

自主研究

# 「屈曲試験データベースの構築（3）」

（研究期間：2020年4月～2021年3月）

## 報 告 書

2021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. 屈曲試験用試料.....	4
2.1 試験方法.....	5
2.1.1 被覆材引張試験.....	5
2.1.2 導体引張試験.....	5
2.1.3 密着力試験.....	6
2.1.4 寸法測定.....	7
2.2 試験用試料の評価まとめ.....	8
3. 屈曲試験.....	9
3.1 試験計画.....	10
3.2 屈曲試験結果.....	11
3.2.1 屈曲試験データ.....	11
3.2.2 設定曲げひずみ量-屈曲寿命(被覆材種類の影響).....	13
3.2.3 設定曲げひずみ量-屈曲寿命(試験温度の影響).....	15
3.3 試験後の導体観察.....	19
4. 屈曲寿命の差異の考察.....	21
4.1 引張強度の影響.....	21
4.2 密着力の影響.....	22
4.3 摩擦係数の影響.....	23
4.4 屈曲途中の導体観察.....	24
4.5 電線の歪-応力特性の影響.....	26
4.5 実曲げひずみ量の影響.....	30
4.5.1 電線の曲げ曲率の測定と実曲げひずみ量の推定.....	30
4.5.2 実曲げひずみ量と屈曲寿命の関係.....	31
4.6 屈曲寿命差異の要因の推定.....	33
4.7 18年度品の低温屈曲寿命の差異について.....	34
4.8 低温-15における屈曲寿命の差異について.....	39

5. 全体のまとめ..... 41

## 1. はじめに

電線総合技術センター（JECTEC）では、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。

2018年度では、屈曲特性に及ぼす各種試験条件の影響について検討を行った。2019年度では、屈曲特性に対する導体の材質、導体素線の寸法、導体の抛り方の影響を検討した。

今年度は、被覆材材質の異なる電線と恒温槽付屈曲試験装置（図1）を用い、屈曲特性に対する被覆材の材質および温度の影響を定量的に調査すると共に、各種物性の調査および破断した導体の観察等により、屈曲寿命差異のメカニズムの推定を行った。



図1 恒温槽付屈曲試験機

## 2. 屈曲試験用試料

屈曲試験用試料は、ポリ塩化ビニル（以下、PVC）、架橋ポリエチレン（以下、XLPE）、フッ素樹脂（以下、ETFE）をそれぞれ被覆した電線を使用した。表 2.1 に、屈曲試験用試料の概略を示した。被覆材の影響を明確にするために、XLPE と ETFE 被覆電線は線径、導体材質・撚り構造がほぼ同じものを市販品より選定し、PVC 被覆電線は JECTEC で製作した。JECTEC にて制作した PVC 被覆電線の被覆材の配合表を表 2.2 に示す。

表 2.1 試験用サンプルの概要

	試料 PVC PVC 被覆電線	試料 XLPE XLPE 被覆電線	試料 ETFE ETFE 被覆電線
	試作品（JECTEC）	市販品（A社製）	市販品（B社製）
被覆材	ポリ塩化ビニル	架橋ポリエチレン	フッ素樹脂 フルオロポリエチレン
寸法（外径/被覆厚さ）	1.5mm/0.45mm		1.4mm/0.4mm
導体構成(本数/索線径)	7本/0.2mm		
導体材質	Snメッキ銅		

表 2.2 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 試験方法

### 2.1.1 被覆材引張試験

JIS C 3005 に準拠して被覆材の引張試験（図 2.1）を繰り返し回数  $n=5$  で実施した。

試験試料：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

試験温度：23



図 2.1 引張試験機

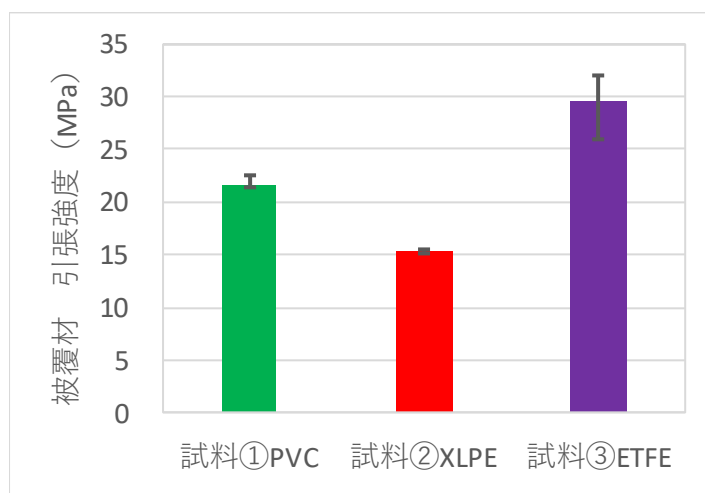


図 2.2 引張試験結果

図 2.2 の結果から、被覆材の種類により引張強度が異なることを確認した。特に、フッ素樹脂である試料 が最も高い引張強度を示した。

### 2.1.2 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：試料 ~

標点間距離： 500mm 又は 100mm

引張速度： 100mm/min

試験温度： 23

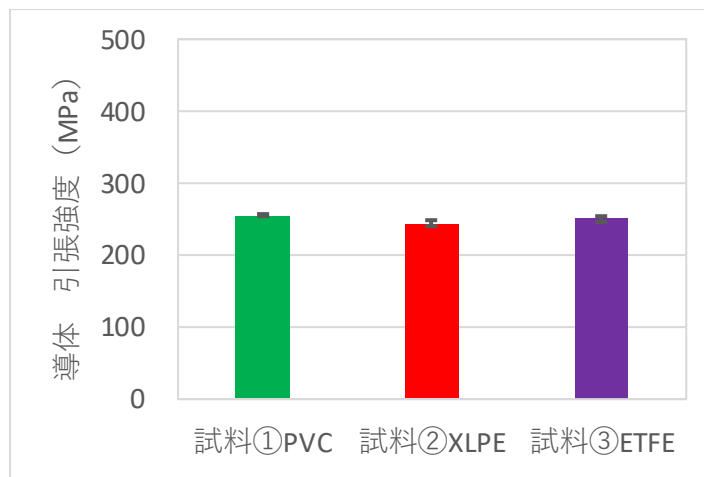


図 2.3 引張試験結果

図 2.3 の結果から、試料 ~ について、導体の引張強度はほぼ同等であることを確認した。

### 2.1.3 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。

試料長さ： 50mm

引張速度： 250mm/min

試験温度： 23

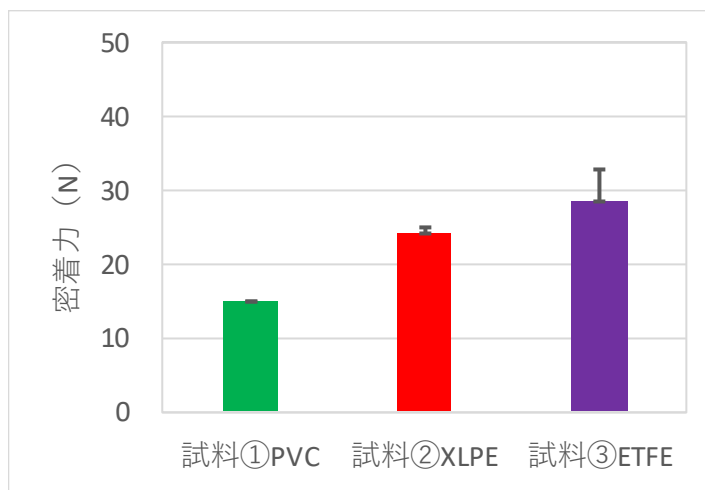


図 2.4 密着力試験結果

図 2.4 の結果から、試料 PVC、試料 XLPE、試料 ETFE の順に密着力が高いことを確認した。

### 2.1.4 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。

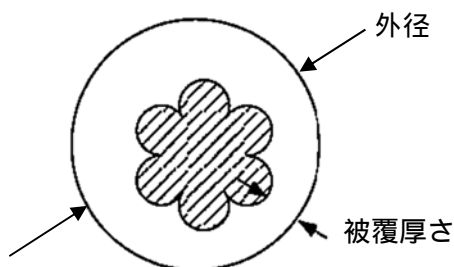


図 2.5 外径、被覆厚さの測定

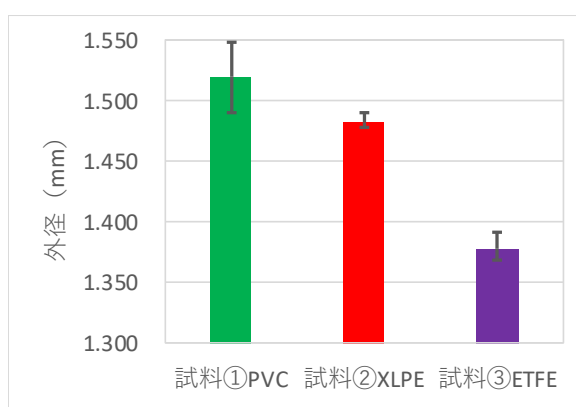


図 2.6 外径の測定結果

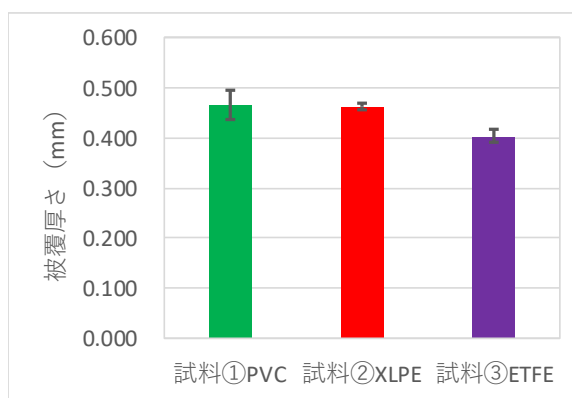


図 2.7 被覆厚さの測定結果

図 2.6 の結果から、試料 ETFE は外径がやや細いことを確認した。また図 2.7 の結果から、試料 ~ の被覆厚さはほぼ同等であることを確認した。試料 ETFE の外径は試料 ~、試料 ~ と比べて約 0.1mm 小さい。この外径の差異は、屈曲試験における設定ひずみ量の差異に換算すると 10%未満であることから、屈曲試験測定結果に大きな影響を与えるほどの差異ではないものと判断した。



## 2.2 試験用試料の評価まとめ

試料 ~ を評価した結果を以下の表にまとめて示す。

表 2.3 試料の評価結果

項目	PVC	XLPE	ETFE
被覆材引張強度 [MPa]	21.7	15.3	29.5
導体引張強度 [MPa]	255	244	251
密着力 [N]	14.9	24.3	28.4
外観	良好	良好	良好
導体構成	7/0.2	7/0.2	7/0.2
導体材質	Snめっき	Snめっき	Snめっき
導体ピッチ [mm]	10	10	9
仕上がり外径 [mm]	1.520	1.482	1.378
皮膜厚 [mm]	0.467	0.462	0.402
導体変色	なし	なし	なし

被覆材引張強度、密着力などの項目については、試料 ~ 間で差異があること、また、寸法、導体構造などの項目についてはほぼ同等であることを確認した。

### 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2018～2019年度にJECTECにて実施した屈曲試験データベース（K18-025、K20-009）の条件を参考に屈曲試験を実施した。本試験に使用した恒温槽付き屈曲試験機の構造を図3.1に示す。試験装置は、ユアサシステム機器製恒温槽付き屈曲試験機 CL40 Type-E01 を使用した。

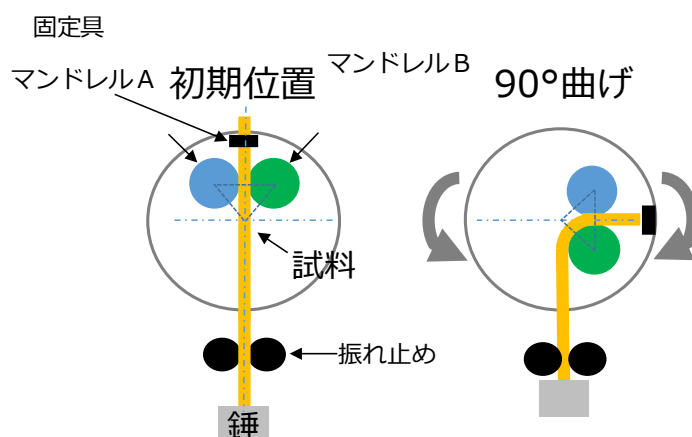


図 3.1 恒温槽付屈曲試験機の構造

屈曲試験は電線に錘を吊り下げ、試験機上部のマンダ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。マンダレルの左 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 $3\Omega$ 以上になったら全破断と判断した。

### 3.1 試験計画

本検討では被覆材の異なる 3 種のサンプルがそれぞれ一定の設定曲げひずみ量又は試験温度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。

試験条件は、被覆材の異なる 3 種類の被覆電線( 試料 PVC、試料 XLPE、試料 ETFE ) に対して、設定曲げひずみ量を 0.15 および 0.075 の 2 水準、試験温度を -15 、 23 、 80 の 3 水準を検討した。2 水準の設定曲げひずみ量に関しては、屈曲部に使用する曲げマンドレルの外径を変更することで調整した。この設定曲げひずみ量は、電線外径を曲げマンドレル径で除した値である。今回の場合、電線外径が 1.5mm であり、マンドレル径 10mm、マンドレル径 20mm を使用することで、設定曲げひずみ量はそれぞれ 0.15、0.075 となる。また、試験温度に関しては、18 年度に実施した屈曲データベースの条件と同様、PVC の脆化温度である -15 、恒温槽付屈曲試験装置の仕様上限温度である 80 、常温の 23 の 3 水準とした。

以上、表 3.1 に示した 18 水準の試験条件について、N=6 の試験を実施した。また、同様の試験条件にて、被覆電線に使用されている導体については、N=3 の試験を実施した。

表 3.1 屈曲試験計画

試料	試験温度	設定曲げひずみ量	屈曲角度	荷重
試料①PVC	-15°C	0.15	90°	50g
	23°C			
	80°C			
試料②XLPE	-15°C			
	23°C			
	80°C			
試料③ETFE	-15°C			
	23°C			
	80°C			
試料①PVC	-15°C	0.075	90°	50g
	23°C			
	80°C			
試料②XLPE	-15°C			
	23°C			
	80°C			
試料③ETFE	-15°C			
	23°C			
	80°C			

### 3.2 屈曲試験結果

#### 3.2.1 屈曲試験データ

設定曲げひずみ量 0.15 における、屈曲試験結果を図 3.2 に示す。また、試験データを表 3.2 に示す。

設定曲げひずみ量 0.15 において、被覆材の種類に依り屈曲寿命に差異が見られることを確認した。特に、ETFE は、どの試験温度においても PVC、XLPE よりも屈曲寿命が長いことが分かった。また、どの被覆材においても、-15 > 23 > 80 の順に寿命が長くなっており、各被覆材の種類に依らず同じ温度依存性を示すことを確認した。

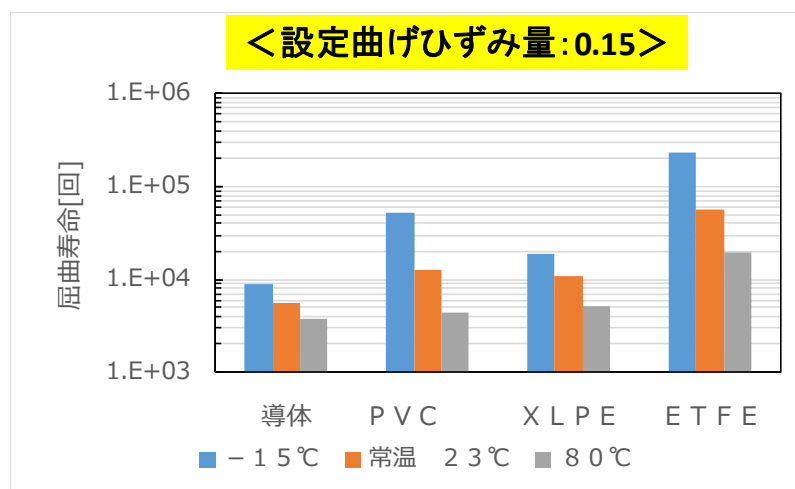


図 3.2 設定曲げひずみ量 0.15 の屈曲寿命

表 3.2 設定曲げひずみ量 0.15 の試験データ

設定曲げひずみ量		0.15								
被覆材		試料① PVC			試料② XLPE			試料③ ETFE		
試験温度		-15°C	23°C	80°C	-15°C	23°C	80°C	-15°C	23°C	80°C
屈曲寿命 測定値 (回)	N=1	53,939	12,531	4,608	21,198	9,108	5,375	175,349	72,109	14,262
	N=2	45,486	10,417	4,055	15,059	9,884	4,915	270,833	63,265	20,733
	N=3	62,047	16,283	3,937	14,085	10,985	4,766	270,728	64,141	19,842
	N=4	33,998	14,644	4,616	19,472	11,942	5,230	197,461	62,794	17,739
	N=5	62,985	11,726	4,569	21,994	9,775	5,543	263,470	39,930	20,419
	N=6	49,996	10,977	4,617	22,499	12,875	5,037	208,204	42,261	22,027
	ave.	<b>51,409</b>	<b>12,763</b>	<b>4,400</b>	<b>19,051</b>	<b>10,762</b>	<b>5,144</b>	<b>231,008</b>	<b>57,417</b>	<b>19,170</b>
	min.	33,998	10,417	3,937	14,085	9,108	4,766	175,349	39,930	14,262
	max.	62,985	16,283	4,617	22,499	12,875	5,543	270,833	72,109	22,027
	σ	10,898	2,269	316	3,631	1,441	292	42,334	13,112	2,784
σ/ave	0.212	0.178	0.072	0.191	0.134	0.057	0.183	0.228	0.145	

設定曲げひずみ量 0.075 における、屈曲試験結果を図 3.3 に示す。また、試験データを表 3.3 に示す。

設定曲げひずみ量 0.15 の場合と同様に、設定曲げひずみ量 0.075 においても、被覆材の種類に依り屈曲寿命に差異が見られ、被覆材の種類に依らず同じ温度依存性を示すことを確認した。

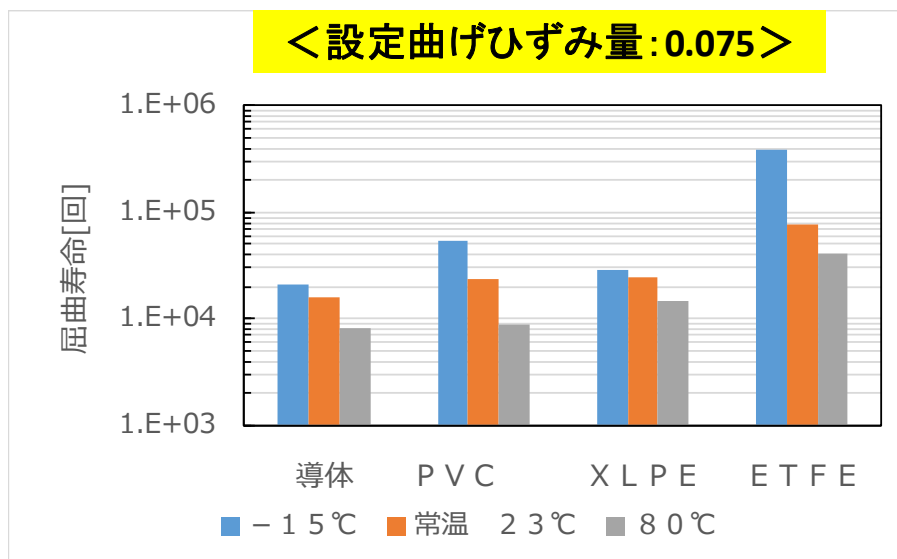


図 3.3 設定曲げひずみ量 0.075 の屈曲寿命

表 3.3 設定曲げひずみ量 0.075 の試験データ

設定曲げひずみ量		0.075								
		被覆材 試料① PVC			試料② XLPE			試料③ ETFE		
試験温度		-15°C	23°C	80°C	-15°C	23°C	80°C	-15°C	23°C	80°C
屈曲寿命 測定値 (回)	N=1	44,024	29,682	8,895	22,926	20,369	15,318	455,683	73,294	46,144
	N=2	52,587	21,167	8,953	28,492	26,119	13,116	346,426	67,200	44,407
	N=3	64,357	22,420	7,596	29,994	28,245	15,015		69,524	37,985
	N=4	62,245	20,021	8,108	37,045	22,007	13,829	400,039	76,179	31,439
	N=5	53,226	21,474	10,163	31,202	22,818	15,721	408,467	111,218	37,749
	N=6	45,223	26,338	8,826	23,367	27,193	14,979	337,120	72,101	47,284
	ave.	<b>53,610</b>	<b>23,517</b>	<b>8,757</b>	<b>28,838</b>	<b>24,459</b>	<b>14,663</b>	<b>389,547</b>	<b>78,253</b>	<b>40,835</b>
	min.	44,024	20,021	7,596	22,926	20,369	13,116	337,120	67,200	31,439
	max.	64,357	29,682	10,163	37,045	28,245	15,721	455,683	111,218	47,284
	σ	8,408	3,717	873	5,278	3,162	986	48,606	16,443	6,139
σ/ave	0.157	0.158	0.100	0.183	0.129	0.067	0.125	0.210	0.150	

### 3.2.2 設定曲げひずみ量-屈曲寿命(被覆材種類の影響)

3.2.1 項の試験データをもとに、設定曲げひずみ量-屈曲寿命のプロット図を作成した。この項では、各試験温度における各被覆材の寿命曲線を比較した。

図 3.4、図 3.5、図 3.6 に、試験温度-15、23、80 における設定曲げひずみ量-屈曲寿命のプロットを示す。

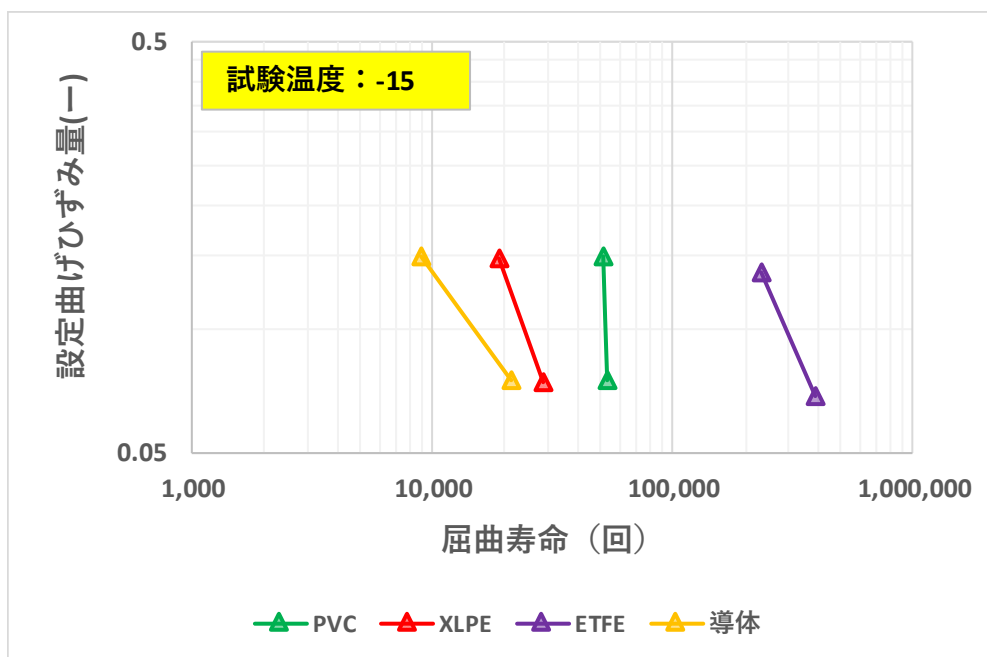


図 3.4 設定曲げひずみ量-屈曲寿命 (試験温度-15 )

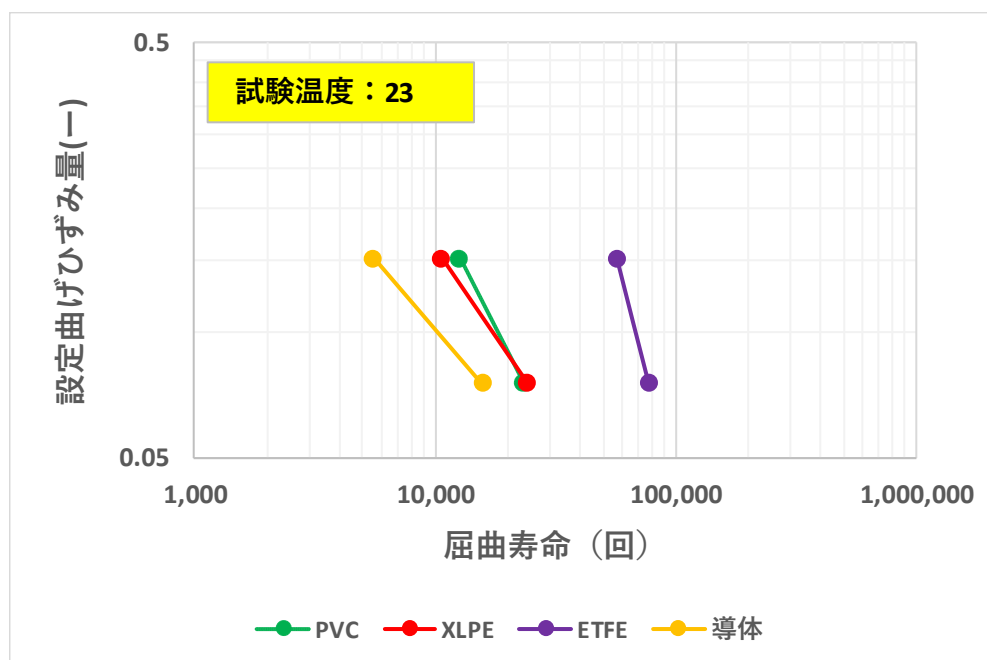


図 3.5 設定曲げひずみ量-屈曲寿命 (試験温度 23 )

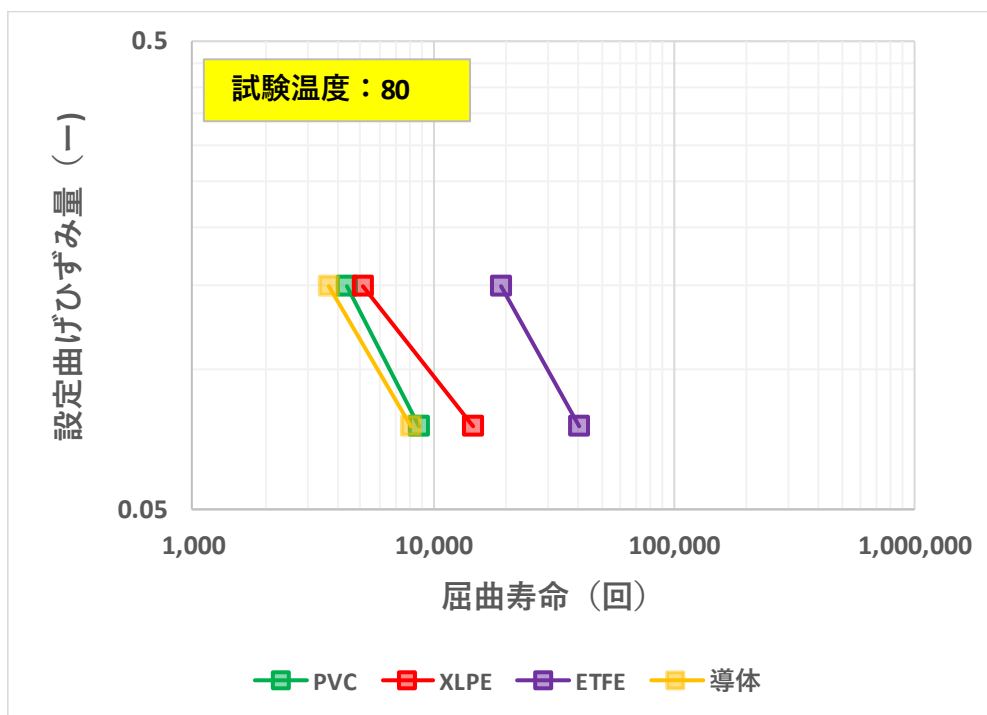


図 3.6 設定曲げひずみ量-屈曲寿命 (試験温度 80 )

試験温度-15 において、ETFE > PVC > XLPE の順に屈曲寿命が長い傾向にあることを確認した。試験温度 23 においては ETFE > PVC > XLPE の順、試験温度 80 においては ETFE > XLPE > PVC の順に長いことを確認した。以上、どの試験温度においても、被覆材の種類により屈曲寿命に差異が見られた。また、試験温度により、被覆材の種類の差異の傾向に違いが確認された。

### 3.2.3 設定曲げひずみ量-屈曲寿命(試験温度の影響)

前項と同様、設定曲げひずみ量-屈曲寿命のプロット図を作成した。この項では、各被覆電線について、試験温度ごとの寿命曲線を比較した。

図 3.7、図 3.8、図 3.9 に PVC、XLPE、ETFE における設定曲げひずみ量-屈曲寿命のプロットを示す。

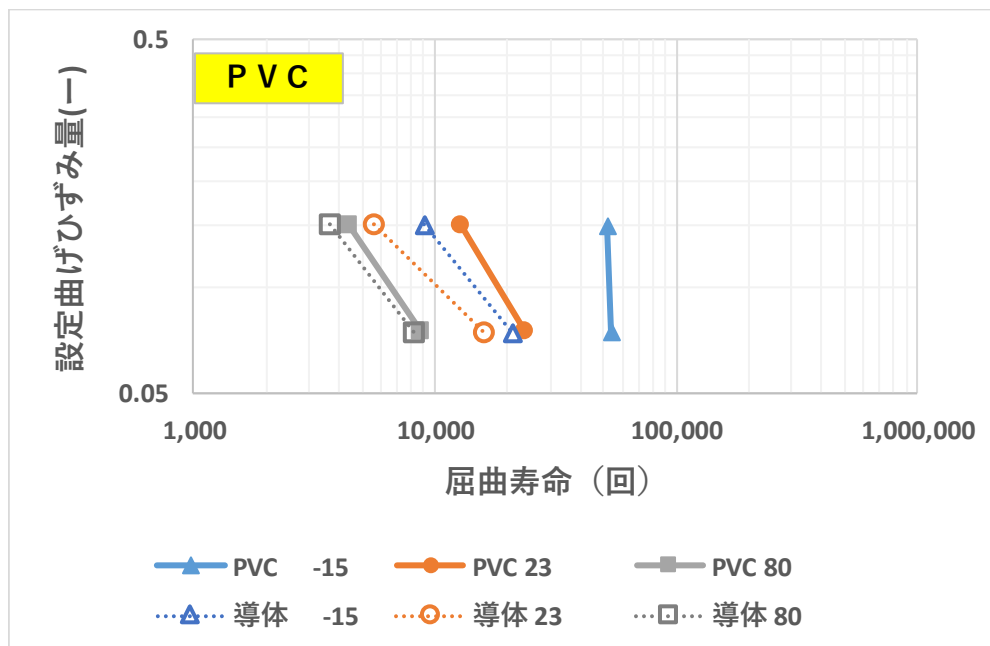


図 3.7 設定曲げひずみ量-屈曲寿命 (PVC)

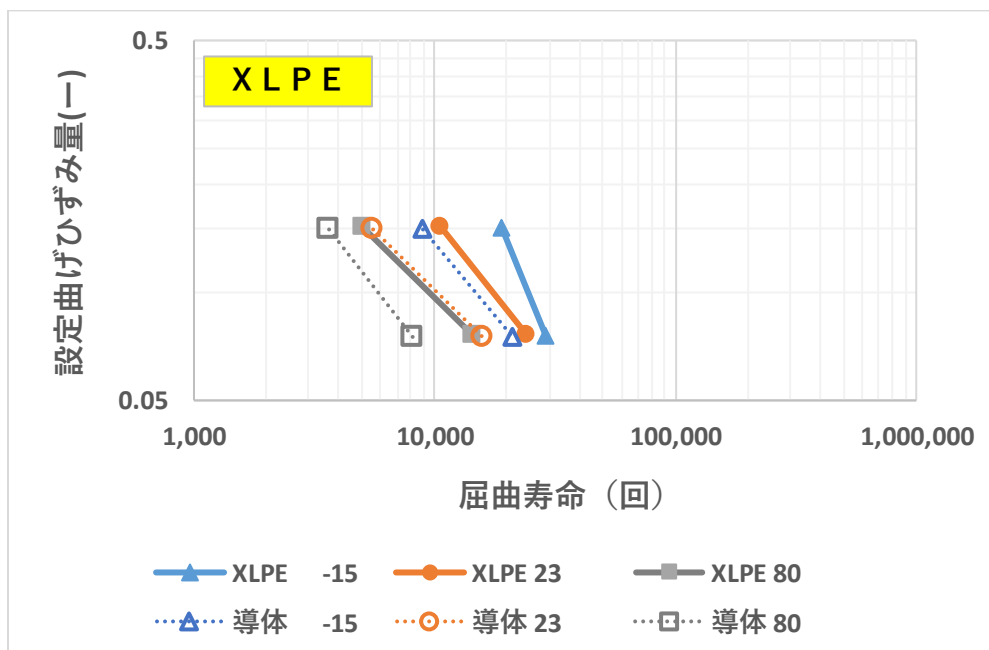


図 3.8 設定曲げひずみ量-屈曲寿命 (XLPE)



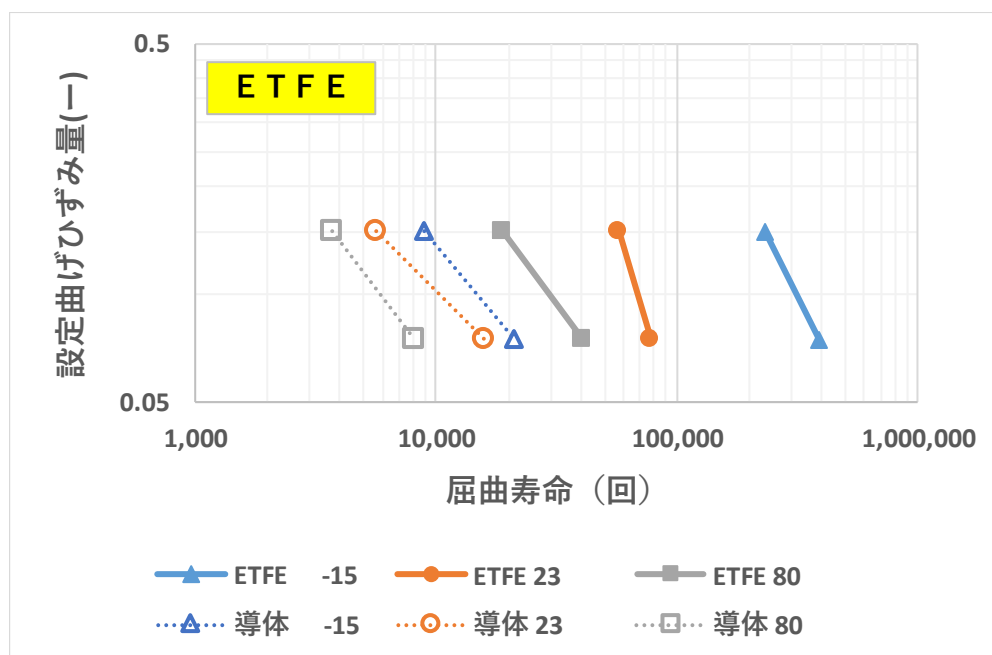


図 3.9 設定曲げひずみ量-屈曲寿命 (ETFE)

PVC、XLPE、ETFE のいずれも、-15 > 23 > 80 の順に屈曲寿命が長い傾向にあることを確認した。PVC は ETFE と比較して、各温度間の寿命の差異は小さい傾向にあった。导体について、-15 > 23 > 80 の順に屈曲寿命が長い傾向にあることを確認した。

屈曲寿命に及ぼす温度の影響について、被覆材と導体の影響を切り分けるために、導体の屈曲寿命と被覆材の屈曲寿命の比をそれぞれ比較した。図 3.10 に PVC について導体のみ屈曲寿命の比を示し、図 3.11 には XLPE、図 3.12 には、ETFE について導体のみ屈曲寿命の比を示した。このグラフでは、プロットが右側にあるほど、すなわち導体寿命との比が大きい値ほど被覆材の影響度が高いことを示している。

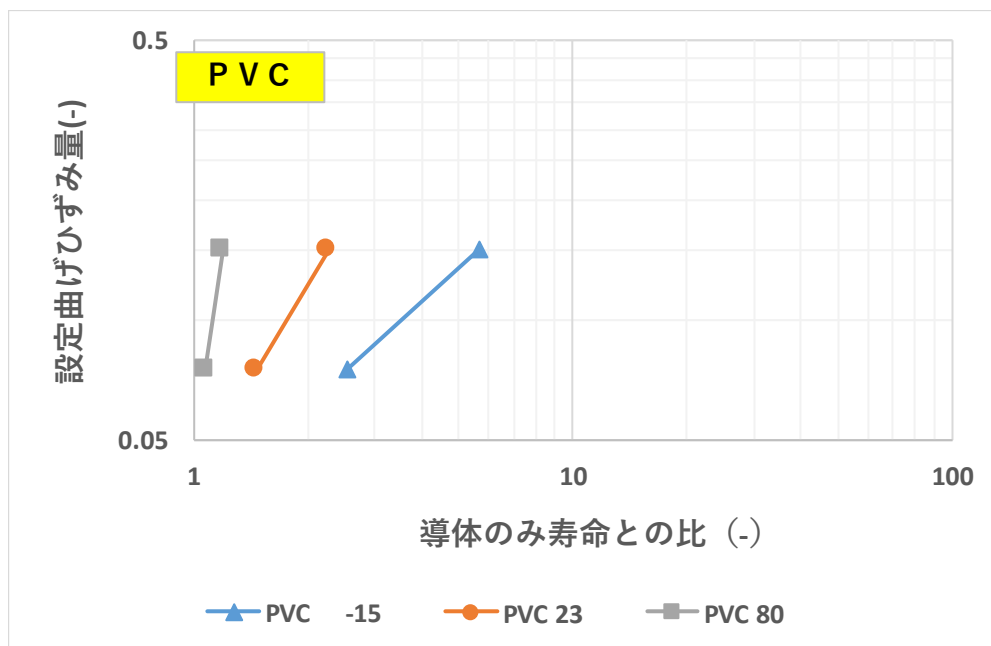


図 3.10 設定曲げひずみ量・導体のみ屈曲寿命比 (PVC)

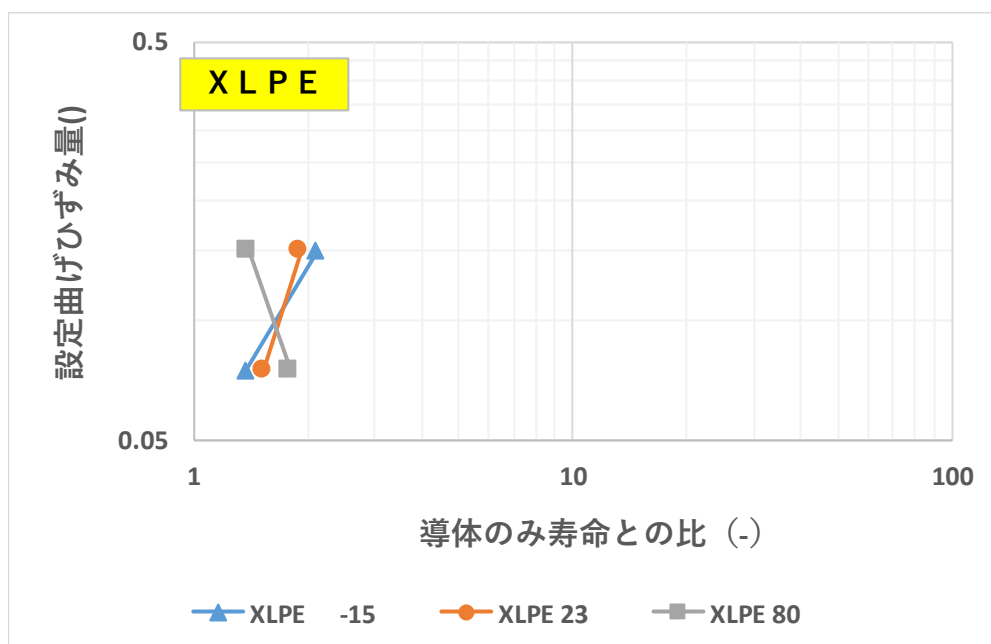


図 3.11 設定曲げひずみ量・導体のみ寿命比 (XLPE)

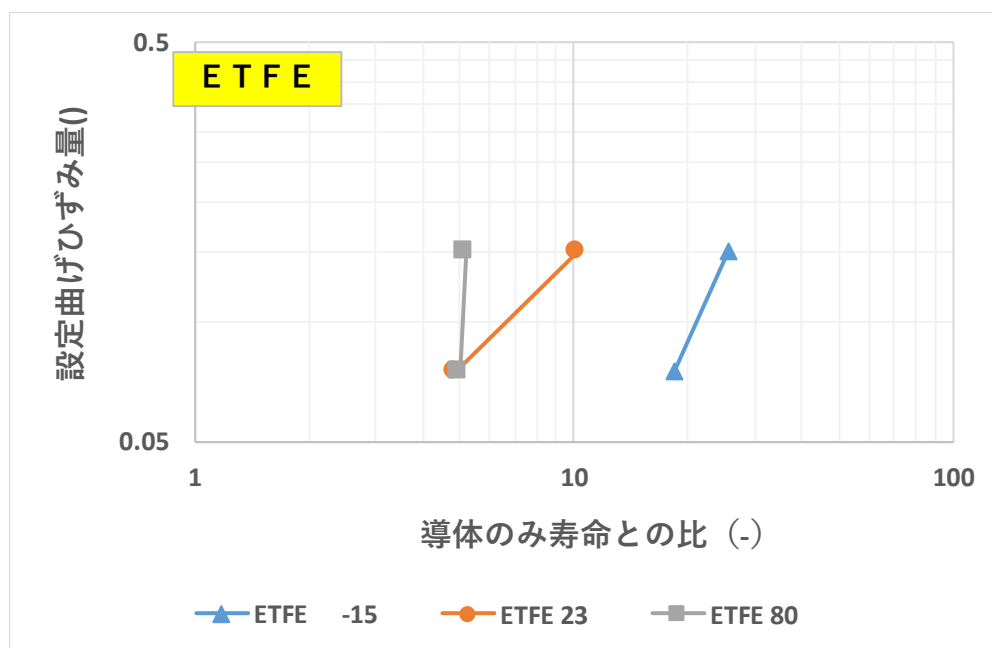


図 3.12 設定曲げひずみ量-導体のみ寿命比 (ETFE)

PVC については、80、23、-15 の順に導体寿命比が大きくなっており、80 では被覆材の影響度がほとんどなく、-15 では被覆材の影響度が高いことを確認した。XLPE については、PVC、ETFE と比較して全体的に導体寿命比が小さいことを確認した。ETFE については、他の被覆材と比較して全体的に導体寿命比が大きく、また 80、23、-15 の順にありまた、どの温度においても電線の屈曲寿命に及ぼす被覆材の影響度が高いことを示した。

### 3.3 試験後の導体観察

JECTEC 所有のハイロック製デジタルマイクロスコープ KH-7700 を用いて、設定曲げひずみ量 0.15 での屈曲試験後の破断部の導体観察を行った。



図 3.13 デジタルマイクロスコープ装置写真

図 3.14 には、試験温度 23 での屈曲試験後の導体観察結果を示す。

図 3.15 には、試験温度 -15 での屈曲試験後の導体観察結果を示す。

図 3.16 には、試験温度 80 での屈曲試験後の導体観察結果を示す。



- ・側面に皺状凹凸痕
- ・破断面は平坦形状



- ・側面に皺状凹凸痕
- ・破断面は平坦形状



- ・側面に皺状凹凸痕
- ・破断面は平坦形状

図 3.14 試験温度 23 における曲試験後の導体観察

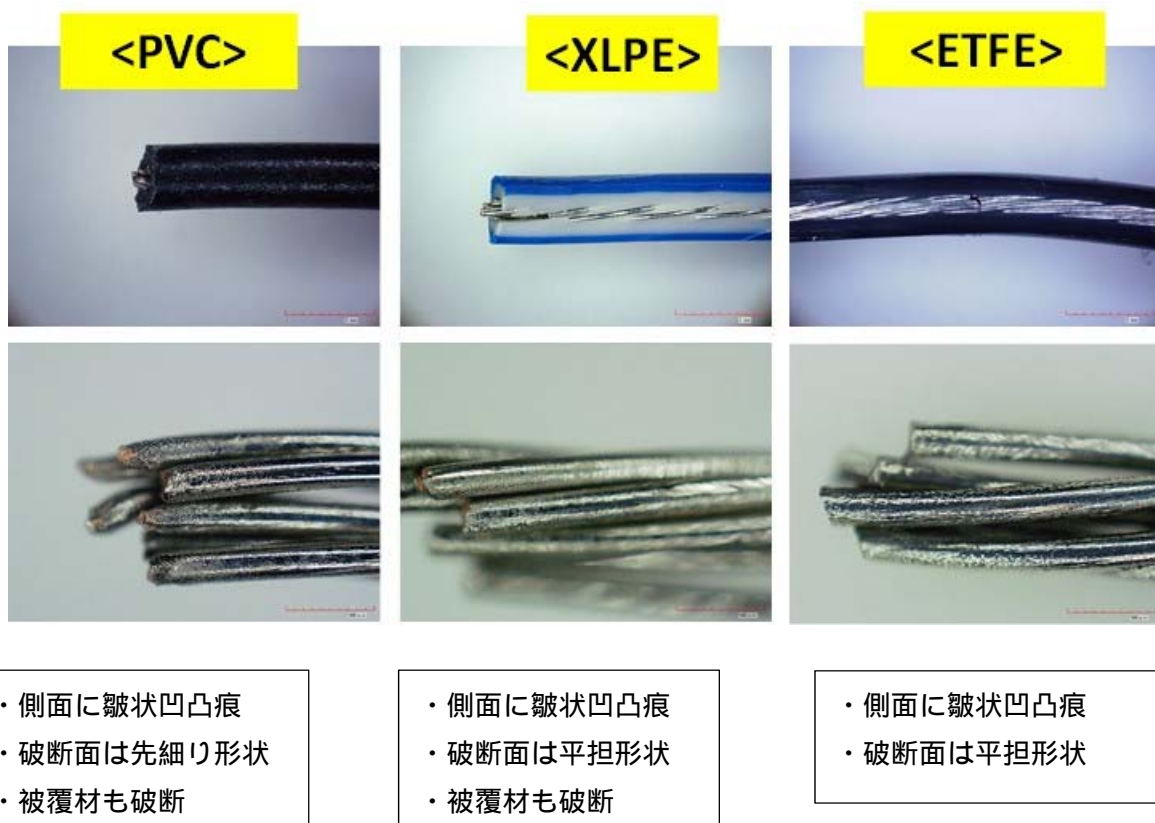


図 3.15 試験温度-15 における屈曲試験後の導体観察

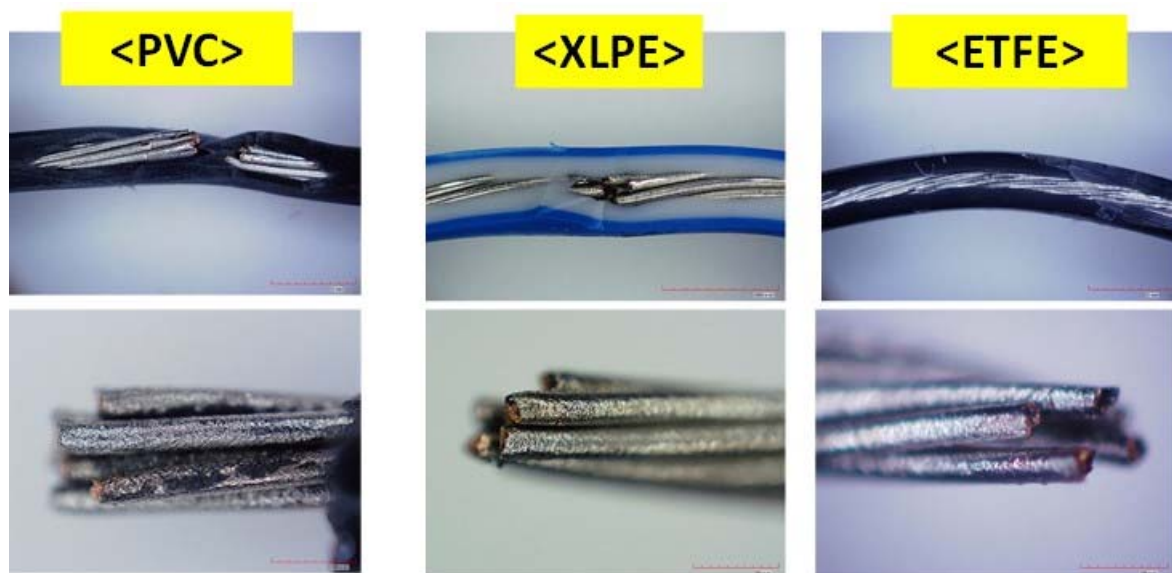


図 3.16 試験温度 80 における屈曲試験後の導体観察

## 4. 屈曲寿命の差異の考察

### 4.1 引張強度の影響

屈曲寿命に対する引張強度の影響を検証するために、各被覆電線の-15、23、80の引張強度を算出した。被覆電線としての引張強度は、被覆材の引張強度 $a$ および導体の引張強度 $b$ をそれぞれ測定し、各測定値の断面積 $S_a$ 、 $S_b$ の比率より下式のように算出した。

$$=(aS_a + bS_b) / (S_a + S_b)$$

図 4.1 に算出された各被覆電線の引張強度を示す。

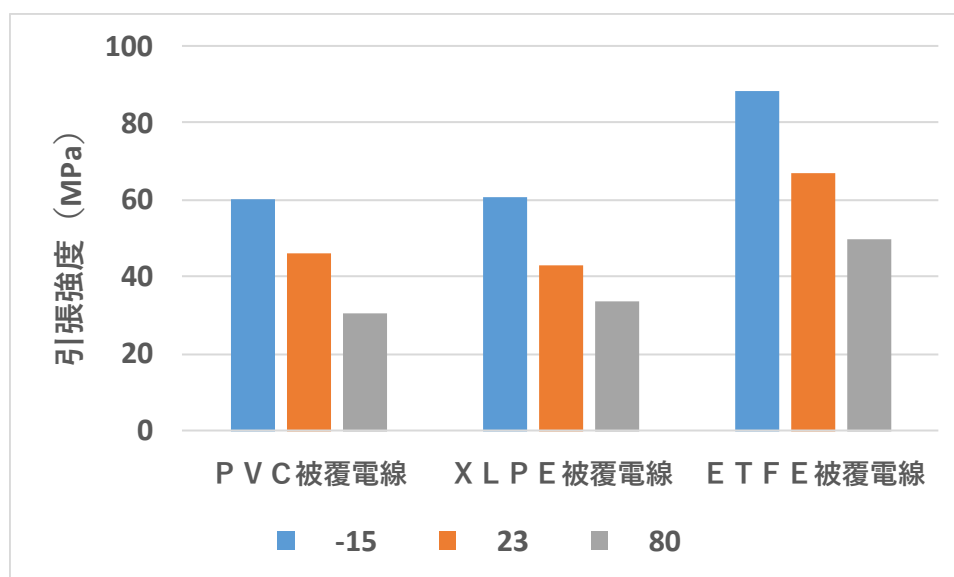
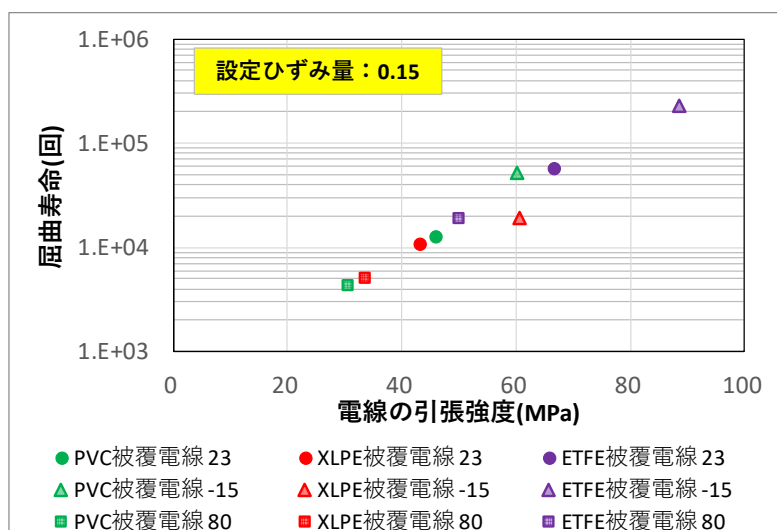


図 4.1 各被覆電線の引張強度

図 4.2 に、各被覆電線の引張強度と屈曲寿命の関係を示した。引張強度と屈曲寿命の相関が高いことを確認した。これより、電線の機械的強度の差異が屈曲寿命に大きく影響していると推定される。



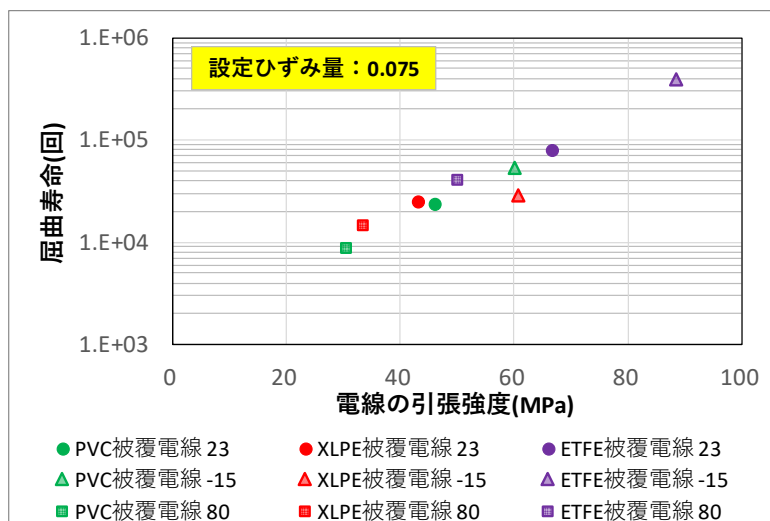


図 4.2 引張強度と屈曲寿命の関係

(上段：設定曲げひずみ量 0.15、下段：設定曲げひずみ量 0.075)

#### 4.2 密着力の影響

図 4.3 に、各被覆電線の密着力と屈曲寿命の関係を示した。密着力は 2.1.3 項の図 2.4 に示した密着力測定値を用い、屈曲寿命は 3.2.1 項の表 3.2 に示した 23 における屈曲寿命測定値を用いた。この値密着力と屈曲寿命の相関は低いことを確認した。ただし、今回は、電線の機械的強度が大きく異なっており、今後は、これらを切り分けた形での検証が必要と考える。

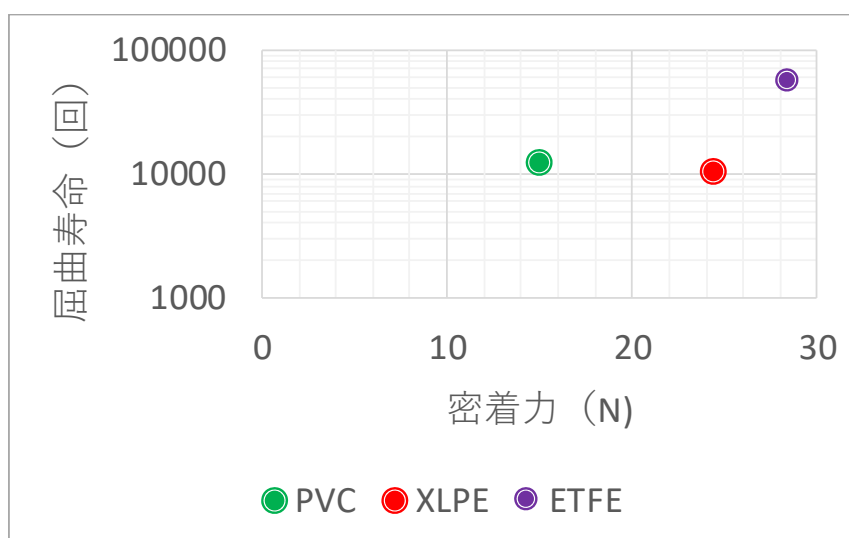


図 4.3 密着力と屈曲寿命の関係

### 4.3 摩擦係数の影響

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）所有の摩擦係数測定器を用いて、下記試験条件にて最大静摩擦係数および動摩擦係数の測定を行った。

装置：摩擦係数測定器（新東科学株式会社製 HEIDON-14DR-ANL）

荷重：400gf

移動速度：300mm/min

ストローク：15mm

図 4.4、図 4.5 に、各被覆樹脂シートと銅板の摩擦係数と屈曲寿命の関係を示した。密着力と屈曲寿命の相関が低いことを確認した。

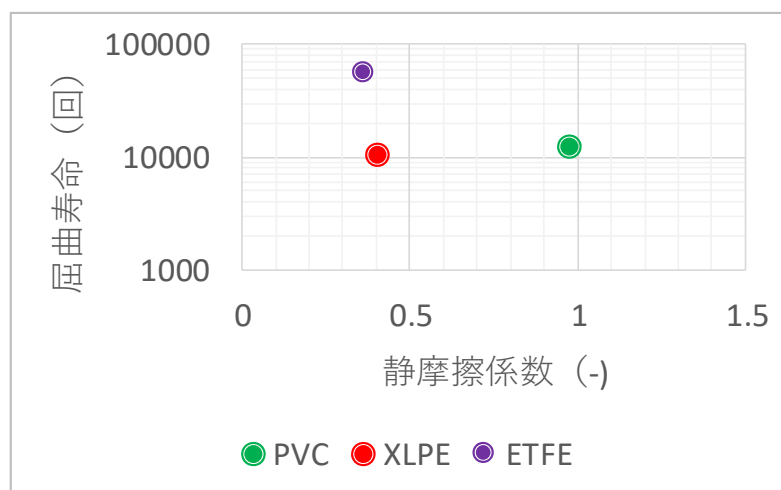


図 4.4 摩擦係数と屈曲寿命の関係

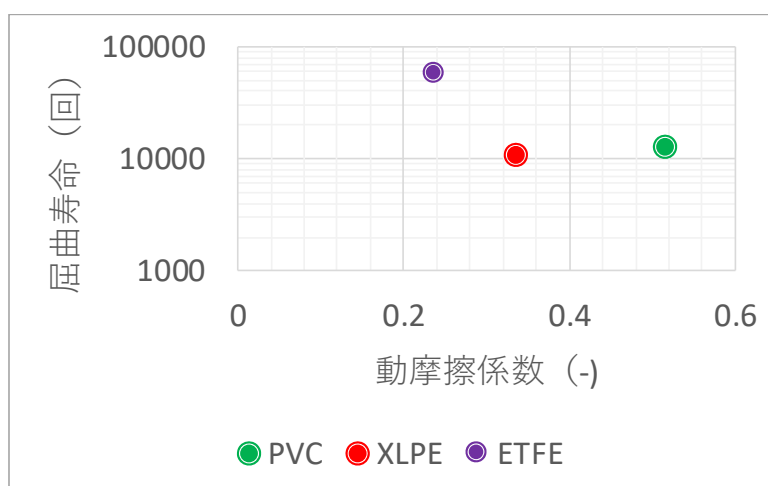


図 4.5 摩擦係数と屈曲寿命の関係



#### 4.4 屈曲途中の導体観察

4.1 項～4.3 項より、電線の引張強度、被覆材と導体の密着力、被覆材と導体の摩擦力の各種物性のうち電線の引張強度が最も大きく屈曲寿命に影響を及ぼしていることが分かった。この電線の機械的特性の差異が導体の屈曲寿命にどのような影響を与えているかを理解するために、屈曲試験途中での導体観察を行った。

図 4.6 に PVC の屈曲試験途中の導体観察写真を示した。平均屈曲寿命回数に対して、約 2、4、7 割の回数まで屈曲した電線サンプルを採取し、屈曲部近傍の導体表面状態を比較した。3.3 項で示したように、どの水準（被覆種、温度、曲げ）においても、屈曲試験後の導体破断部の近傍には皺状凹凸痕が見られていた。この皺状痕は屈曲回数ごとに多くなっていることが確認された。このことから、破断部の皺状痕は、繰り返し曲げと共に生成し、ある程度成長した段階でこれらを起点として導体破断に至っていると推定される。

図 4.7、図 4.8 に、XLPE および ETFE について同様の観察を実施した結果を示す。PVC と同様に、XLPE および ETFE についても屈曲回数ごとに皺状痕の生成が観察された。よって、XLPE と ETFE についても PVC と同様に、皺状痕の生成により導体破断に至っていると推定された。



図 4.6 PVC の屈曲途中の導体観察（PVC、温度 23℃、設定曲げひずみ量 0.15）



図 4.7 XLPE の屈曲途中の導体観察（温度 23℃、設定曲げひずみ量 0.15）



図 4.8 ETFE の屈曲途中の導体観察 (温度 23℃、設定曲げひずみ量 0.15)

図 4.9 には、平均屈曲寿命の約 5 割屈曲した時の各電線サンプルの導体表面状態を比較した結果を示す。これより、PVC と XLPE は皺状痕が多く、ETFE は皺状痕が少ないことを確認した。被覆種により皺状痕に生成の程度に差異が見られ、屈曲寿命の長い ETFE では皺状痕の生成が少なかった。この皺状痕の生成の差異は屈曲寿命の差異に関係していると推定された。



図 4.9 屈曲寿命 5 割の屈曲途中の導体観察 (温度 23℃、設定曲げひずみ量 0.15)

#### 4.5 電線の歪-応力特性の影響

4.4 項では、屈曲途中の皺状痕の生成の程度が被覆種に依り異なることを述べた。本項では、この差異を考察するために、電線のひずみ量と応力の関係を被覆種ごとに比較した。

測定は、下記の試験条件にて被覆材の引張試験を繰り返し回数 n=3 で実施した。

装置：オートグラフ AG-50 k NXPlus (工技センター)

試験形状：被覆材単独の管状試験片

標点間距離：40mm

引張速度：200mm/min

試験温度：-15、23、80

図 4.10 に温度 23 における電線のひずみ量と応力の関係を、図 4.11 に温度-15、図 4.12 に温度 80 における電線のひずみ量と応力の関係を示す。電線の引張応力は、被覆材単体および導体単体での引張試験データよりそれぞれの断面比率から計算により求めた。

屈曲試験の設定曲げひずみ量の領域において、23 における引張応力は ETFE が最も高く、PVC と XLPE はほぼ同等であることを確認した。これより、23 において、電線の剛性は ETFE > XLPE > PVC の順に高いと推定される。従って、屈曲試験において同じ荷重下で屈曲した場合の電線の実曲げひずみ量に差異が生じる可能性が考えられた。

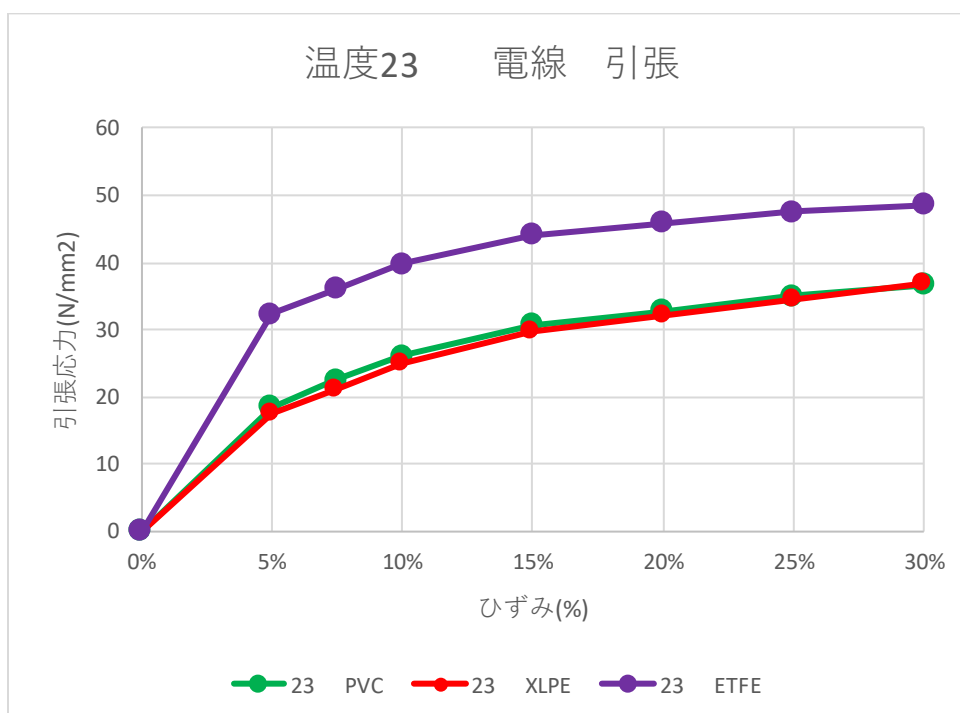


図 4.10 23 における引張歪-応力の特性

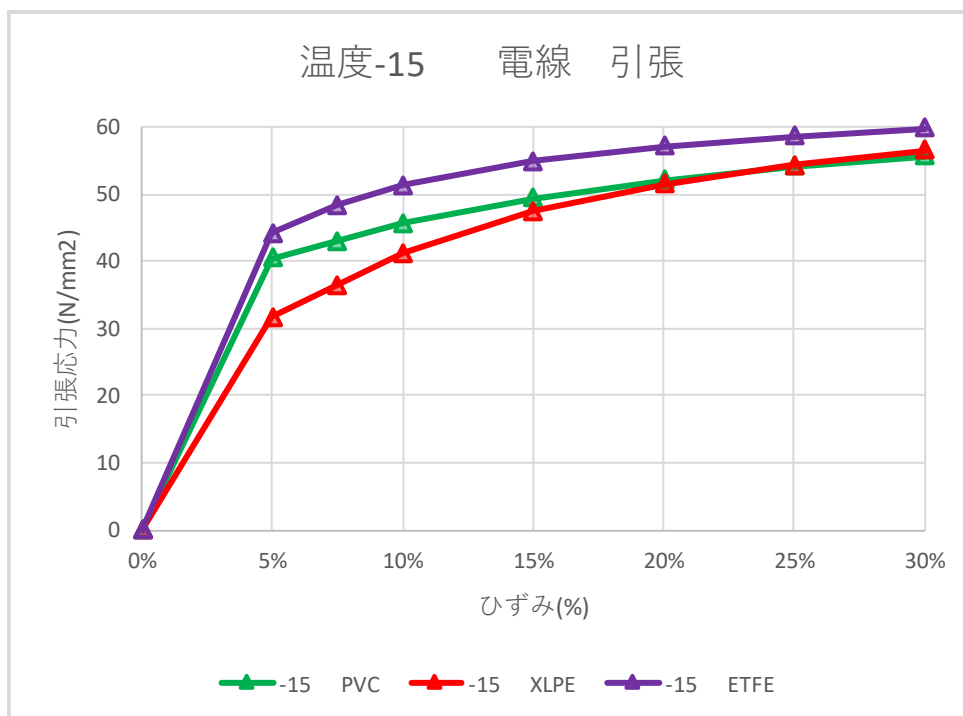


図 4.11 -15 における引張歪-応力の特性

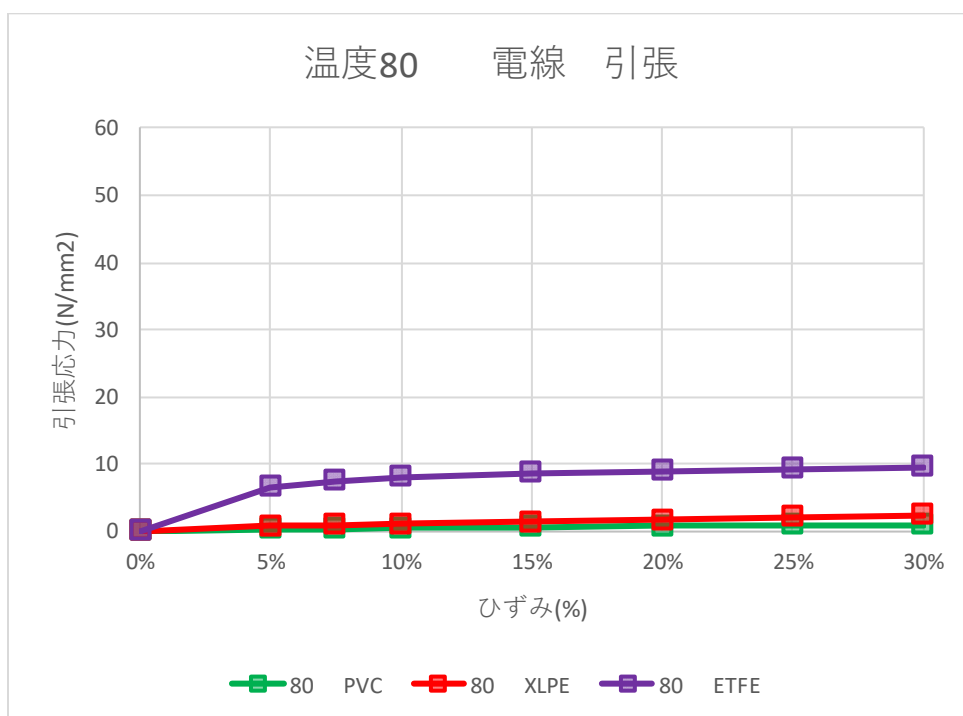


図 4.12 80 における引張歪-応力の特性

図 4.13～図 4.15 に、PVC、XLPE、ETFE 電線のひずみと応力の関係をそれぞれ示す。PVC の場合、屈曲試験における設定曲げひずみ量の領域では、-15 > 23 > 80 の順に引張応力が高いことを確認した。これらの引張応力の差異は、屈曲寿命で確認された-15 > 23 > 80 の差異と一致している。この傾向は、XLPE、ETFE についても同様であった。

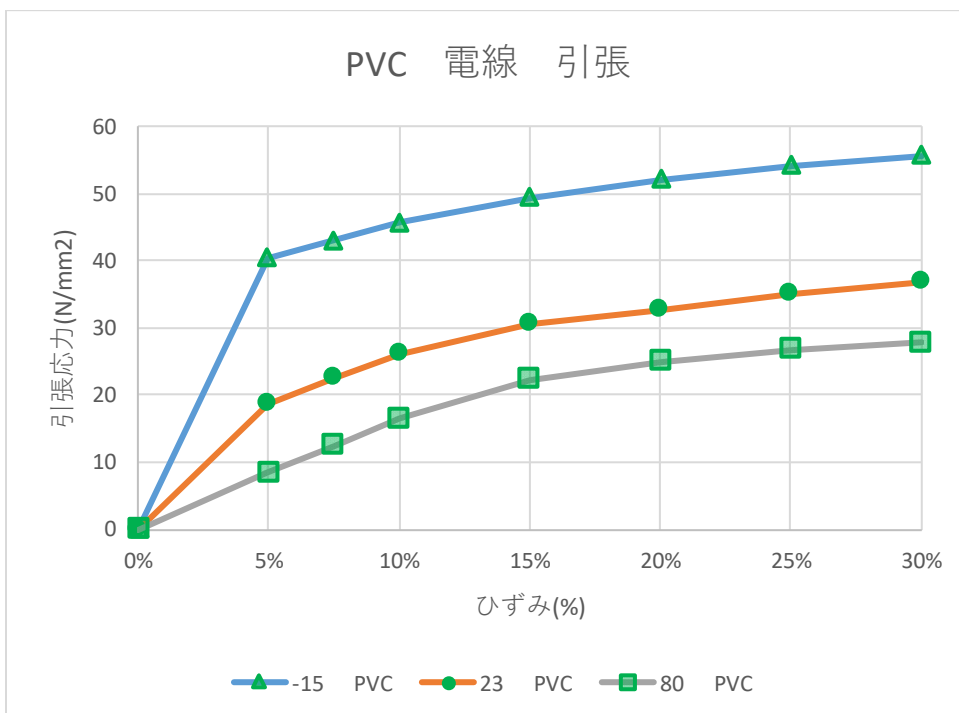


図 4.13 PVC における引張歪-応力の特性

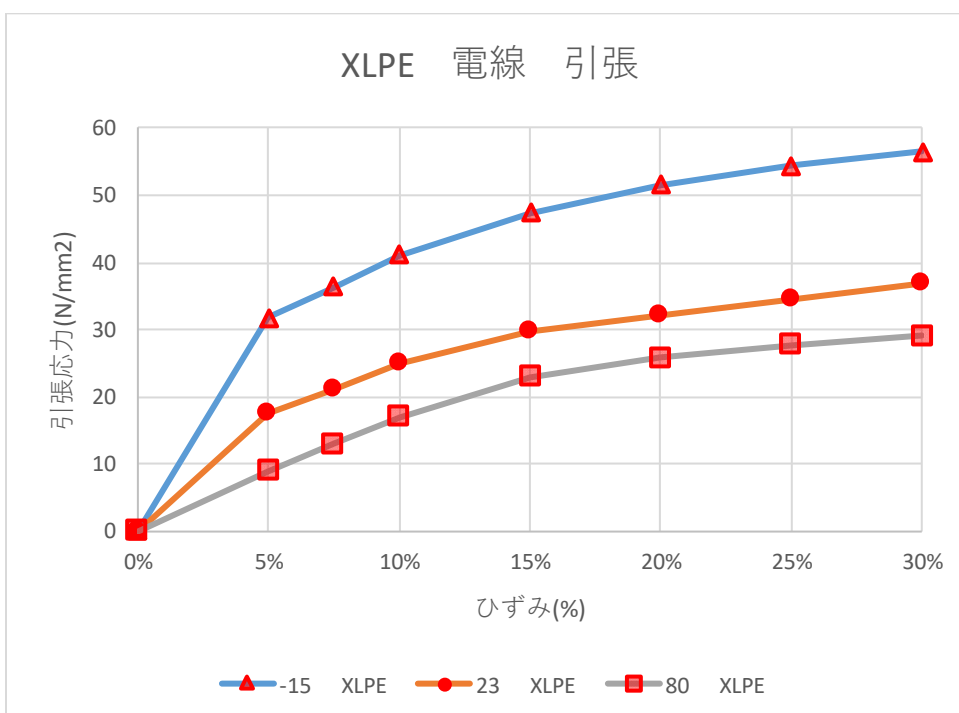


図 4.14 XLPE における引張歪-応力の特性

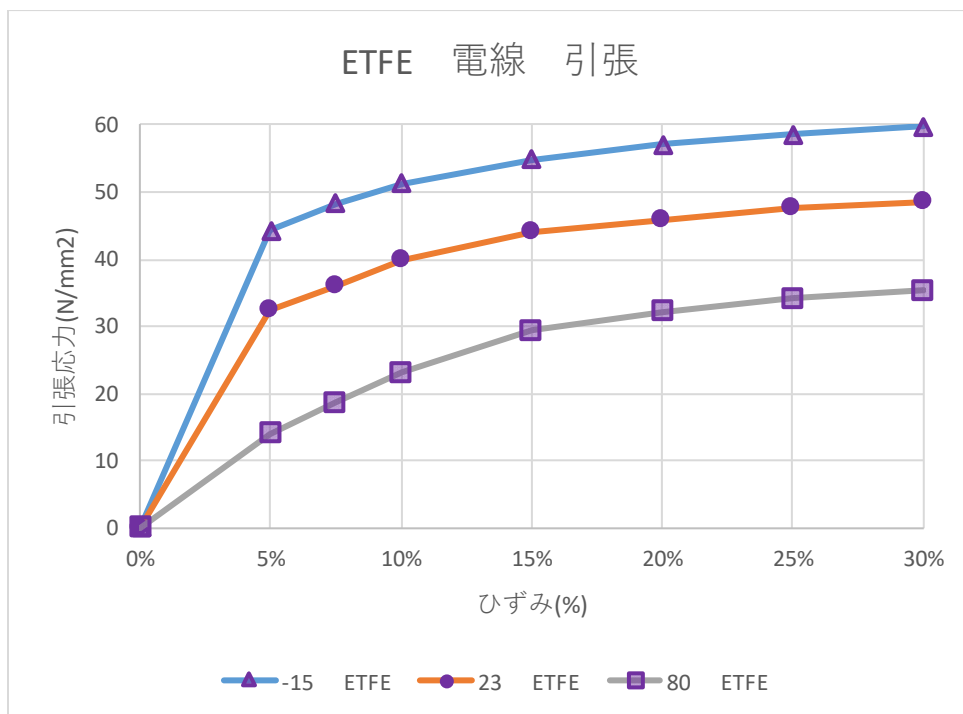


図 4.15 ETFE における引張歪-応力の特性

#### 4.5 実曲げひずみ量の影響

前項で述べたように、被覆種および試験温度により電線の引張強さに差異が見られ、この差異が屈曲時の曲げひずみ量に影響することが推測された。本項では、屈曲時の実際の曲げひずみ量を実曲げひずみ量（試験条件である設定曲げひずみ量と区別して呼ぶ）と定義し、その実曲げひずみ量を屈曲時の曲げ曲率から推定し、屈曲寿命との関係を議論した。

##### 4.5.1 電線の曲げ曲率の測定と実曲げひずみ量の推定

各被覆電線の屈曲時の曲げ曲率を測定した。図 4.16 に、設定曲げひずみ量 0.075（マンドレル直径：20mm）における各被覆電線の測定例を示す。温度 23℃において、電線を屈曲させた状態で静置し、電線の屈曲部の写真観察を行い、曲率が最小と思われる個所を写真画像より直接読み取り、実曲げ曲率を測定した。設定曲げひずみ量 0.15 についても同様に行い、実曲げひずみ量を推定した結果を表 4.1 に示す。設定曲げひずみ量と実曲げひずみ量に差異があり、被覆種の中で最も引張強度が高かった ETFE が実曲げひずみ量が最も小さいことを確認した。これより、電線の剛性の差異が実曲げひずみ量の差異に影響していると考えられる。

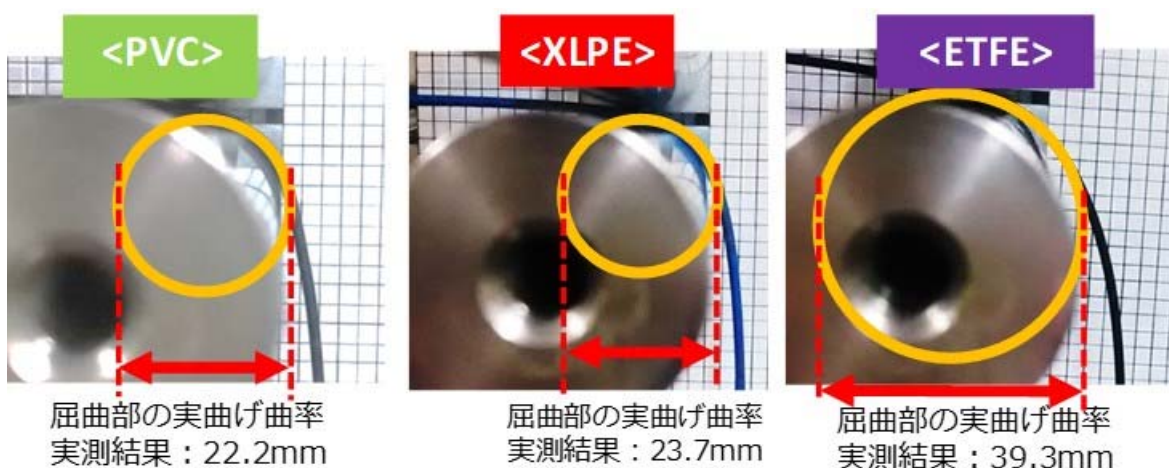


図 4.16 電線の曲げ曲率の測定例（設定曲げひずみ量 0.075）

表 4.1 曲げ曲率の測定結果と実曲げひずみ量の推定

設定曲げひずみ量	マンドレル径：φ10			マンドレル径：φ20		
	0.15			0.075		
被覆材材質	PVC	XLPE	ETFE	PVC	XLPE	ETFE
実曲げ曲率(mm)	13.7	14.4	34.2	22.2	23.7	39.3
実曲げひずみ量	0.111	0.103	0.04	0.068	0.063	0.035

#### 4.5.2 実曲げひずみ量と屈曲寿命の関係

試験温度 23 における実曲げひずみ量と屈曲寿命の関係を図 4.17 に示した。PVC、XLPE、ETFE 共にほぼ同じ直線関係が得られることを確認した。これより、実曲げひずみ量が同じであれば被覆種に依らず同じ屈曲寿命になると推測される。

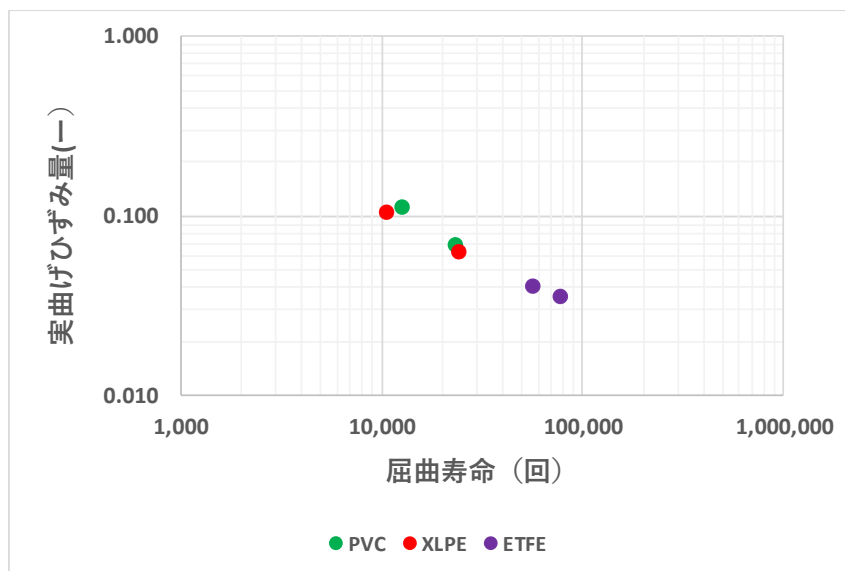


図 4.17 実曲げひずみ量と屈曲寿命の関係 (温度 23 )

そこで、ETFE について PVC や XLPE と同じ実曲げひずみ量の場合の屈曲寿命を比較するために、同じ実曲げひずみ量になる荷重を検討した。図 4.18 に、荷重と実曲げひずみ量の関係を示す。PVC、XLPE と同じ実曲げひずみ量となる荷重は 200 g であることを確認した。

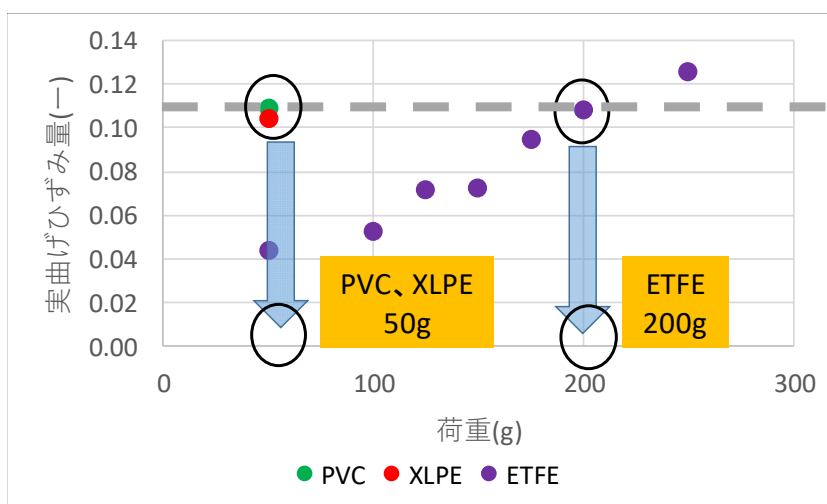


図 4.18 荷重と屈曲寿命の関係 (温度 23 )

ETFE について、荷重を 200g に変更して屈曲試験を行った結果を図 4.19 に示す。荷重は異なるものの、PVC と XLPE と同じ実曲げひずみ量の屈曲寿命はほぼ同じとなることを確認した。



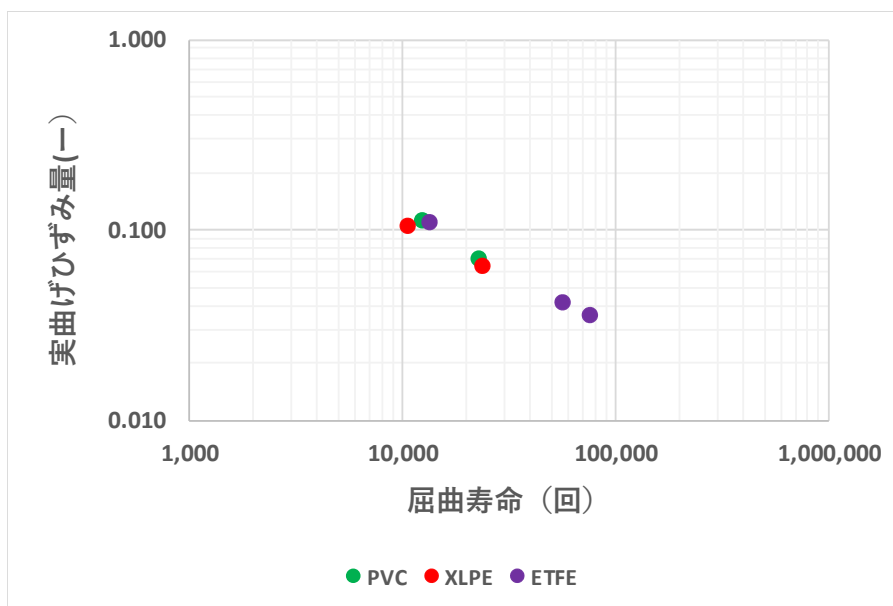


図 4.19 実曲げひずみ量と屈曲寿命の関係 (温度 23 )

ここで、前述の図 4.19 に-15 と 80 の実曲げひずみ量と屈曲寿命の関係を追加した結果を図 4.20 に示した。試験温度が異なる場合においても、大まかではあるが、23 と同様に樹脂種によらず実曲げひずみ量と屈曲寿命にはグラフ中の点線で示したような直線関係が見られることを確認した。但し、-15 ETFE の場合には、この直線関係から外れ、破線で示したような寿命曲線になっていることが確認された。Coffin-Manson 則では、塑性ひずみ領域と弾性ひずみ領域ではそれぞれ傾きが異なることを示唆しており、ひずみ量が小さくなるにつれて弾性ひずみ領域に近づくため、直線の傾きが異なると推定される。

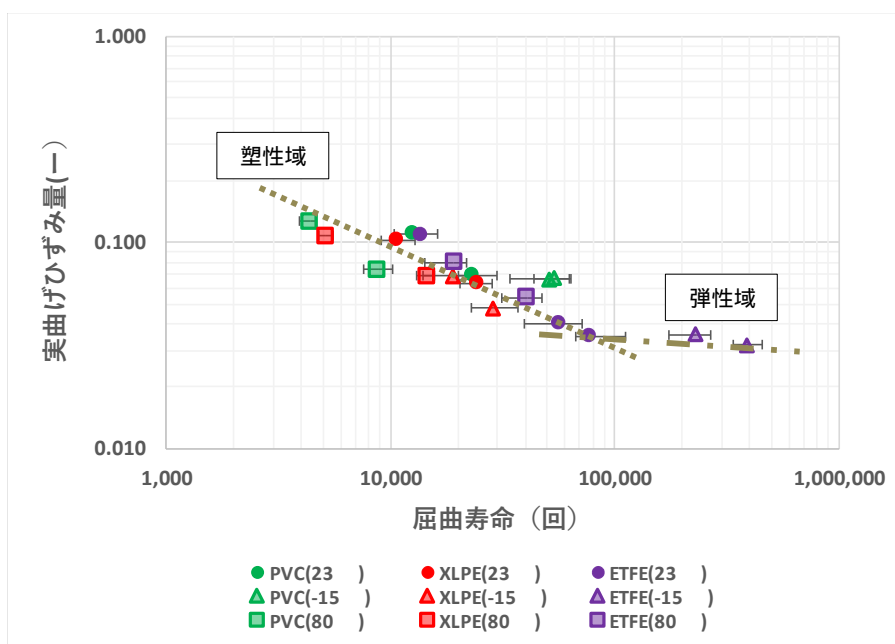


図 4.20 実曲げひずみ量と屈曲寿命の関係 (温度-15、23、80)

#### 4.6 屈曲寿命差異の要因の推定

図 4.21 に、被覆材種に依る屈曲寿命差異の要因を示した。ここでは、電線の機械特性、実曲げひずみ量、屈曲部状態について列挙している。電線の機械特性に関しては、4.5 項で述べた様に、被覆材種により応力-ひずみの関係に差異があり、電線の剛性が異なるために屈曲時の曲げ曲率に差異が生じ、実曲げひずみ量に差異が生じたと推定した。その結果、4.4 項で述べたように屈曲回数あたりの曲げ疲労の進展に影響を与えたものと推定される。従って、導体構造・材質が同じであれば、導体破断までの屈曲回数は、被覆材種の機械特性の差異に起因する実曲げひずみ量の差異の影響を受けると推定された。

一方、温度の差異についても基本的には同様のメカニズムと推定している。次項では、被覆材種により屈曲寿命の差異が見られた低温-15℃における屈曲寿命の差異の要因について議論する。

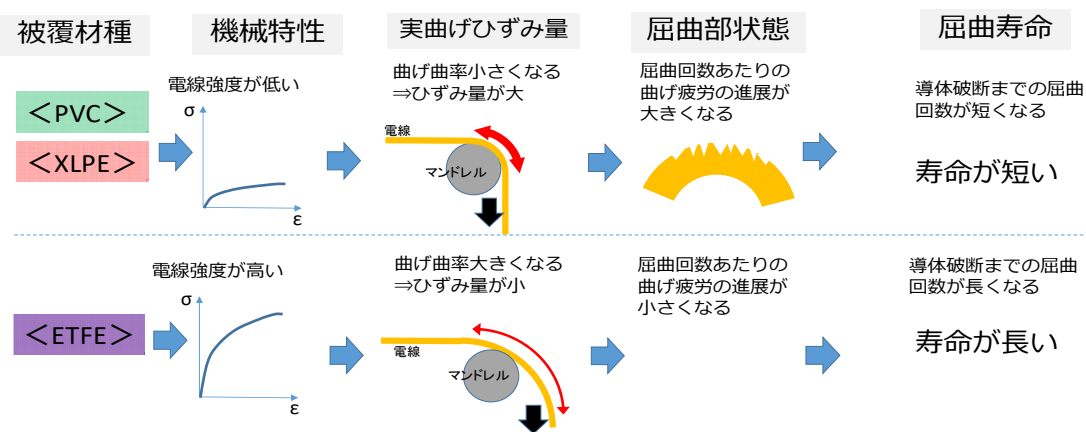


図 4.21 屈曲寿命差異の要因の推定

#### 4.7 18年度品の低温屈曲寿命の差異について

18年度に屈曲試験データベース構築を目的として、屈曲寿命に及ぼす各種試験条件の影響について検討し、試験温度の影響についても報告を行っている。

図 4.22 に、本年度検討（20年度品）と18年度検討（18年度品）の屈曲寿命を示す。これよりPVC（20年度品）では、低温側（-15℃）で寿命が長いのに対して、PVC（18年度品）では低温側（-15℃）で寿命が短くなる傾向を示していた。

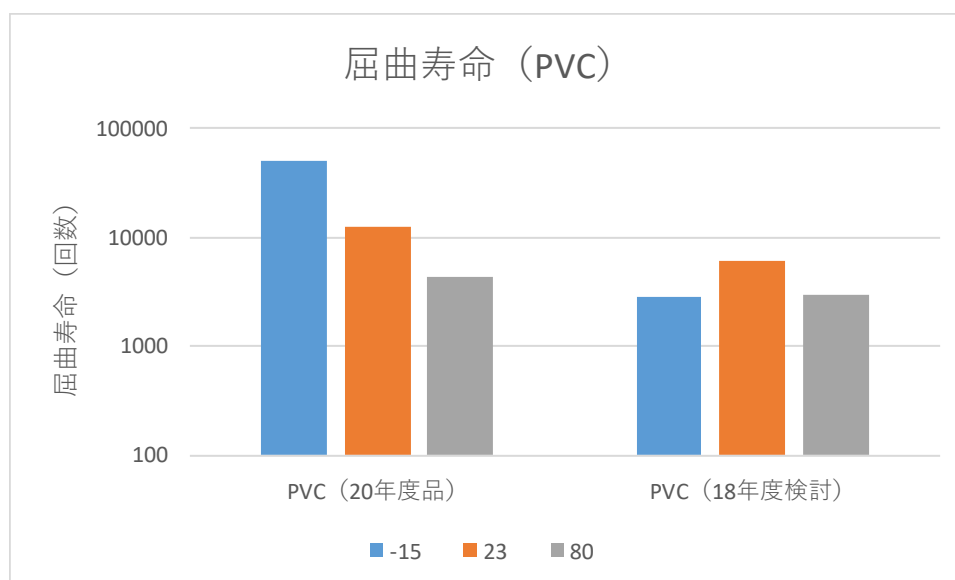


図 4.22 屈曲寿命の温度依存性

図 4.23 に 23℃、-15℃ 試験後の屈曲部の観察写真を示した。-15℃ の場合、20年度品と18年度品の両者共に、被覆材と導体が両方破断している。



PVC (20年度品)(23℃ 試験後破断部)



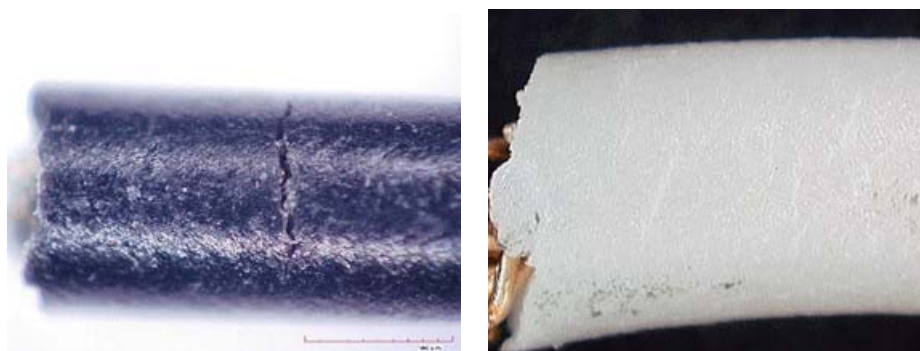
PVC (18年度再試作品)(23℃ 試験後破断部)



PVC (20年度品)(-15 試験後破断部) PVC (18年度再試作品)(-15 試験後破断部)

図 4.23 試験後の屈曲部の観察

さらに、破壊部の近傍の被覆材表面をみると、図 4.24 に示したように、亀裂のようなものが 20 年度品と 18 年度再試作品の両方で観察された。

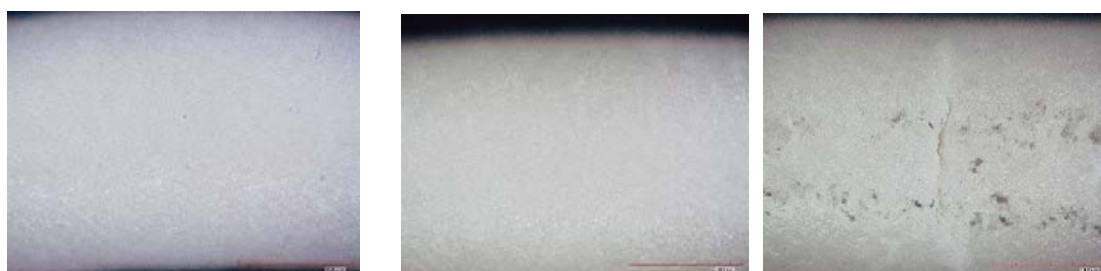


PVC (20年度品)(-15 試験後破断部) PVC (18年度再試作品)(23 試験後破断部)

図 4.24 試験後の破断部の観察

低温-15 における被覆材の破断が、どのタイミングで発生したかを調査するために、18 年度品について、屈曲途中の被覆材表面を観察した結果を図 4.25 に示す。平均屈曲回数 3,100 回に対して 2,400 回で微小なヒビがみられ、3,000 回後で表面亀裂が発生していた。別の 3,000 回屈曲後の試料では、被覆材の破断が観察されたが導体の破断は見られなかった。以上のことから、被覆材の破断が導体の破断よりも先に発生し、その後、導体の破断が一気に進み電線の破断に至ったと推定された。おそらく、導体の破断は、被覆材が破断することにより、破断部に曲げひずみが集中し、実曲げひずみ量が大きく増大し破断に至ったと考えられる。

20 年度品についても、前述のように破断部近傍において、被覆材表面に亀裂が見られていることから、18 年度品と同様に、破壊の直前に導体の破断よりも先に被覆材が破断したものと推定される。



屈曲 1500 回後 (50%)

屈曲 2400 回後 (75%)

屈曲 3000 回後 (100%)



屈曲 3000 回後 (100%)

図 4.25 屈曲途中の被覆電線表面の観察

図 4.26、図 4.27 に XLPE および ETFE の -15 試験後の破壊部の観察結果を示す。XLPE は、導体だけの破断と被覆材と導体の両ケースが観察された。ETFE は導体破断のみの破断であった。このように、低温 -15 においては被覆材によって破壊モードが異なっており、4.6 項で述べたような導体破断に至る要因に加えて、被覆材自体の破壊メカニズムを考慮に入れる必要があると考えられる。なお -15 における PVC と XLPE の寿命の差異の要因については、4.8 項で述べる。

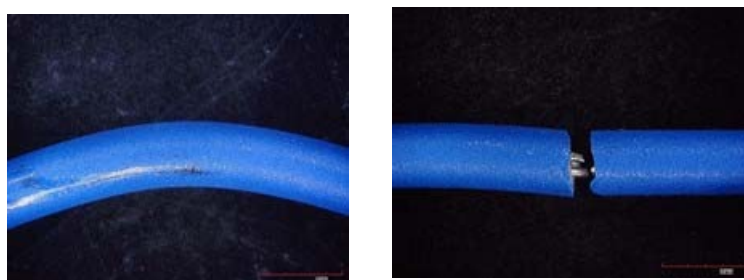


図 4.26 XLPE (-15 試験後破断部) 試験後の破壊部の観察



図 4.27 ETFE (-15 試験後破断部) 試験後の破壊部の観察

ここで、18年度品の屈曲寿命が-15 < 23、20年度品が-15 > 23 となった理由について検討する。

18年度品の屈曲寿命が-15 < 23 となった理由に関して、既報<sup>1)</sup>では屈曲寿命の破断メカニズムについて、素線同士が擦れることによって凝着摩耗を起こした部位が細くなり破断に至ると推定している。そして、-15 と 23 の寿命の差異に対して、-15 の場合、被覆材が硬化するために曲げによる被覆材の変形が 23 より小さく素線の拘束が強くなるため、素線同士の擦れが強くなり屈曲回数が少なくなったと推定している。ここで、18年度品の-15 および 23 の屈曲試験後の破壊部観察結果を図 4.28 に示す。23 においては、破壊部近傍では黒く変色した摩耗痕（黒は銅粉が黒く変色）が所々観察された。一方、-15 では、破断部以外でくびれた形状の細りが観察されていることから、前述の推定のような素線同士の強い拘束が生じていたと考えられる。



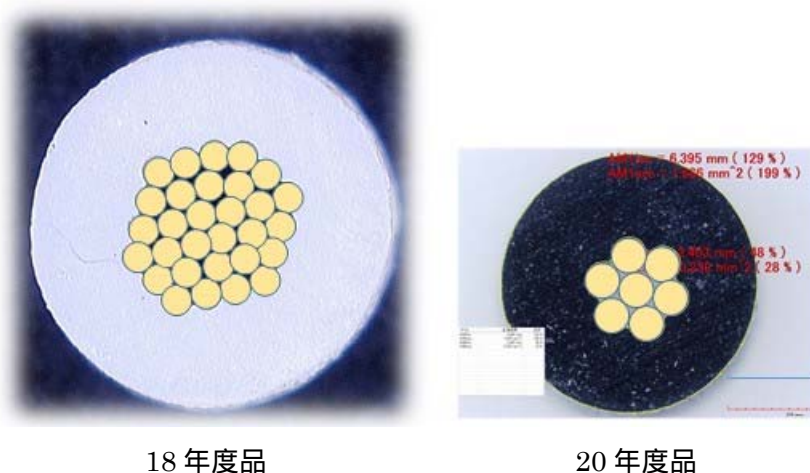
破壊部（試験温度-15℃）

破壊部（試験温度 23℃）

図 4.28 18年度品試験後の破壊部の観察

一方、20年度品の場合、3.3項の図 3.14、図 3.15 に 23℃、-15℃ の試験後の破断部には皺状痕が多く見られおり、素線同士の摩耗痕は 18年度品より比較的少ないように見える。この皺状痕は、曲げひずみによる長手方向の伸びおよび圧縮の繰り返し疲労により発生したものと考えられる。従って、4.5項で議論したように曲げひずみ量の差異が破断までの回数に大きく影響し、実曲げひずみ量が-15℃ < 23℃ であるため、屈曲寿命は-15℃ > 23℃ となったと考えられる。

以上、18年度品と 20年度品の-15℃ および 23℃ の寿命の差異の要因として、破壊メカニズムの差異すなわち 18年度品は素線同士の摩耗が主体であり、20年度品は繰り返し曲げが主体であることが差異の要因と推定した。それぞれの劣化は、両者ともに同時に進行していると考えられるが、どちらが優位であるかは、導体の構造や被覆材厚みなどの差異に起因すると推測される。今回の検討ではその要因を明確化できなかったが、参考までに、18年度品と 20年度品の電線の断面構造を図 4.29 に示した。18年度品の導体構造は素線径 0.18mm の 30 本撚り、導体ピッチ 28mm、導体外径 1.2mm、仕上径 2.2mm、被覆厚さ 0.5mm、20年度品の導体構造は素線径 0.20mm の 7 本撚り、導体ピッチ 10mm、導体外径 0.6mm、仕上径 1.5mm、被覆厚さ 0.45mm である。また、18年度品と 20年度品は同じ PVC（18年度品はカーボン無、20年度品はカーボン有）を使用しており、材質面での差異はないと考えられる。



18年度品

20年度品

図 4.29 18年度品と20年度品の電線断面構造

18年度品は、20年度品と比較して撚り本数が多く、導体外径が大きいため、曲げられた時の長手方向のひずみ量の差が大きく、素線同士が擦れる確率が高くなった可能性が考えられる。しかし、仕上径、被覆厚さ、撚りピッチなどの差異の影響も排除できないため、より詳細には、これらを切り分けた状態での実験を行い、破壊メカニズムの要因を明確にしていく必要があると考える。

#### 4.8 低温-15°Cにおける屈曲寿命の差異について

3.2.2 項で述べたように、低温-15 における屈曲寿命は、ETFE > PVC > XLPE であることを確認している。ここでは、-15 における PVC と XLPE の寿命の差異について考察する。

4.7 項で述べたように、試験後に PVC は導体と被覆材の両方が破断しているのに対し、XLPE は導体が破断あるいは導体と被覆材の両方が破断したケースが見られた。このことから、導体の破断は XLPE の方が早く発生していると推定される。

また、図 4.30 に示した屈曲時の導体抵抗の変化をみると、PVC では破断まで導体抵抗の変化はないのに対して、XLPE は破断手前で導体抵抗の上昇が見られている。これより、XLPE は導体の破断が PVC よりも早く進行していることが分かった。

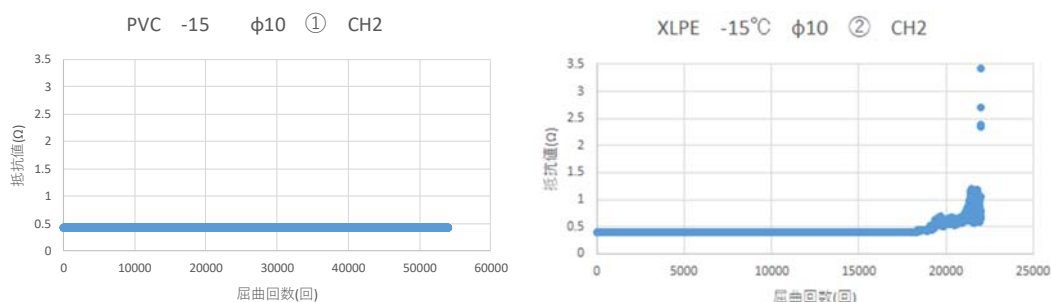


図 4.30 導体抵抗の変化

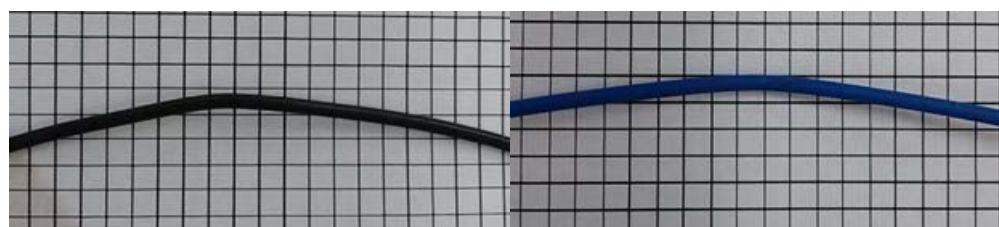
XLPE の方が導体の破断が早く進行した要因として、-15 における被覆材強度の差異、曲げひずみ量の差異、導体自体の屈曲寿命の差異の3つが考えられる。被覆材強度の差異に関しては、図 4.11 から、XLPE の剛性は PVC よりも小さいと考えられる。一方で、屈曲時の屈曲曲率の差異に関しては、-15 下で荷重をかけたまま屈曲し静置した時の屈曲状態を比較した結果、図 4.31 に示したように屈曲部においては、XLPE (青) の屈曲曲率は 22mm であり PVC (黒) と曲率にはほとんど差異が見られなかった。



図 4.31 屈曲部の状態 (設定曲げひずみ量 0.15)



次に、屈曲途中での曲げ曲率の差異の可能性を検証した。PVC50,000 回後（寿命 51,000 回）および XLPE15,000 回後（破壊寿命 15,000 回）の屈曲状態を比較した結果、両者に大きな差異はみられず、XLPE に局所的に大きく屈曲している箇所は観察されなかった。（図 4.32）



PVC（屈曲回数 50000 回後）

XLPE（屈曲回数 15000 回後）

図 4.32 試験後の屈曲部の状態（設定曲げひずみ量 0.15）

以上のように-15 における PVC と XLPE の曲げ曲率に大きな差異は見られなかった。次に、PVC および XLPE 被覆電線の導体のみの屈曲寿命を測定・比較した。その結果、図 4.33 に示すように被覆材がない場合の導体の屈曲寿命は、-15 と 23 においてほぼ同等であることが分かった。

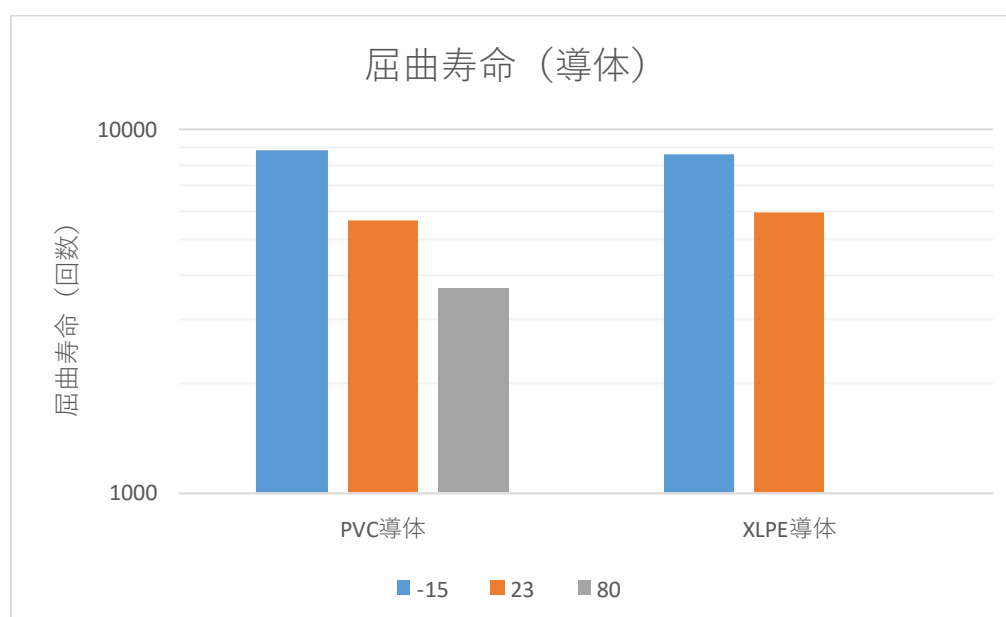


図 4.33 被覆材なしの導体の屈曲寿命（設定曲げひずみ量 0.15）

以上より、-15 における PVC と XLPE の剛性の差があるものの、導体破断に至る差異（屈曲寿命の差）の要因について明確にすることができなかった。今回、屈曲時の実曲げひずみ量を曲げ曲率から大胆に推定したが、厳密には電線内部あるいは屈曲箇所により実曲げひずみ量が異なっていると考えられる。今後は、このような実曲げひずみ量の差異を考慮に入れながら、寿命の差異を検証していく必要があると考える。

## 5. 全体のまとめ

本検討において恒温槽付屈曲試験装置を用い、屈曲特性に対する被覆材の材質、試験温度の影響を定量的に調査すると共に、導体・被覆材の観察、各種物性評価により屈曲寿命差異の要因の推定を行った。

第2章では検討する被覆電線の各種物性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について述べた。

第4章では、引張強度、密着力、摩擦力の影響を検討し、機械特性と屈曲寿命の相関が高いことを確認した。また、屈曲途中の導体観察、実曲げひずみ量の影響を検討し、屈曲寿命の差異の要因を推定した。

- 1) 一般社団法人電線技術センター,自主研究「屈曲試験データベースの構築」報告書 K18-025

### 禁無断転載

自主研究

「屈曲試験データベースの構築(3)」

(研究期間: 2020年4月~2021年3月)

報告書

2021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。