従うとされている¹⁾が、これは導体の破壊が最弱リンクモデルとして扱うことができるためだと考えられている²⁾。このため図 3.5 のように長寿命側に低頻度のテールを持った分布になる。

また、短寿命側については P-S-N 線図などで見られるように、一定応力（＝一定ひずみ）においてごく早期に破壊する確率は非常に少ないため、本検討における $n=30$ の試験では出現しなかったものと考えられる。

試験装置：ユアサシステム機器製恒温槽付き屈曲試験機 CL40 Type-E01（図 1）

曲げひずみ量：0.145（ $\phi 10\text{mm}$ ）

屈曲角度：180°

荷重：50g

屈曲速度：60 回/分

試験温度：23

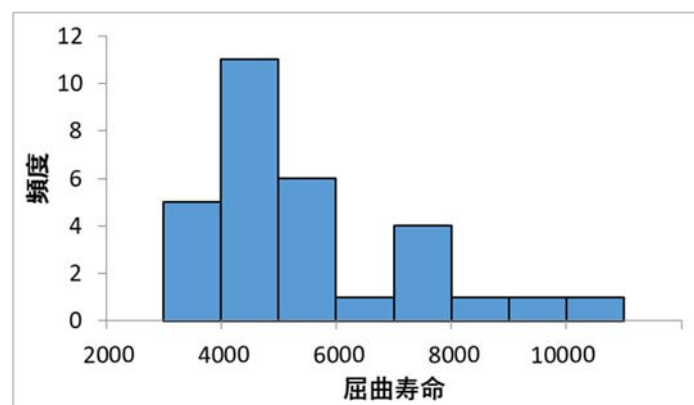


図 3.5 #1 サンプルの屈曲寿命ばらつき（曲げひずみ量 0.145、 $n=30$ ）

3.3.3 ひずみ－寿命曲線

曲げひずみ量 0.145、0.037、0.018 の試験結果を図 3.6 のひずみ - 寿命曲線にまとめて示す。なお本検討の屈曲試験は左右に往復しているため、グラフのひずみ範囲は曲げひずみ量（ひずみ振幅）の 2 倍の値となっている。

下図のように両対数グラフで直線関係となる場合、その挙動はべき関数 ($y=a \cdot x^b$) で近似できるが、#1（裸線）と#4（Sn めっき線）は試験範囲で指数 b （図 3.6 における傾き）はほぼ同じ値であった。

一方、#2（合金線）の指数 b は、10,000 回～100,000 回の範囲では、#1（裸線）と同等の値であるが全体的に長寿命側にシフトしている。しかし曲げひずみ量 0.018 では 100 万回以上でも破断しなかったことから、ひずみ量 0.037～0.018 の領域では、#1、#4 より緩い傾きを持ちひずみ量と破断回数の関係がひずみ領域によって異なる。この解釈については 3.4 節で述べる。

#5（SZ 撚り）、#6（SS 撚り）については曲げひずみ量 0.074 での屈曲試験を来年度に実施し、ひずみ - 寿命曲線を作成する予定である。

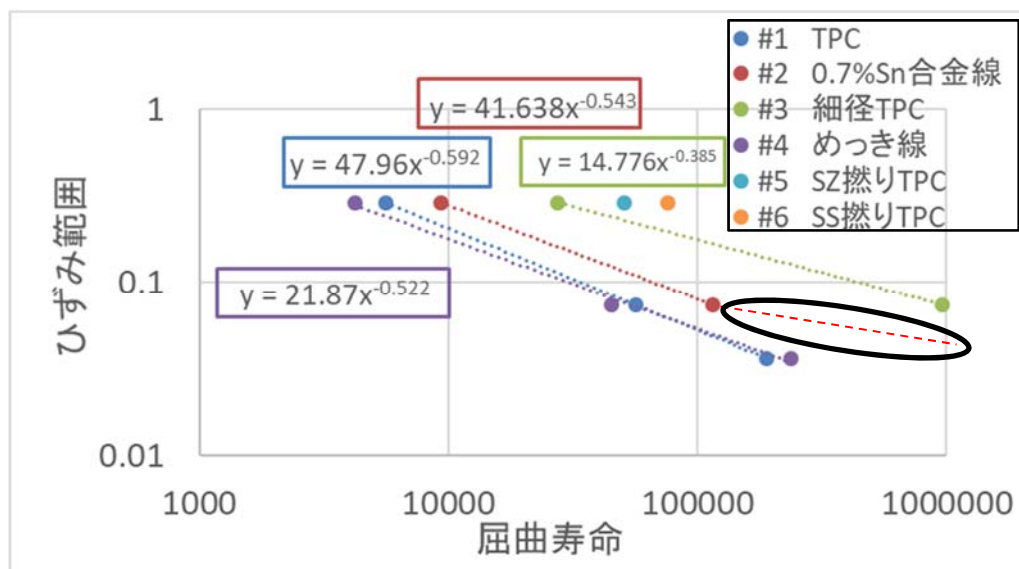


図 3.6 ひずみ - 寿命曲線
（黒円内は 100 万回以上の寿命であったことからの予測）

3.3.4 Coffin-Manson 則

材料の疲労破壊におけるひずみと寿命の関係について、弾性ひずみ範囲 $\Delta\varepsilon_e$ に於ける高サイクル疲労（ $10^4 \sim$ 回）については Basquin が、塑性ひずみ範囲 $\Delta\varepsilon_p$ に於ける低サイクル疲労（ $\sim 10^4$ 回）については Coffin と Manson がそれぞれモデル化している。これらを合わせた全ひずみ範囲 $\Delta\varepsilon (= \Delta\varepsilon_e + \Delta\varepsilon_p)$ について考えると下式(1)のように表すことができることが知られている。

$$\frac{\Delta\varepsilon}{2} = \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b + \varepsilon'_f (2N_f)^c \quad (1)$$

\uparrow

弾性ひずみ領域

\uparrow

塑性ひずみ領域

ここで σ'_f ：疲労強度係数（材料ごとの定数）

E ：弾性率

$2N_f$ ：交番疲労寿命

b ：疲労強度指数（材料ごとの定数）

ε'_f ：疲労延性係数（材料ごとの定数）

c ：疲労延性指数（材料ごとの定数）

ただし本検討での試験は両側に屈曲しているため、全ひずみ範囲はサンプル直径とマンドレル径の比から算出される値(振幅)の2倍になることから、左辺を2で割っている。また、サンプルは屈曲1往復でひずみピークを2回経過することから、疲労寿命を $2N_f$ と定義している。式(1)の右辺第一項が弾性ひずみ範囲 $\Delta\varepsilon_e$ に、第二項が塑性ひずみ範囲 $\Delta\varepsilon_p$ に相当する。

X軸に疲労寿命、Y軸にひずみ量を取ったひずみ - 寿命曲線の模式図を図3.7に示す。

実線で示した全ひずみ領域の寿命曲線は、塑性ひずみから予測される寿命と弾性ひずみから予測される寿命を足し合わせたものであり、それぞれの領域で傾きが異なっている。

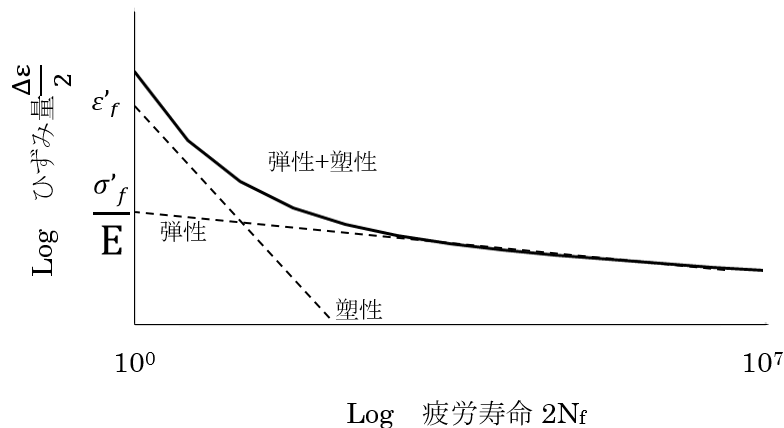


図 3.7 ひずみ - 寿命曲線模式図

これは式(1)の弾性ひずみ領域に於ける傾きである疲労強度指数 b が一般に $-0.05 \sim -0.12$ の範囲であるのに対し、塑性ひずみ領域に於ける傾きである疲労延性指数 c は一般に $-0.5 \sim -0.7$ の範囲にあることによる。この指数 b と指数 c に差のため、ひずみ - 寿命曲線は図 3.7 において実線で示したような下に凸の形状の曲線となる。

図 3.6 の各寿命曲線はいずれも式(1) の Coffin-Manson 則でモデル化することができる。

3.4 屈曲試験まとめ

屈曲試験の結果から、サンプル#1～#4 の曲げひずみ量と破断回数の関係は、Coffin-Manson 則に準ずることがわかった。

まず導体材質について検討すると、主要成分がタフピッチ銅である#1(裸線)と#4(めっき線)の寿命は同程度であった。#1、#4 は曲げひずみ量 $0.145 \sim 0.018$ の範囲では主に塑性ひずみの影響下にあると考えられる。

#1(タフピッチ銅裸線)と#2(スズ合金線)を比較すると、#2 は低ひずみ側で#1 の 2 倍程度、高ひずみ側ではさらに大きな倍率の寿命を有することがわかった。これはタフピッチ銅と 0.7%スズ合金の材料の違いによる破壊しにくさの差異に由来するものと考えられる。#2(合金線)は曲げひずみ量 $0.037 \sim 0.018$ では高ひずみ側よりも緩やかな傾きを示すことから、低ひずみ側では弾性ひずみの影響が主となる領域に入っているものと推測した。図 3.6 において#2 では 100,000 回以上の範囲で上記のように弾性ひずみによる屈曲点が見え初めているのに対し、#1 では見られていない理由としては、疲労強度係数 σ'_f 、疲労延性係数 ε'_f がそれぞれ材料により異なるためではないかと考えられる。

また、素線寸法について#1(タフピッチ銅裸線、7/0.2mm)と#3(タフピッチ銅裸線細、40/0.08mm)を比較すると、素線の細径化により疲労寿命は大きく増大した。さらに導体の撚り構造については、#3(集合撚り)、#5(ロープ撚り SZ)、#6(ロープ撚り SS)の比較から、素線径が同じでも撚り線の構造の違いにより疲労寿命は異なることを確認した。これは素線同士の摩擦され方の違いなどに由来するものと考えられる。なお表 2.4 の結果から#2、#3 の撚り込み率は同程度であるため、撚り込み率による差異は屈曲寿命の違いの主な要因ではないと考えられる。

4. 導体観察

第3章に示したように、導体の材質および構造の差異が屈曲寿命の差異をもたらすことがわかったが、この破壊メカニズムの差異について情報を得るため試験前後の導体をマイクロスコープおよび走査型電子顕微鏡を用いて観察した。

4.1 導体材質に関する観察(#1、#2)

4.1.1 屈曲試験後導体の観察(マイクロスコープ)

JECTEC 所有のハイロックス製デジタルマイクロスコープ KH-7700 を用いて、曲げひずみ量 0.145 の試験後の電線サンプルの導体側面および破断面の外観観察を行った。



図 4.1 デジタルマイクロスコープ装置写真

装置：ハイロックス製デジタルマイクロスコープ KH-7700

サンプル：曲げひずみ量 0.145 の屈曲試験後のサンプル導体（市販品および#1、#2）

表 4.1 導体側面のマイクロスコープ観察写真（7/0.2mm）

倍率	市販品	#1 裸線	#2 合金線
×35			
×100			
×100			

表 4.1 の観察結果から、市販品および#1（タフピッチ銅裸線）では破断部近傍側面（表中段）に細かな皺が発生していることがわかる。この皺は非曲げ部（表下段）には見られないことから、繰り返し屈曲により導体側面に生じものと推測される。一方、#2（0.7%スズ合金線）の導体側面には皺が観察されなかった。

4.1.2 屈曲試験後導体の観察(SEM)

静岡県工業技術研究所浜松工業技術支援センター（工技センター）所有の日本電子製走査電子顕微鏡（SEM）JSM-7610FPlus を用いて、曲げひずみ量 0.145 での試験後の#1、#2 電線サンプルの導体側面および破断面の形状観察を行った。

試料：曲げひずみ量 0.145 屈曲試験後サンプル（#1、#2）

装置：日本電子製走査電子顕微鏡 JSM-7610FPlus

観察条件：加速電圧 5kV、倍率 250 倍

表 4.2 屈曲試験後の導体側面、破断面の SEM 観察写真

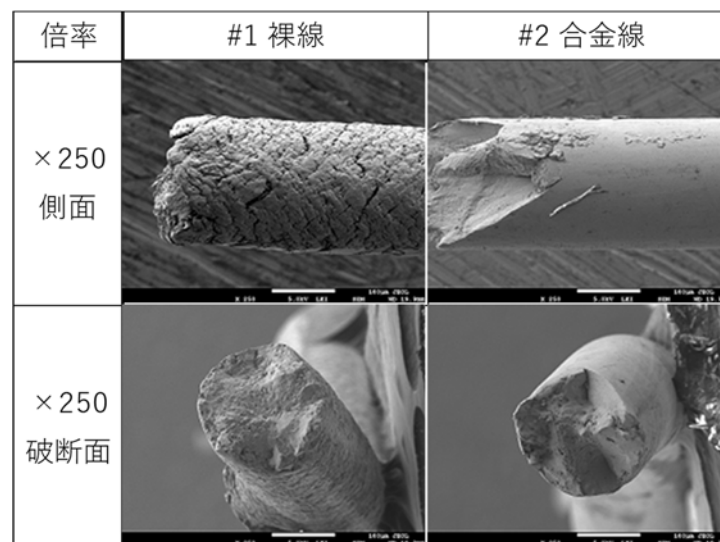


表 4.2 の観察結果から、マイクロスコープで#1（タフピッチ銅裸線）の導体側面に観察された皺は繰り返し屈曲で生じた亀裂と推定できる。また、#1 の破断面は側面の亀裂が徐々に中心方向へ進展し最終的に破断した典型的な疲労破壊の形状を示しているのに対し、#2（0.7%スズ合金線）の破断面はシャープな形状を有し、側面に明確な亀裂が見られないなど、#1 と#2 は異なる破壊形態であった。

4.2 素線寸法、撚り構造に関する観察(#1、#3、#5、#6)

4.2.1 屈曲試験後導体の観察(マイクロスコープ)

マイクロスコープを用いて曲げひずみ量 0.145 での試験後の#1（タフピッチ銅裸線）#3（集

合撚り)、#5(ロープ撚りSZ)、#6(ロープ撚りSS)の導体側面および破断面の形状観察を行った。

装置：ハイロックス製デジタルマイクロスコープ KH-7700

サンプル：曲げひずみ量 0.145 の屈曲試験後サンプル導体(市販品および#1、#3、#5、#6)

表 4.3 導体側面のマイクロスコープ観察写真

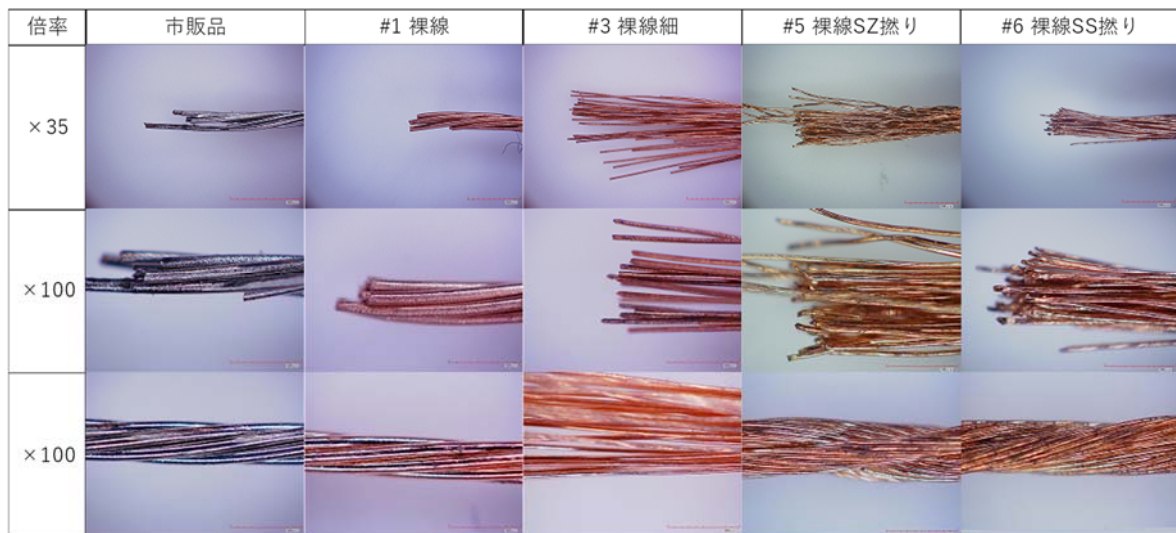


表 4.2 の観察結果から、いずれのサンプルの破断部近傍側面(表中段)にも細かな皺が発生していることがわかる。ただし#3(集合撚り)、#5(ロープ撚りSZ)、#6(ロープ撚りSS)を比較すると、#5については局所的な深い摩耗があり、#3、#6は全周に微小な皺が見られる。これは#5が#3および#6とは異なる素線同士の摩耗の仕方をしているのではないかと考えられる。

#3、#5、#6の3種について屈曲試験の結果(3.3.3節、3.4節)を検討すると、素線径が0.08mmと同等であるにも関わらず屈曲寿命に約2~3倍の差異が見られた。集合撚りである#3とロープ撚りである#5、#6の差異はおよそ1.3倍の撚り込み率の違い(2.2.5節)に起因する素線単位での曲げひずみ量の緩和と考えられるが、ロープ撚り同士である#5と#6の差異の要因は明確でない。このため#5、#6の破断部付近のマイクロスコープ観察を行った。

装置：ハイロックス製デジタルマイクロスコープ KH-7700

サンプル：曲げひずみ量 0.145 の屈曲試験後のサンプル導体(#5、#6)

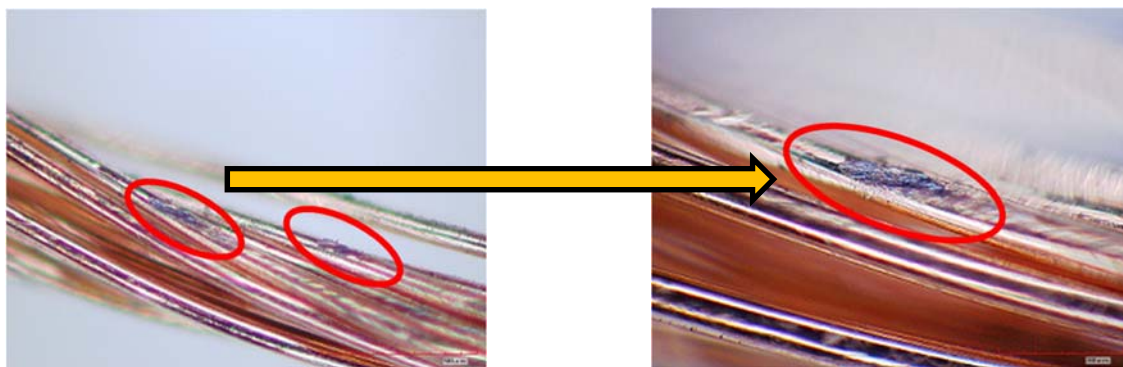


図 4.2 #5 裸線 SZ 撚りの試験後導体側面観察（左：200 倍、右：400 倍）



図 4.3 #6 裸線 SS 撚りの試験後導体側面観察（200 倍）

#5、#6 の屈曲試験後導体のマイクロスコブ観察の結果から、#5（SZ 撚り）には図 4.2 のような局所的な凹みが見られることがわかった。一方、#6（SS 撚り）には局所的な凹み等は見られず、素線同士の接触は全周で均等に生じているものと推測された。また#6 の破断部付近には屈曲時に生じたと思われる銅粉らしきものが見られた。

これらの観察結果から、#5（SZ 撚り）は局所的な素線同士の摩擦が一部の素線に早期の破断を発生させており、それにより屈曲寿命が#6（SS 撚り）と比較して短くなったのではないかと考えられる。

4.2.2 屈曲試験後導体の観察 (SEM)

SEM を用いて曲げひずみ量 0.145 での試験後の#1、#3 の電線サンプルの導体側面および破断面の形状観察を行った。

試料：曲げひずみ量 0.145 屈曲試験後サンプル（#1、#3）

装置：日本電子製走査電子顕微鏡 JSM-7610FPlus

観察条件：加速電圧 5kV、倍率 250 倍

表 4.4 屈曲試験後の導体側面、破断面の SEM 観察写真

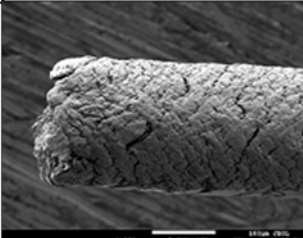
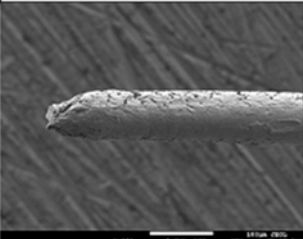
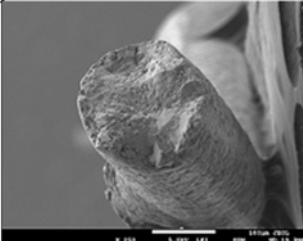
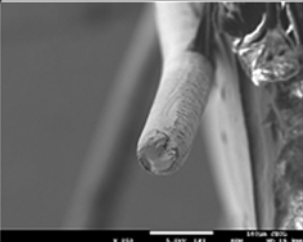
倍率	#1 裸線	#3 裸線細
×250 側面		
×250 破断面		

表 4.4 の結果から、#1(タフピッチ銅裸線 7/0.2mm)と#3(タフピッチ銅裸線 40/0.08mm)の試験後導体側面にはいずれも繰り返し屈曲で生じたと推定される亀裂が観察された。ただし #1 と比較すると、#3 の方が素線寸法の違いによる素線単位でのひずみ量の小ささから、亀裂の深さは相対的に小さくなっているものと考えられる。

4.3 めっき層に関する観察(#1、#4)

4.3.1 めっき層の元素分析

#4(めっき線)で用いている導体はタフピッチ銅の導体表面に $0.5\mu\text{m}$ 前後のSnめっき層が形成されたものであるが、導体メーカーの試験成績書に記載されている厚みはHOT-DIP Snめっき槽の消費量から算出した値とされており、導体断面の層の厚みを実測したものではない。また、スズめっきと銅の界面には高硬度の銅-スズ合金層が形成されることが一般に知られているが、その厚みについては情報がなかった。

そこで、めっき層の厚みおよび構造について情報を得る目的で、工技センターのSEMに付属したエネルギー分散型X線分析装置(EDS)を用いて、めっき線(#4)表面のめっき層および合金層の観察を行った。

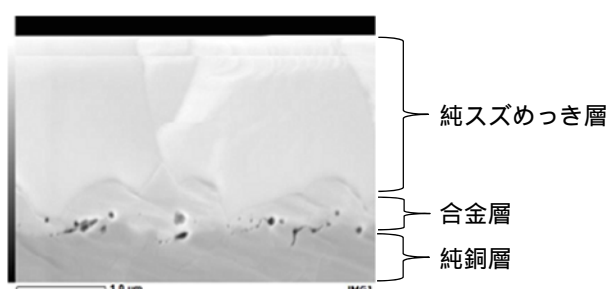


図 4.4 めっき線断面 SEM 観察写真

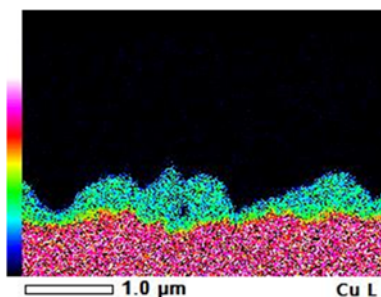


図 4.5 EDS 分析結果(銅)

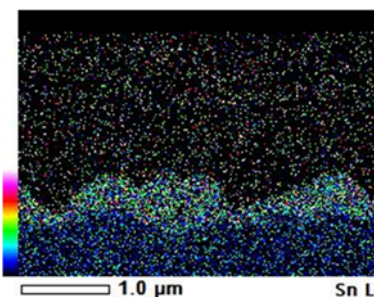


図 4.6 EDS 分析結果(スズ)

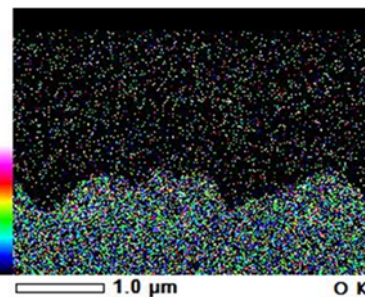


図 4.7 EDS 分析結果(酸素)

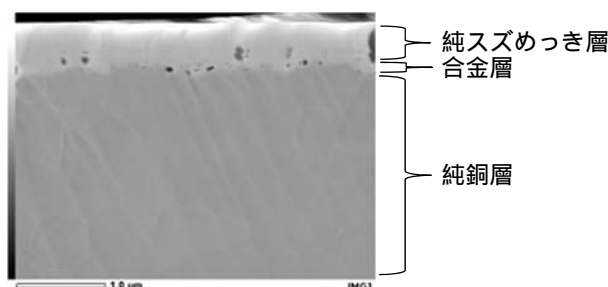


図 4.8 めっき線断面 SEM 観察写真

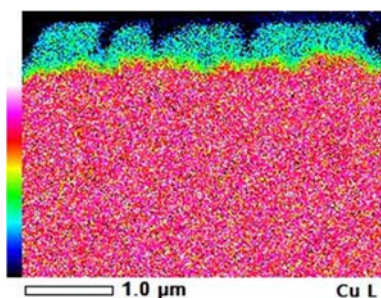


図 4.9 EDS 分析結果(銅)

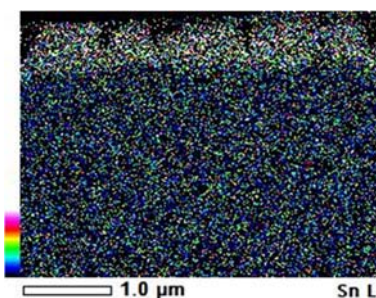


図 4.10 EDS 分析結果(スズ)

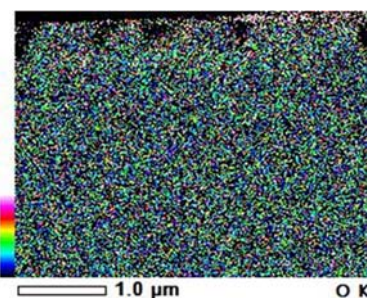


図 4.11 EDS 分析結果(酸素)

EDX分析結果から、#4 導体の外周に $0.3 \sim 2.0 \mu\text{m}$ のスズめっき層が観察された。導体メーカーの検査成績書では $0.5 \mu\text{m}$ 厚となっているが、部位により厚みに大きなばらつきがあることが確認された。スズめっき層と純銅導体の間には $1 \mu\text{m}$ 弱程度の Cu-Sn 合金層と拡散孔(カ-ケンダルポイド)が観察された。Cu-Sn 合金層は純銅よりも高い硬度を持つことが知られており、屈曲寿命に影響を及ぼす可能性が考えられたが、試験結果(図 3.2、表 3.2)からはタフピッチ銅裸線との間に明確な差異は確認できなかった。

4.3.2 屈曲試験後導体の観察(マイクロスコープ)

マイクロスコープを用いて曲げひずみ量 0.145 での試験後の#1(タフピッチ銅裸線)、#4(めっき線)の導体側面および破断面の形状観察を行った。

装置：ハイロックス製デジタルマイクロスコープ KH-7700

サンプル：曲げひずみ量 0.145 の屈曲試験後サンプル導体(市販品および#1、#4)

表 4.5 導体側面のマイクロスコープ観察写真(7/0.2mm)

倍率	市販品	#1 裸線	#4 めっき線
×35			
×100			
×100			

表 4.5 の観察結果から、市販品、#1（タフピッチ銅裸線）、#4（タフピッチ銅スズめっき線）のいずれにも破断部近傍側面（表中段）に細かな皺が発生していることがわかる。このため、めっき層の有無は繰り返し屈曲による導体側面での微小亀裂の発生に大きく影響しないものと考えられる。

4.3.3 屈曲試験後導体の観察(SEM)

SEM を用いて曲げひずみ量 0.145 での試験後の#1、#4 の電線サンプルの導体側面および破断面の形状観察を行った。

試料：曲げひずみ量 0.145 屈曲試験後サンプル（#1、#4）

装置：日本電子製走査電子顕微鏡 JSM-7610FPlus

観察条件：加速電圧 5kV、倍率 250 倍

表 4.6 屈曲試験後の導体側面、破断面の SEM 観察写真

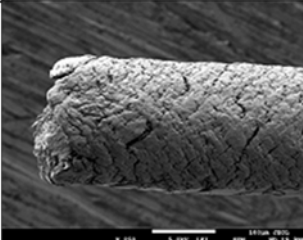
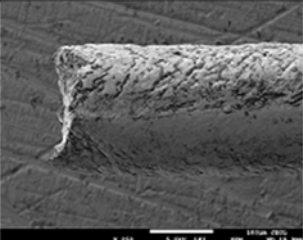

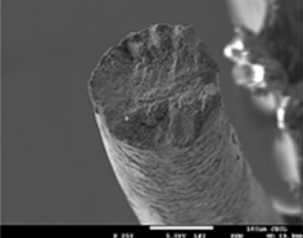
倍率	#1 裸線	#4 めっき線
×250 側面		
×250 破断面		

表 4.6 の結果から、#1（タフピッチ銅裸線）と#4（タフピッチ銅スズめっき線）の導体側面にはいずれも繰り返し屈曲で生じたと推定される亀裂が観察された。破断面の形状も類似しており、これらの結果からめっき層の有無は耐屈曲特性に明確な影響を与えないものと考えられる。

4.4 破断前サンプルの導体観察

破断のメカニズムを知るために、4種類の導体（#1～#4）について、屈曲寿命平均値の約8割程度の回数屈曲した電線サンプルを作成し、屈曲部の導体側面のSEM観察を行った。

試料：曲げひずみ量 0.145 屈曲試験後サンプル（#1～#4）

試験装置：ユアサシステム機器製恒温槽付き屈曲試験機 CL40 Type-E01

観察装置：日本電子製走査電子顕微鏡 JSM-7610FPlus

観察条件：加速電圧 5kV

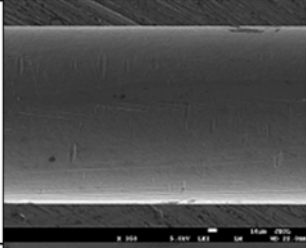
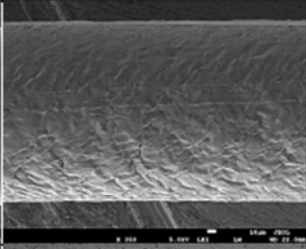
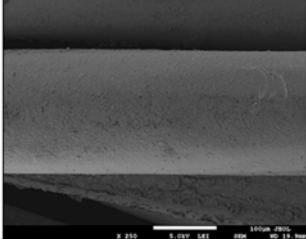
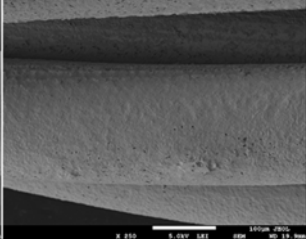
表 4.7 屈曲試験を破断前に中断した導体側面の SEM 観察写真

倍率	#1 裸線	#2 合金線	#3 裸線細	#4 めっき線
屈曲回数	3000回	7000回	22000回	3000回
×350 側面				
×1000 側面				

この結果から、#1（裸線）は 3000 回ではまだ大きな亀裂が見られないが、#4（めっき線）では表面のめっき層に亀裂が見られ、屈曲寿命は同程度であるものの屈曲途中での導体表面の状態には差異があることがわかった。#1 の屈曲寿命と合わせて検討すると、亀裂の進展は屈曲回数に比例するのではなく屈曲寿命の最後の 1～2 割のところで急激に進展していくと推測できる。

また、#4 についてはめっき層のみに亀裂が生じているのか、めっき層の下側の導体にも亀裂が生じているのか検討するため、酸処理（塩酸 10 秒浸漬後純水洗浄）によりめっき層を除去した 3000 回屈曲後サンプルについて観察した結果を下の表 4.8 に示す。この結果から、めっき層除去後の 3000 回屈曲後めっき線導体には顕著な亀裂が見られず、3000 回屈曲後の導体自体の亀裂の生じ方は#1、#4 で同程度であり、めっき層のみに皺（亀裂）が生じたものと考えられる。

表 4.8 めっき層除去前後での SEM 写真（#1、#4）

倍率	#1 裸線	#4 めっき線
屈曲回数	3000回	3000回
×350 酸処理前		
×250 酸処理後		

#2（合金線）についても、この段階において亀裂はほとんど見られないことがわかった。

また、#3（裸線細）では表面に亀裂よりも素線同士の擦れに由来すると思われる摩擦痕（図 4.12）が見られた。#3 は 0.08mm 素線 40 本の集合撚りであるが、このような導体構成では 4.2 節で検討したロープ撚り導体 2 種の差異のように、素線同士の擦れの大小が屈曲寿命に影響している可能性がある。

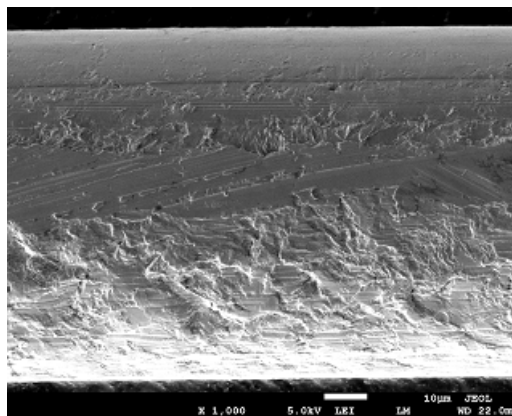


図 4.12 #3（裸線細）の摩擦痕の SEM 写真（1000 倍）

4.5 金属組織観察

3 章での屈曲試験のデータや、4.1 節での検討結果から、導体の材料特性が屈曲寿命に大きく影響することが分かった。そこで、導体の材料特性が屈曲特性に与える影響を知るために、材質・加工処理状態が異なる導体 6 種を入手し、五連屈曲試験と金属組織の観察を行った。

4.5.1 観察概要

観察を実施した導体 6 種を表 4.9 に示す。

表 4.9 導体（単線）6 種の熱処理条件と材質

サンプル名	H-1	H-2	H-3	O-1	O-2	O-3
熱処理条件	伸線加工上がり			焼なまし		
導体材質	TPC	0.3%Sn	0.7%Sn	TPC	0.3%Sn	0.7%Sn

いずれも導体径 0.65mm の単線であり、タフピッチ銅、0.3%スズ合金、0.7%スズ合金の伸線加工上がり材と焼なまし材の 6 種である。

4.5.2 導体引張試験

JIS C 3002 に準拠して、それぞれの導体の引張試験を繰り返し回数 $n=3$ で実施した。

試験試料：導体 6 種（H-1～H-3、O-1～O-3）

標点間距離：500mm

引張速度：100mm/min

表 4.10 導体（単線）の引張試験結果

	H-1	H-2	H-3	O-1	O-2	O-3
引張強さ [MPa]	510	646	721	220	278	298

この結果から、伸線加工上がり材（H-1～H-3）と焼なまし後の導体（O-1～O-3）を比較すると 2 倍以上の引張強さの違いがあることがわかった。また、スズの添加量が増えるに伴って導体強度が増大することを確認した。

4.5.3 五連屈曲試験

単線導体 6 種について、スズ添加量および加工条件による屈曲寿命の差異を見るため、五連屈曲試験機を用いた屈曲試験を行った。

試験試料：導体 6 種（H-1～H-3、O-1～O-3）

装置：大東特殊電線製 5 連屈曲試験機 DBS-1302-10

曲げひずみ量：0.065（ 10mm ） 0.033（ 20mm ）

角度：90°

荷重：300g

試験速度：30 往復/分

表 4.11 導体（単線）の屈曲試験結果

		n=5 平均					
曲げひずみ量		H-1	H-2	H-3	O-1	O-2	O-3
屈曲寿命[回]	0.065	50	186	603	18	42	48
	0.033	114	528	1178	25	110	136

表 4.12 導体（単線）の屈曲試験後破断面 SEM 観察結果

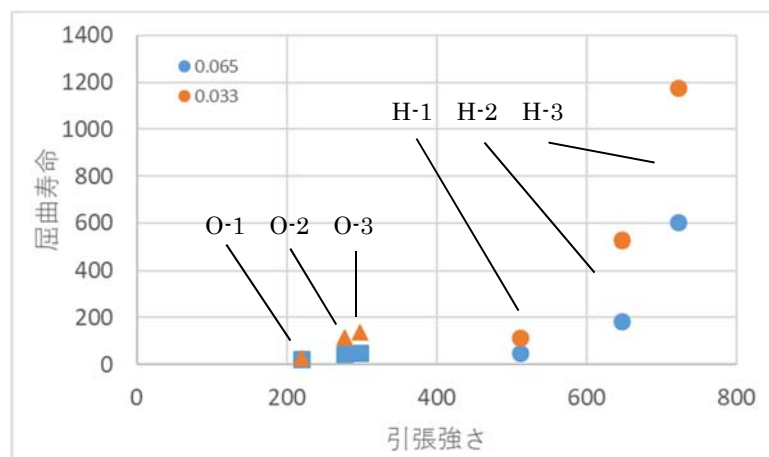
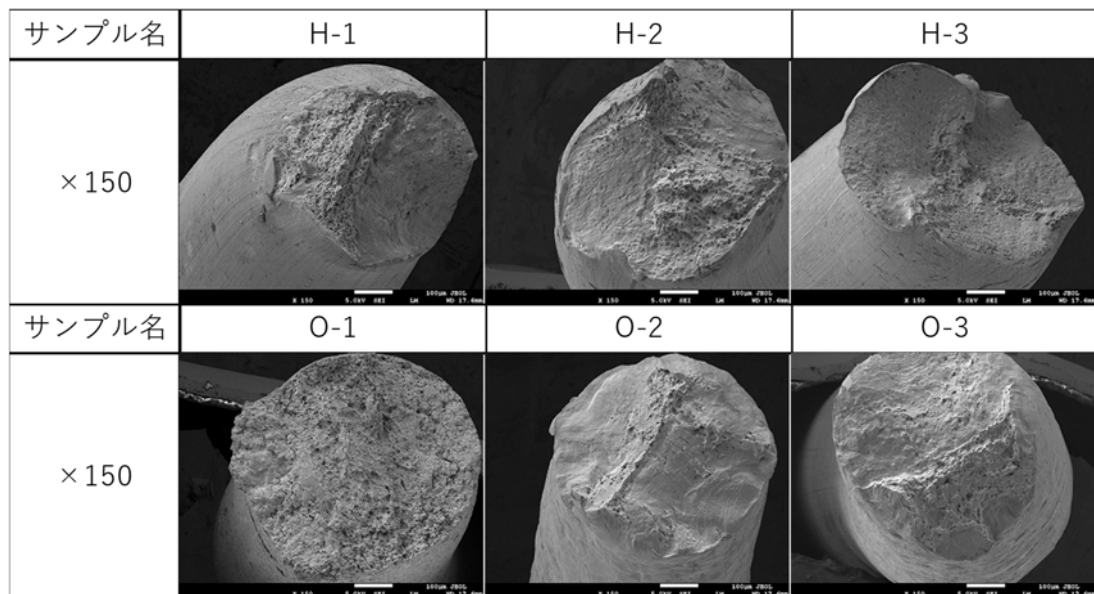


図 4.13 五連屈曲試験機による屈曲寿命と引張強さの相関

表 4.12 の結果から、伸線加工上がりの H-1 (TPC) および H-3 (0.7%スズ合金) の破断面は表 4.2 で示した試作電線の#1 (裸線 TPC) および#2 (合金線) の破断面にそれぞれ類似していることがわかった。また、4.1.2 節での考察と同様に TPC 導体と 0.7%スズ合金導体の屈曲試験後の破断面の形状には差異があることが確認できた。TPC では破断面において、破断時の急激な延性破壊の際に生じるディンプル(微小なくぼみの集合)がより多い面積を占めており、スズ合金線ではディンプルの割合が TPC よりも少ない。これはスズ合金線の方が亀裂が進展しても破断しにくく、結果として屈曲寿命も長いことを示唆していると考えられる。

図 4.13 の結果から、引張強さが大きいほど屈曲寿命も大きい傾向にあるが、一方でその増大の傾向は焼なまし材と伸線加工上がり材で大きく異なっていることから、屈曲寿命は加工条件によっても大きく左右されることがわかる。このことから、タフピッチ銅線と合金線の屈曲寿命の差は引張強さだけで説明できるものではなく、引張強さ以外の導体材質の差異由来する特性(例えば金属組織のサイズ)にも影響されていると考えられる。

結果をまとめると、硬化処理を行った導体 3 種 (H-1 ~ H-3) は焼なましを行った導体 3 種 (O-1 ~ O-3) よりも 3 ~ 10 倍程度の屈曲寿命を示すことがわかった。また、表 4.10 と 4.11 の結果を合わせて検討すると、引張強さが増大するほど屈曲寿命も増大する傾向にあるが、その相関は比例的とは言えず、屈曲寿命は引張強さ以外の要素(例:金属組織のサイズ)にも大きく影響されるものと考えられる。

4.5.4 SEM 観察

単線導体 6 種 (H-1 ~ H-3、O-1 ~ O-3) について、金属組織のサイズを検討するため試験前の導体の断面を研磨し、SEM の反射電子像を用いて金属組織の観察を行った。

試料：単線導体 6 種 (H-1 ~ H-3、O-1 ~ O-3)

観察装置：日本電子製走査電子顕微鏡 JSM-7610FPlus

サンプルは各種導体を観察用のエポキシ樹脂に導体を埋め込み、自動研磨機にて研磨後、さらに振動研磨にて仕上げ研磨し SEM の反射電子像での観察を行った。

表 4.13 導体（単線）の金属組織観察結果（上段 5000 倍、下段 1000 倍）

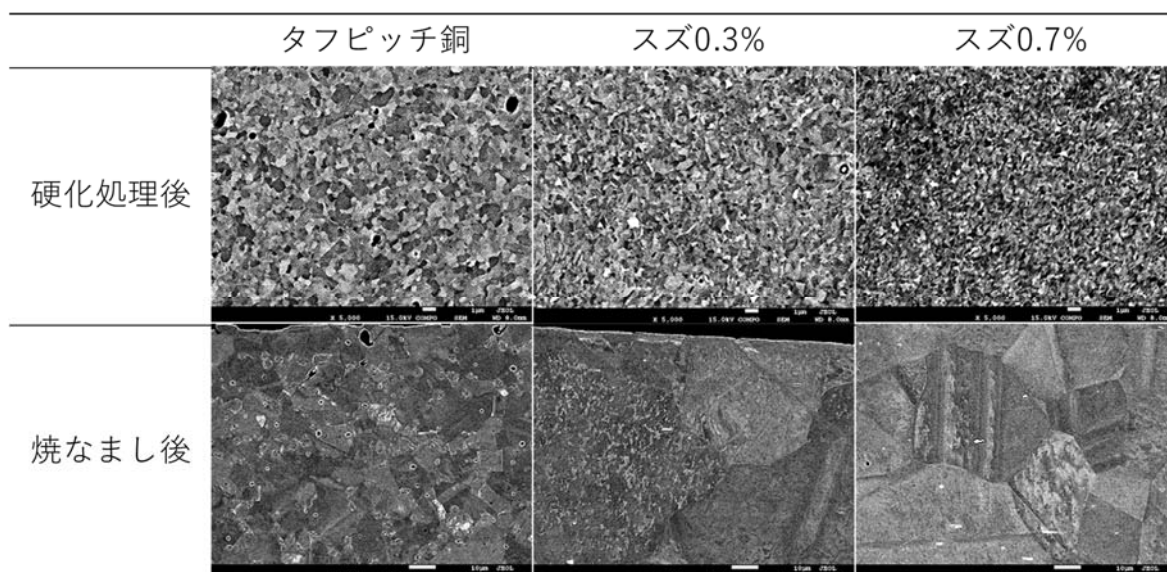


表 4.13 の結果から、JIS G 0551 に従って金属組織の平均粒径を算出した。

表 4.14 導体（単線）の金属組織平均粒径

サンプル名	H-1	H-2	H-3	O-1	O-2	O-3
結晶粒平均径[μm]	0.50	0.33	0.27	11	55	35

伸線加工上がり材（H-1～H-3）の金属組織は、焼なまし材（O-1～O-3）と比較していずれも 20 分の 1 以下の平均粒径を持つことがわかった。一般に結晶粒径が細かいほど引張強度が高くなり、また亀裂が進展しにくくなるため破壊寿命が伸びることが知られており、合金線の寿命の長さの一因は金属組織の細かさに由来すると考えられる。

4.6 屈曲寿命差異要因の考察

それぞれのサンプルの導体観察から、試作サンプル#1～#6 で見られた屈曲寿命の差異がどのような要因に由来するものであるか検討し、以下にそれをまとめた。

4.6.1 導体強度の影響(#1、#2)

試作サンプル 2 種の引張試験結果 (2.2.3 節) と屈曲試験結果 (3.3.1 節) から、導体の引張強度と屈曲寿命には正の相関があるように見える。

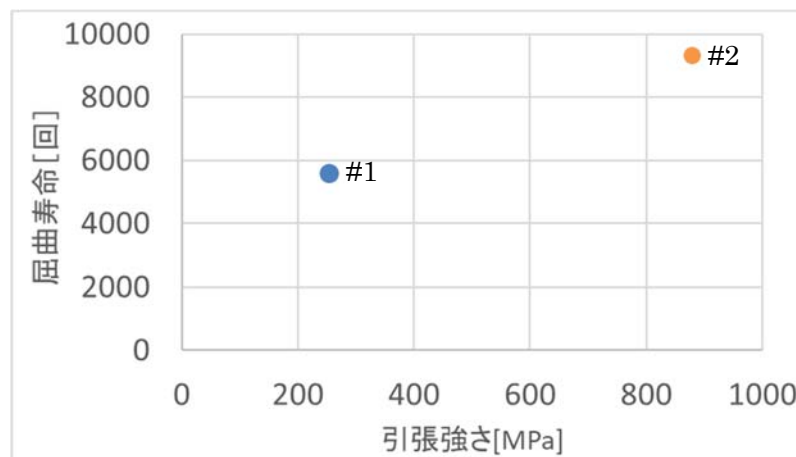


図 4.14 試作電線 2 種の屈曲寿命 (曲げひずみ量 0.145) と引張強さの相関

しかし、別に検討した単線 6 種の結果 (4.5.2、4.5.3、4.5.4 節および図 4.14) を合わせて考えると、導体の引張強さの大きさのみが屈曲寿命の長さをもたらしているわけではなく、引張強さおよび金属組織の細かさとそれに起因する破壊の進展しにくさが複合してスズ合金線の長寿命化が引き起こされているものと考えられる。

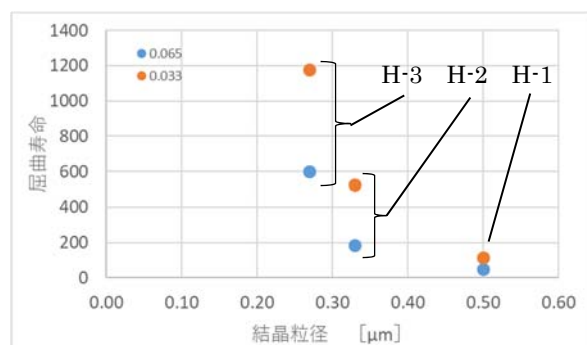
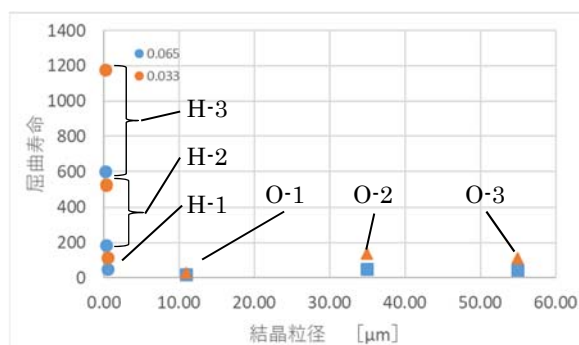


図 4.15 単線導体(6 種)の結晶粒径と屈曲寿命 図 4.16 単線導体(3 種)の結晶粒径と屈曲寿命

単線導体 6 種の結晶粒径と屈曲寿命の相関について検討したグラフを図 4.15、4.16 に示す。加工条件が異なるものを併記した図 4.15 では相関を見ることができないが、伸線加工上がりの 3 種のみを記載した図 4.16 については結晶粒径が小さくなるほど屈曲寿命が指数的に増大

する傾向が見られる。このことからタフピッチ銅線と合金線について、加工条件が実製品と同様に伸線加工上がりである場合には、結晶粒径が小さくなることで亀裂進展に対する耐性が向上し屈曲寿命が増大するというメカニズムがあるものと考えられる。

なお銅-スズ合金の屈曲特性に結晶粒径およびスズ濃度が及ぼす影響について検討した先行研究³⁾では、屈曲寿命はスズ濃度が高く結晶粒径が小さいほど長くなる傾向が確認されている。また 0.2%耐力が高いほど屈曲寿命も長くなるが、この要因としては(1)結晶粒径の縮小、(2)転位の結晶粒内摩擦力の増大、(3)Hall-Petch 定数の増大の三点があるとしている。先行研究において銅-スズ合金の結晶粒径縮小は固溶 Sn 原子による結晶粒界の移動抑制に由来すると推測されており、また屈曲前後の TEM 観察などから合金中の転位が Sn 原子に固着されることで転位の分布が均一化し局所的な発達を抑制されることで塑性変形しにくくなり合金線の屈曲寿命が増大したと推測されている。

なお Hall-Petch 定数とは多結晶金属における降伏応力 σ_y と結晶粒径 d の間に式(2)のような関係 (Hall-Petch の関係) が成り立つとする経験則における定数 K_f のことであるが、先行研究では Sn が固溶している濃度 0 ~ 2.0% の範囲ではスズが増大するほど Hall-Petch 定数が増大することが銅-スズ合金系で観察されている。

これらの要因が複合してスズ合金線はタフピッチ銅線よりも長い屈曲寿命を発現すると考えられる。

$$\sigma_y = \sigma_0 + \frac{K_f}{\sqrt{d}} \quad (2)$$

ここで σ_y ：降伏応力

σ_0 ：摩擦応力

K_f ：Hall-Petch 定数

d ：結晶粒径

4.6.2 素線細径化の影響(#1、#3)

4.2.2 節の SEM 観察結果を検討すると、#1、#3 の導体側面の破壊形状が類似していることから、屈曲回数の増大により疲労破壊による導体表面の亀裂が内部へ進展することで最終的な破断が引き起こされるというメカニズムは素線径が異なる#1、#3 の間で変わらないと推測される。

ひずみ量の差異は屈曲寿命に対して累乗的に作用することが Coffin-Manson 則から知られているため、#1 と#3 の屈曲寿命の差は細径化によるひずみの分散が主要因であると考えられる。

4.6.3 めっき層の影響(#1、#4)

4.3.1 節の SEM-EDS 観察結果から、Sn めっき線の TPC 導体の表面には合計厚さは 2 μ m 程度の純めっき層と銅-スズ合金層があるが、#1 (タフピッチ銅線) と#4 (スズめっき線) の屈

曲寿命と 4.3.3 節に示した導体側面、破断面の SEM 観察結果には大きな差異は見られなかった。このことから、本研究で実施した試験条件の範囲では、めっき層と Cu-Sn 合金層の存在は屈曲寿命に大きな影響を与えないものと考えられる。

4.6.4 導体構造の影響(#1、#3、#5、#6)

4.2.1 節に示したように、#5 (SZ 撚り) と #6 (SS 撚り) にはロープ撚りの向きの違いに起因する素線同士の擦れ方の違いによって、屈曲寿命に差異が生じる事を確認した。局所的な摩擦が発生する #5 よりも、導体表面の全周にわたって摩擦が生じる #6 のほうが長寿命であった。

4.7 導体観察まとめ

各種導体のマイクロスコープ観察と SEM 観察により、タフピッチ銅線と合金線の間には材料特性に由来する破壊形態の差異があることが分かった。金属組織観察からこの差異は金属結晶粒径の違いなどが影響していると考えられる。

各導体の屈曲試験後サンプルの観察から、疲労破壊の形態や亀裂や皺の程度は導体材質および素線径の違いによる素線単位での曲げひずみ量に影響されることがわかった。また、ロープ撚りの方向の違いが素線同士の擦れ方の違いを生じ、屈曲寿命に差異を生じることがわかった。

#4 導体断面の SEM-EDX 観察から、Sn めっき層の厚みと Cu-Sn 合金層の生成状態について情報が得られた。本研究で実施した試験条件の範囲では、めっき層の有無は屈曲寿命に明確な影響は及ばなかった。

第 4 章の検討で得られた知見を下の図 4.17 にまとめた。

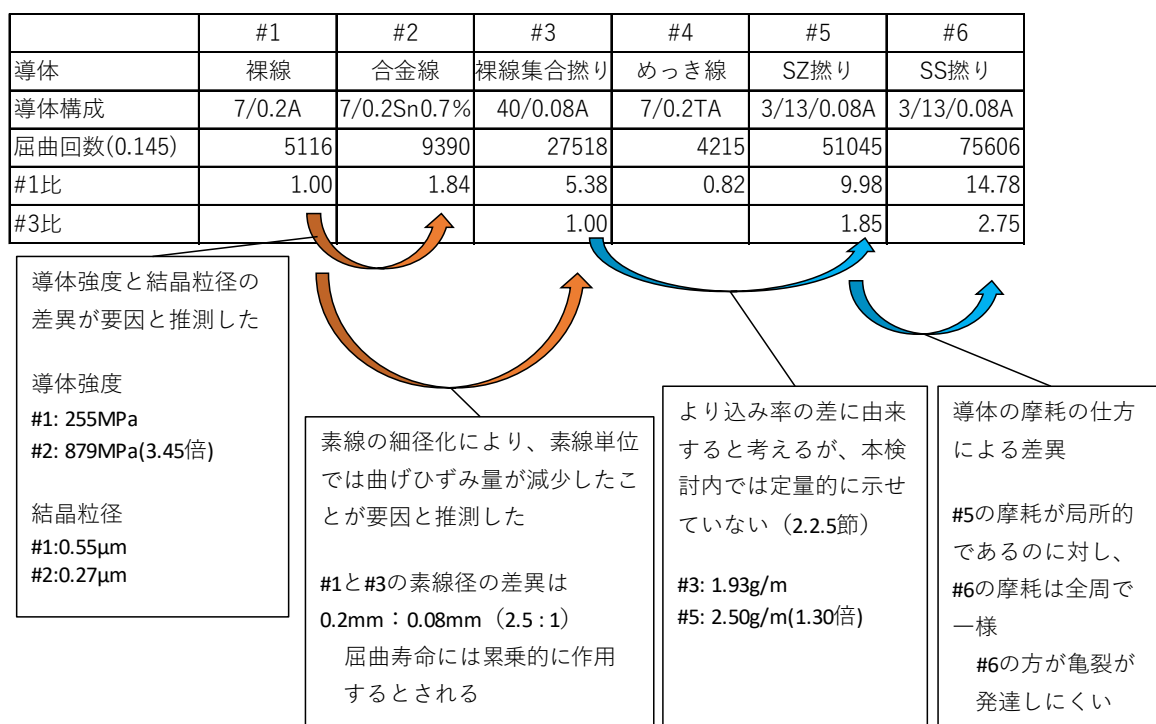


図 4.17 屈曲寿命の差異要因まとめ

5. 全体のまとめ

本検討において我々は試作した電線サンプルと恒温槽付屈曲試験装置を用い、屈曲特性に対する導体の材質、導体素線の寸法、導体の撚り方の影響を定量的に調査すると共に、破断した導体の SEM 観察等によりメカニズムの推定を行った。合わせて、破断までの寿命のばらつきに関する検討を実施した。

第 2 章では検討するサンプル用電線の試作とその出来栄え評価結果について述べた。

第 3 章では屈曲試験の実施条件および屈曲試験の結果と検討について述べ、各サンプルのひずみ - 寿命曲線を作成した。各サンプルの屈曲寿命は Coffin-Manson 則に従うことを確認した。

第 4 章では屈曲試験で用いた導体のマイクロスコープおよび SEM による観察を行い、導体の材質、素線径、表面構造、撚り構造が屈曲寿命におよぼす影響についてそれぞれ考察した。

サンプル#1 (タフピッチ銅) と #2 (0.7%スズ合金線) の比較により、導体材質の差異に由来する金属組織のサイズの違いが屈曲寿命に影響すること、金属組織が小さいと屈曲寿命が長い傾向にあることを確認した。

#1 (7/0.2mm) と #3 (40/0.08mm) の比較により、素線径が細くなると素線単位での曲げひずみ量が小さくなるため長寿命化する傾向にあることを確認した。

また、#3 (集合撚り) と #5 (ローブ撚り SZ)、#6 (ローブ撚り SS) の比較により、導体の撚り構造が屈曲寿命に影響すること、局所的な摩耗の少ない SS 撚りの方が本検討の条件では長寿命であることを確認した。

#1 (裸線) と #4 (スズめっき線) の比較ではめっき層の有無が屈曲寿命に明確な影響をもたらさないことを確認した。

本検討により導体の材質、構造の差異による屈曲寿命への影響についての系統的な知見が得られた。来年度 (2020 年度) には被覆材の違いによる屈曲寿命への影響を検討予定している。

- 1) 酒井達雄, 金属材料の静的強度および疲労強度特性値の適合分布形について, 材料 41(466), 1014-1024, 1992
- 2) W. Weibull, A Statistical Distribution Function of Wide Applicability, Journal of Applied Mechanics, 18 (1951), 293-237.
- 3) 青山正義, Cu-Sn 合金の屈曲疲労特性に及ぼす結晶粒径と錫濃度の影響, 日本金属学会誌 第 74 巻第 1 号(2010)49-54

禁無断転載

自主研究

「屈曲試験デ - タベ - ス」

(研究期間: 2019 年 4 月 ~ 2020 年 3 月)

報 告 書

2020 年 3 月

一般社団法人 電線総合技術センター

〒431-2103

静岡県浜松市北区新都田一丁目 4 番 4 号

TEL:053-428-4684

(免責事項)

記載している情報もしくは内容に関連して直接・間接的に生じた
いかなる損失に関し、当センターは一切責任を負いません。