

自主研究

「屈曲試験データベースの構築」

(研究期間：平成30年6月～平成31年3月)

報 告 書

平成31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 試料及び出来栄え評価	5
2.1 試験試料	5
2.1.1 ポリ塩化ビニル材料の配合組成	5
2.1.2 電線押出	6
2.2 評価方法	7
2.2.1 引張試験	7
2.2.2 密着力試験	8
2.2.3 導体抵抗	8
2.2.4 構造寸法試験	9
2.2.5 導体引張試験	9
2.3 出来栄え評価結果	10
3 屈曲条件の最適化の検討	11
3.1 最適荷重の検討	11
3.2 屈曲角度の検討	13
3.3 まとめ(試験条件の最適化)	15
4 本試験	16
4.1 試験計画	16
4.2 試験結果	17
4.2.1 試験温度の影響	17
4.2.2 曲げひずみ量の影響	26
4.2.3 屈曲角度の影響	28
4.2.4 まとめ	34

4.2.5 考察	36
4.2.5.1 被覆材の影響	36
4.2.5.2 導体の影響(導体強度)	38
4.2.5.3 導体の影響(導体抵抗)	39
4.2.5.4 導体の影響(表面観察)	41
4.2.5.5 導体の影響(単線との比較)	44
4.2.5.6 導体の影響(被覆除去試料での屈曲回数の比較)	45
5 総まとめ	52

1 はじめに

近年、人手不足や作業効率改善などの観点から人間の代わりに工場で作業する産業用ロボットの普及が著しく、これからも生産台数は年々増えていくことが予想される。これらロボットの可動部に使われる電線には高い屈曲耐久性が要求される。

本研究ではこれらの屈曲部に使用される電線・ケーブル設計のための指針となる系統的な屈曲試験データベースを構築することを目的として、電線総合技術センターで製造した電線と恒温槽付屈曲試験装置を用いて屈曲特性に対する屈曲速度、試験温度、曲げひずみ量の影響調査と破断形態の観察と解析を行った。

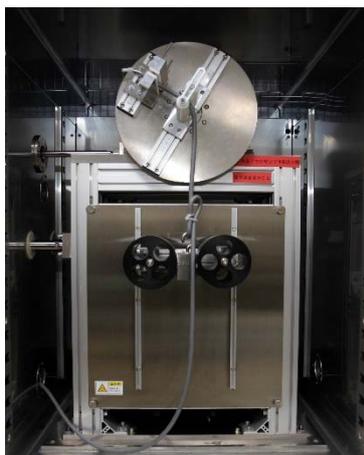


図 1 恒温槽付屈曲試験機

試験を始めるにあたって、試験条件を決めるために曲げ試験の試験規格を調査（表 1）したが、産業ロボット用電線の屈曲試験規格は決まっていない。そこで当研究では広範囲な試験に先立って、適正な屈曲試験条件について検討を行った。

表 1 曲げ試験方法の規格

NO.	準拠規格	対象製品	錘の重さ 張力	ひずみ 曲げ半径	屈曲角度	屈曲速度	マンドレル間隔	通電電流	屈曲回数	前処理	判断基準	
											外観	断線
1	JIS C 3662 =IEC 60227-2 3.2 Bending test	定格電圧450/750V以下の塩化ビニル絶縁電線	0.5kg	2.5mm	±90°	往復60回/分	—	0.1A	—	—	5.6.3.2 IEC 60227-1	
2	JIS C 3005 4.27.1 b) 曲げ試験	ゴム・プラスチック絶縁電線 キャブタイヤ構造 b) 平形	—	ケーブル 短径 の2.5倍	±90°	往復10回/分	—	—	200回	—	試料に生ずる破損または ひび及び割れの有無	導体素線の断線数
3	JIS C 3005 4.27.4 曲げ試験	ゴム・プラスチック 絶縁電線 平形構造(コード)	150g/mm ² 最小500g	半径2.5mm	±180°	往復10回/分	ケーブル短径	許容電流	100回	—	—	導体素線の断線数
4	用品 別表第一 多心コード曲げ 強度試験	多心コード	150g/mm ² 最小500g	半径2.5mm	±180°	往復10回/分	ケーブル短径	許容電流	断線まで	100℃ ×48時間	線間短絡が生ぜず、かつ 絶縁体にひび、割れその 他の異常の生じないこと	—
5	用品 別表第四 電源電線等折曲げ試 験	配線器具 電源電線等	500g	—	±60°	往復40回/分	—	—	2000回	—	電源電線等が短絡しない	素線の断線率が 30%以下であること
6	用品 別表第一 附表 第二十四 耐震試験	電線	—	3mm	±45°	往復200回/分	—	—	2000回	—	絶縁体または外装にひ び、割れその他の異常が 生ぜず	導体の素線の断線率が 30%以下であること
7	EN 50396 6.4 Bending test	low voltage energy cables	0.5kg	2.5mm	±90°	往復60回/分	—	0.1A	—	—	the relevant cable standard	

2 試料および実験方法

導体：軟銅線 外径 1.2mm 素線径 0.18 mm 素線 30 本撚合せ

絶縁体：ポリ塩化ビニル (JECTEC4 コンパウンド)

絶縁厚さ：0.5mm (仕上がり外径：2.2mm)

2.1 試験試料

2.1.1 ポリ塩化ビニル材料の配合組成

屈曲試験には汎用的な軟質ポリ塩化ビニル (以下, PVC) で導体を被覆した薄肉低圧自動車用電線 (AVS 0.75f) を模擬した電線を用いた。導体には断面積 0.763 mm^2 (構造 0.18 mm 30 本撚合せ) を使用し、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	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

2.1.2 電線押出

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。
JECTEC の 40mm 押出機を使用して試験用電線を製作した。



図 2.1 押出機

(押出条件)

ダイス内径：2.4mm

ニップル内径：1.3mm

押出線速：15m/分

押出機各部位の温度を表 2.2 に示す。

表 2.2 各部位の温度

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

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 引張試験

JASO D 618 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

表 2.3 引張試験結果

	始端		終端	
	引張強さ(MPa)	伸び(%)	引張強さ(MPa)	伸び(%)
1	21.74	246.1	19.91	220.3
2	21.61	237.6	20.56	238.3
3	21.79	246.3	19.86	245.2
4	21.63	239.5	20.25	234.3
5	21.63	249.0	20.26	237.1
平均値	21.7	243.7	20.2	235.0

2.2.2 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

表 2.4 密着力測定結果

荷重(N)	始端	終端
1	11.70	10.88
2	9.97	10.19
3	11.90	10.61
最小値(N)	9.97	10.19

2.2.3 導体抵抗

図 2.3 に示す導体抵抗測定装置を用いて抵抗値を測定した。得られた抵抗値を、次の式を用いて単位長さ当たりの導体抵抗値に換算した。各試料とも各 1 回ずつ測定した。

$$R_{20} = \frac{R_t}{L[1 + \alpha(t - 20)]}$$

R : 20 における 1m 当たりに換算した導体抵抗値 (m)

R_t : 測定時の導体抵抗

L : はんだ付けされていない部分の導体長さ (m)

t : 測定時の導体温度 ()

: 20 における導体抵抗の温度係数



図 2.3 導体抵抗測定装置

2.2.4 構造寸法試験

JASO D 618 に準拠し、外径と被覆厚さを測定した。また、被覆材の厚さから偏肉率を算出した。ここで偏肉率は以下のように定めた。

$$\text{偏肉率(\%)} = \frac{\text{最小厚さ}}{\text{最大厚さ}} \times 100$$

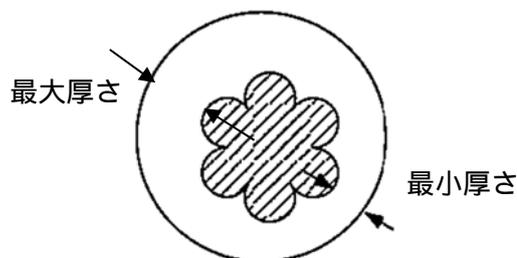


図 2.4. 絶縁体最小厚さの測定

2.2.5 導体引張試験

押出に使用した 30/0.18 の導体撚り線を 1 m 採取し、繰り返し回数 n=3 で引張試験を実施した。

引張方向： 押出方向

引張速度： 100mm/min

表 2.5 導体引張試験結果

荷重(N)	市販品	JECTEC
1	173	185
2	172	186
3	168	185
平均	171	185

2.3 出来栄え評価結果

JECTEC で製作した電線の出来栄えを評価した結果を以下の表に示す。比較のために市販されている AVS 電線のデータも併記した。

表 2.6 出来栄え評価結果

項目	規格値	市販品(PVC)	JECTEC社内押出品(PVC)	
			始端	終端
引張試験	15.7MPa以上	15.9	21.7	20.2
伸び	125%以上	217	244	235
密着力	5N以上	9	10	10
外観	—	良好で発泡なし	良好で発泡なし	良好で発泡なし
導体構成	30/0.18	30/0.178~0.180	30/0.178~0.180	
導体ピッチ	—	35	28	28
仕上り外径	標準2.2mm	2.1	2.2	2.2
偏肉率	—(%)	88	83	85
導体抵抗	24.4mΩ/m以下	23.84	23.55	23.55
導体引張強さ	—(N)	171	185	185
導体変色	—	なし	なし	なし

評価結果より今回製作した電線は JASO D 618 に規定された規格値を全て満たしており、また市販品と比較しても遜色のない特性の電線であることを確認した。そこでこの電線を使って本試験を実施することにした。

3 屈曲条件の最適化の検討

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。

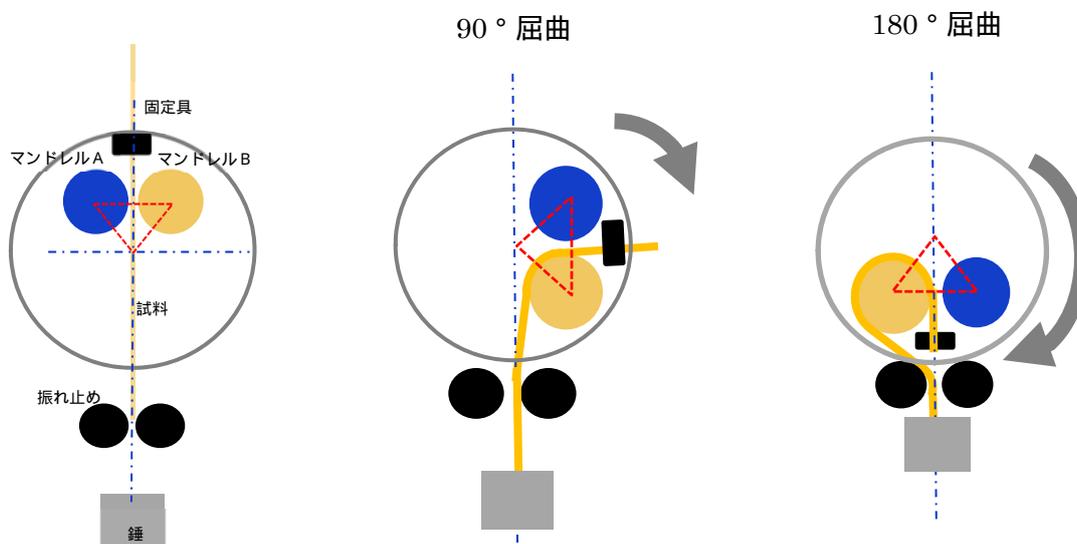


図 3.1 恒温槽付き屈曲試験機の構造

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3 以上になったら全破断と判断した。

本試験開始に先立ち、最適な屈曲角度と錘の重さ（荷重）の検討を実施した。

3.1 試験荷重の検討

市販 AVS 電線（0.75SQ 30/0.18）を用いて 500g、200g、100g、50g の4種類の錘を使って屈曲試験を行い、導体の破断形態の観察を行った。

試験条件

曲げひずみ量：0.22（マンドレル径： 10）

屈曲角度：90°

荷重：500,200,100,50g

屈曲速度：60 回/分

試験温度：23

図 3.2 に屈曲試験結果を示す。

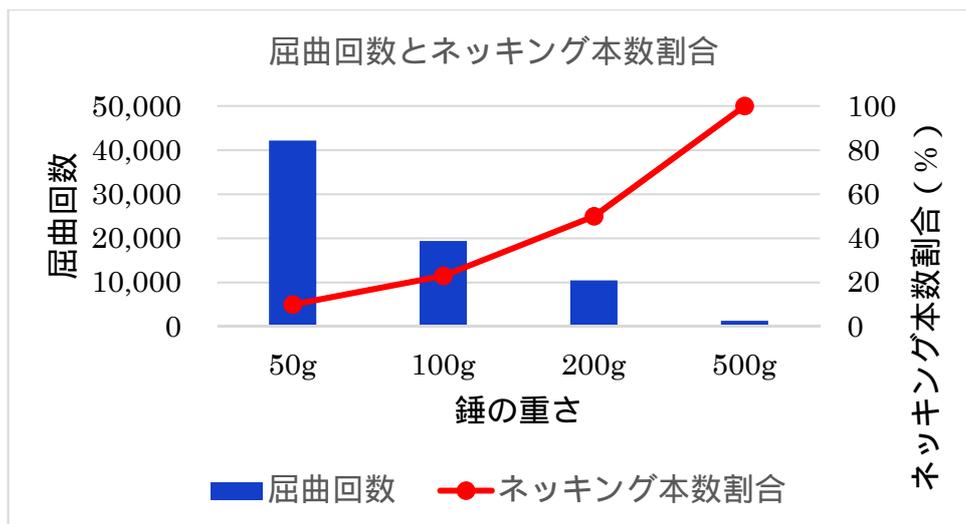


図 3.2 荷重と屈曲回数の関係



図 3.3 ネッキングの様子 (荷重 500 g)



図 3.4 フラットな破断面の様子 (荷重 100g)

図 3.2 に示すように、曲げひずみ量が同じであっても錘の重さの違いによって屈曲回数と導体の破断形態が異なることが分かった。

500 g では屈曲回数は少なくネッキング破断の割合が高かった。一方で 50 g では屈曲回数は多くネッキング破断の割合は少なかった。ただし、試験状況を観察した結果、50g では電線がマンドレルにわずかに接しているのみでマンドレルに沿って屈曲していない可能性があると考えられたため、試験条件として採用しなかった。

3.2 屈曲角度の検討

屈曲回数に対する屈曲角度の影響を検討した。試験条件は以下の通りである。

曲げひずみ量：0.22 (マンドレル径： 10)

荷重：50g,100g

屈曲角度：90° ,135° ,180°

屈曲速度：60 回/分

試験温度：23

繰り返し試験回数：5 回

試験結果を図 3.5～図 3.6 に示す。

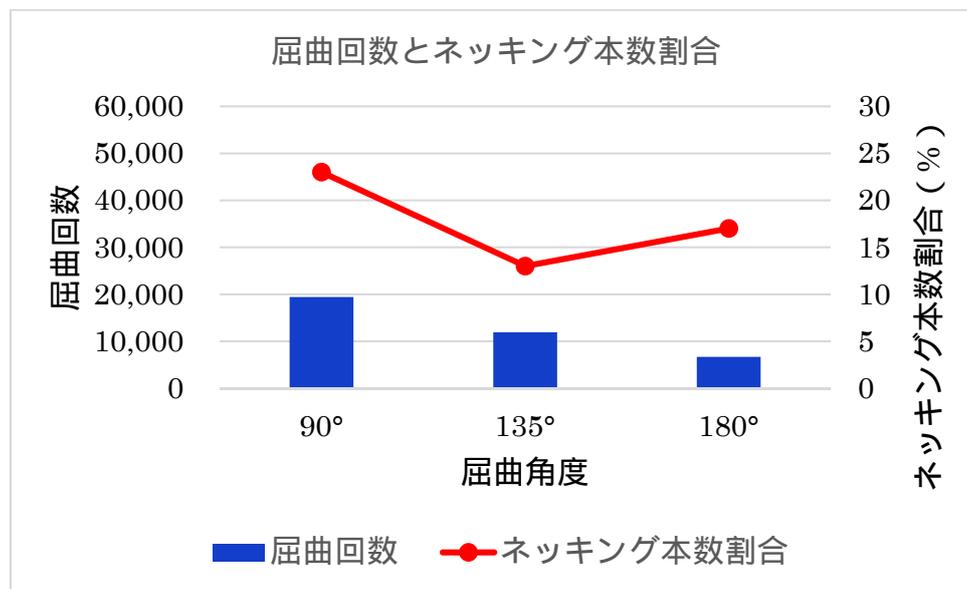


図 3.5 荷重 100 g での角度別の屈曲回数とネッキング本数割合

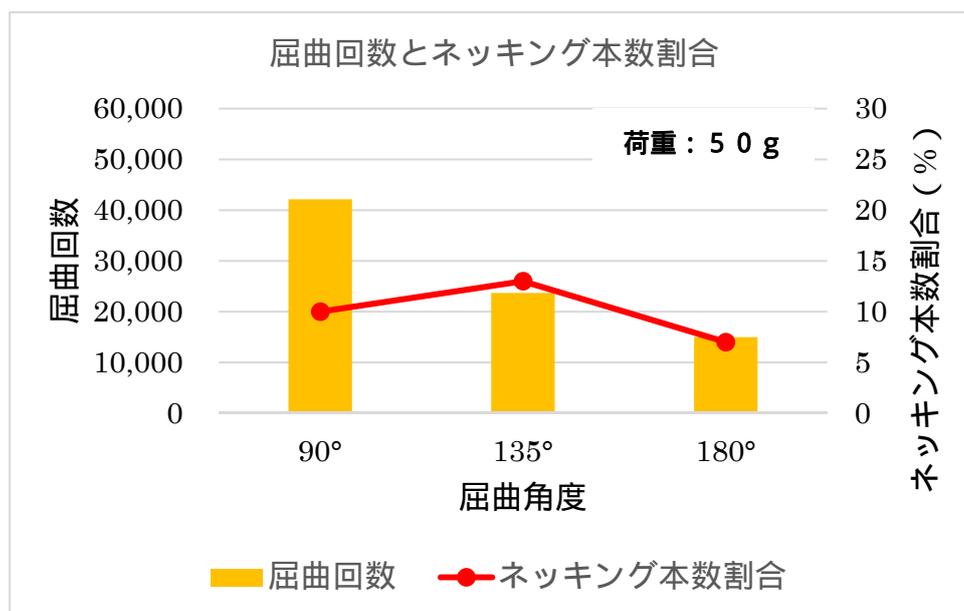


図 3.6 荷重 50 g での角度別の屈曲回数とネッキング本数割合

図 3.5、3.6 から荷重に関わらず屈曲角度が大きいほど屈曲回数は少なくなる結果が得られた。曲げひずみ量 () は電線の径 (d) とマンドレル径 (D) の比で与えられ ($= d/D$)、屈曲角度は影響しないと考えられる。しかしマンドレル径が一定であるにも関わらず屈曲角度 90° と 135° での屈曲回数が 180° よりも多かったことから、屈曲角度 90° と 135° では電線がマンドレルに十分に沿って曲げられていないと考えられる。また、荷重 50g と 100g に於ける屈曲回数のバラツキを図 3.7、3.8 に示す。

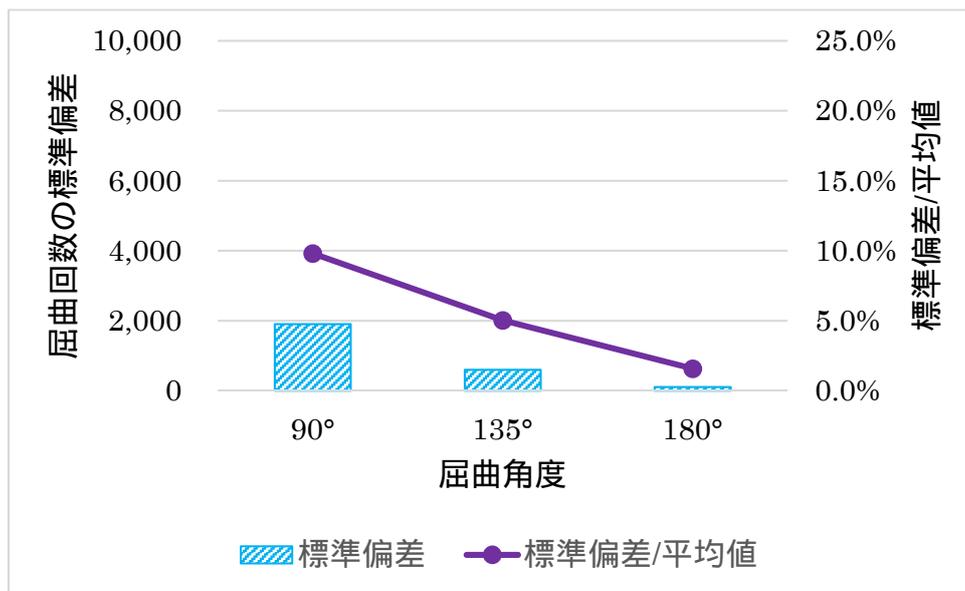


図 3.7 荷重 100 g での角度別の屈曲回数のばらつきの影響

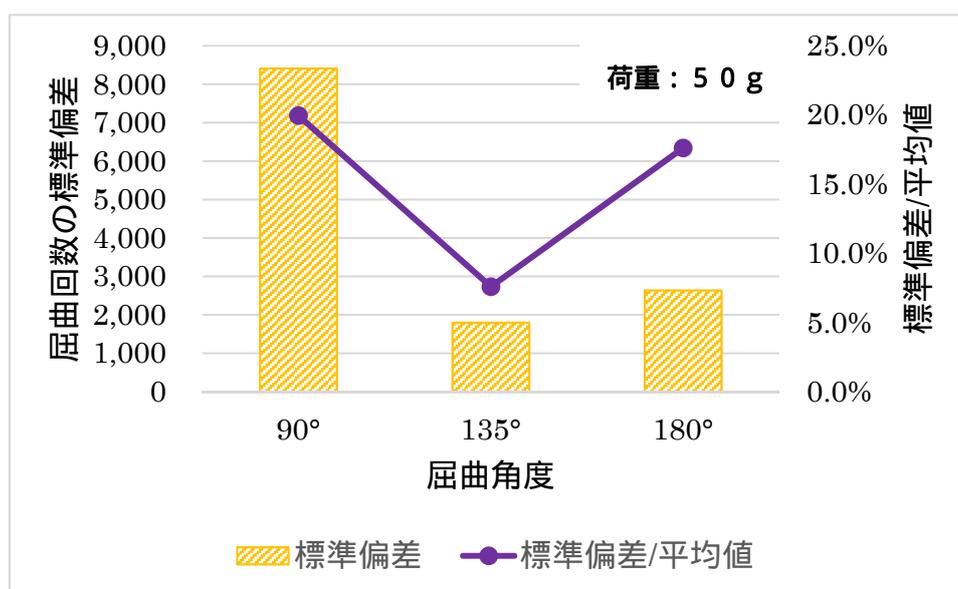


図 3.8 荷重 50 g での角度別の屈曲回数のばらつきの影響

荷重 100 g では屈曲角度が大きいほどばらつきが小さいが、荷重 50 g は屈曲角度によらず屈曲回数のばらつきが大きい。これは試験中の錘の揺れが影響したと考えられる。以上の検討結果から本試験として電線に負荷する荷重として 100 g を採用した。

3.3 まとめ(試験条件の最適化)

本試験を実施するにあたって最適な荷重と屈曲角度を検討した。荷重別の比較では、荷重が過大になるとネッキング破断の割合が増え、逆に荷重が過少な場合には屈曲回数のバラツキが大きくなることを確認し、本試験では荷重 100 g を採用した。また屈曲角度が小さいとネッキング破断の割合が増え屈曲回数のバラツキが大きくなるため、本試験では屈曲角度 180° を採用した。

4 本試験

4.1 試験計画

本試験では屈曲特性に対する 曲げひずみ量 試験温度 屈曲速度の3因子の影響を評価した。

試験温度は PVC の脆化温度である -15 と恒温槽付屈曲試験装置の仕様上限温度である 80、室温の 23 の3水準とした。

屈曲速度は電線総合技術センターの過去の試験実施例を参考にして、60 回/分と 30 回/分の2水準とした。

これらの条件を組み合わせると表 4.1 に示す条件で繰り返し回数 n=5 で試験を実施した。

表 4.1 屈曲試験計画

試験番号	曲げひずみ量	試験温度	屈曲速度(回/分)	荷重	屈曲角度
①	0.22	23°C	60	100g	180°
②			30		
③		-15°C	60		
④			30		
⑤		80°C	60		
⑥			30		
⑦	0.11	23°C	60		
⑧			30		
⑨		-15°C	60		
⑩			30		
⑪		80°C	60		
⑫			30		
⑬	0.06	23°C	60		
⑭			30		
⑮		-15°C	60		
⑯			30		
⑰		80°C	60		
⑱			30		

4.2 試験結果

4.2.1 試験温度の影響

各試験温度における屈曲試験結果を表 4.2、4.3 に示す。また、屈曲試験データを表 4.4 に示す。

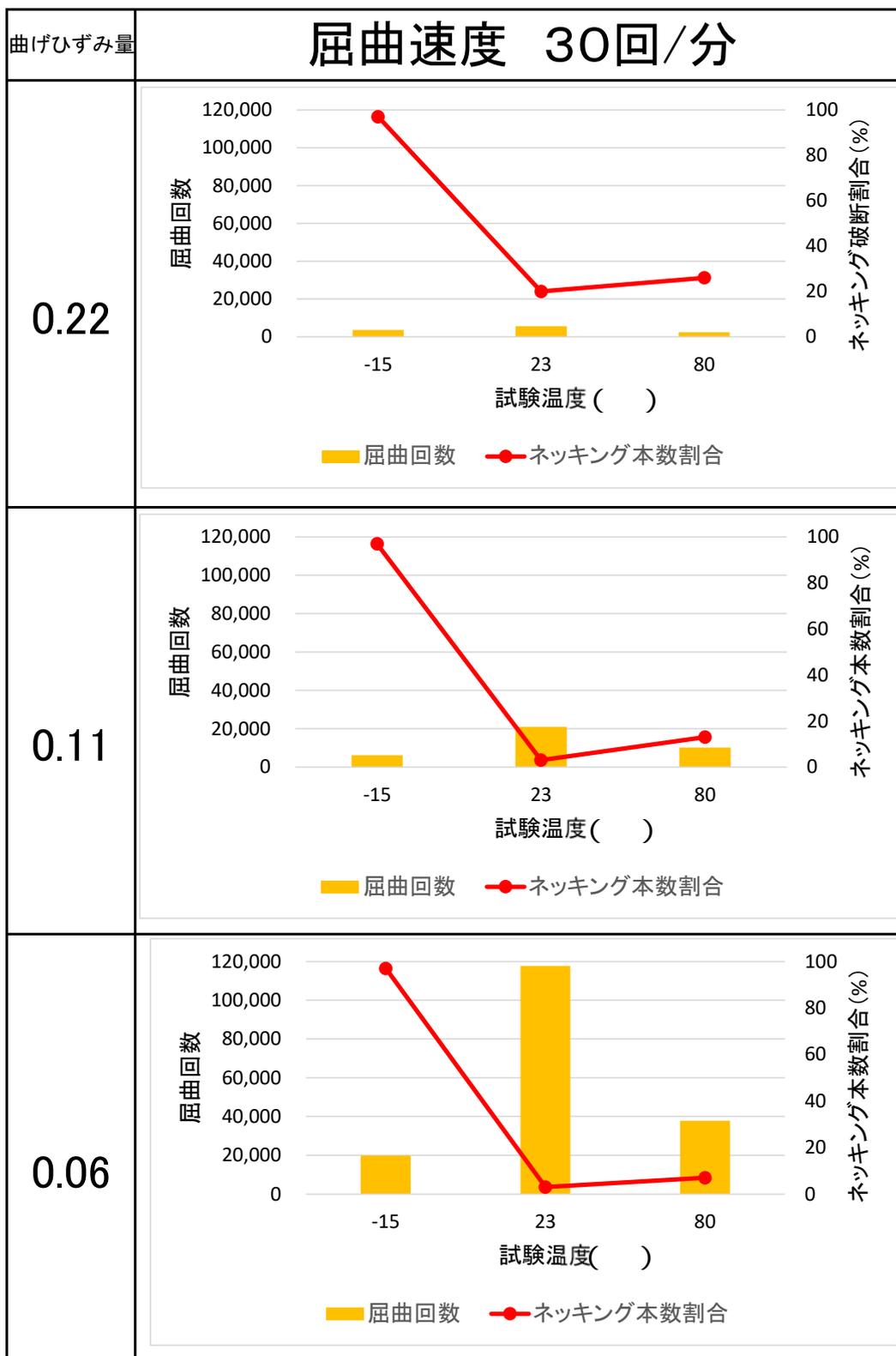


表 4.2 試験温度毎の屈曲回数（屈曲速度 30 回/分）

表 4.3 試験温度毎の屈曲回数（屈曲速度 60 回/分）

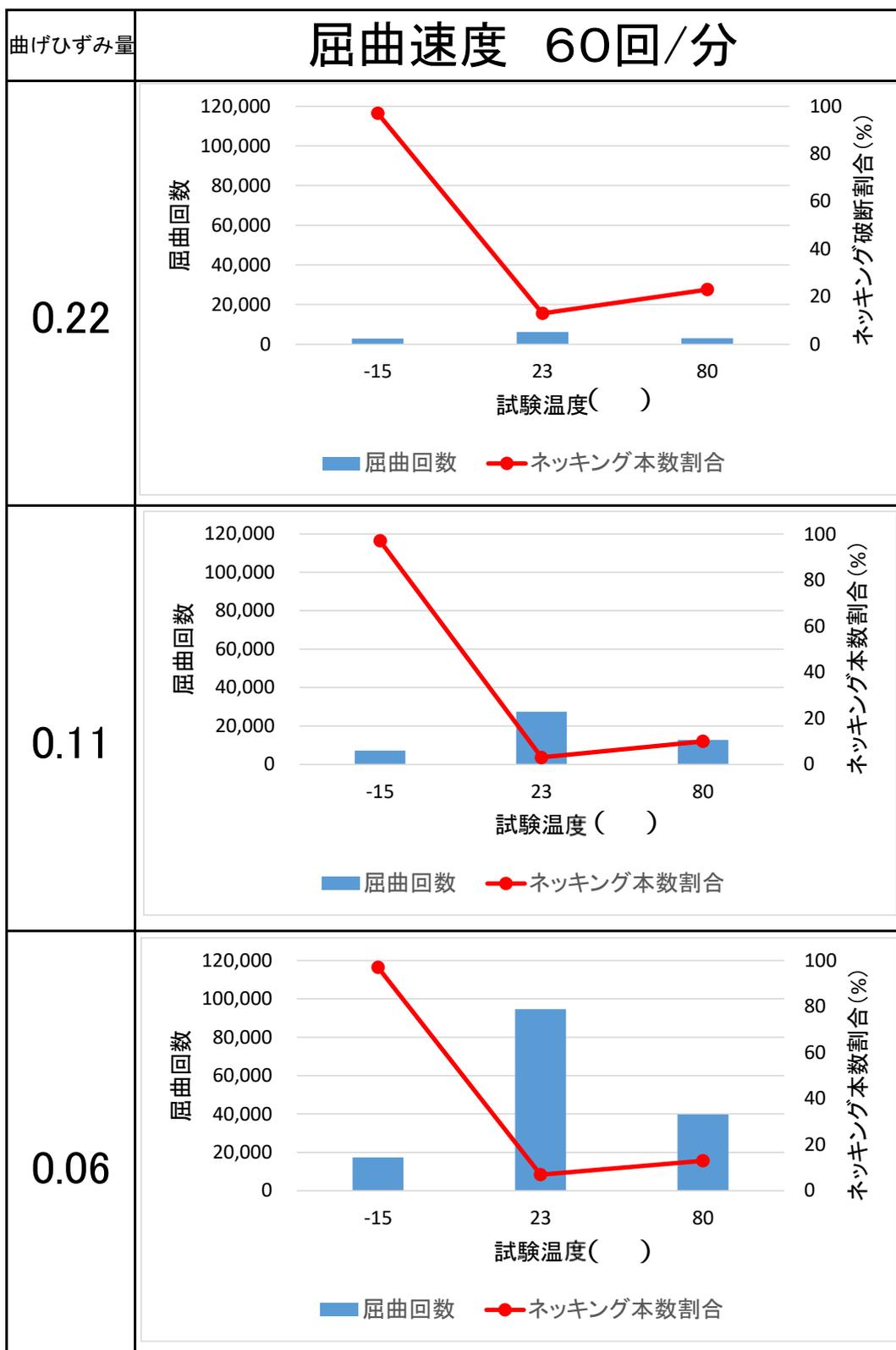


表 4.4 屈曲試験データ

試験番号	30回/分 曲げひずみ0.22			60回/分 曲げひずみ0.22		
	-15°C	23°C	80°C	-15°C	23°C	80°C
1	3,043	6,621	2,279	2,895	6,212	3,117
2	3,122	5,759	2,718	3,193	6,690	2,767
3	4,300	5,173	2,218	2,846	6,428	3,101
4	3,133	4,963	2,533	2,712	5,494	2,741
5	3,974	5,552	2,540	2,765	5,712	3,030
屈曲回数平均	3,514	5,614	2,458	2,882	6,107	2,951
標準偏差	581.0	643.7	205.9	187.6	496.4	183.2
標準偏差/平均値	16.5%	11.5%	8.4%	6.5%	8.1%	6.2%

試験番号	30回/分 曲げひずみ0.11			60回/分 曲げひずみ0.11		
	-15°C	23°C	80°C	-15°C	23°C	80°C
1	5,903	21,480	9,468	7,878	28,096	11,857
2	5,062	19,174	10,357	6,155	32,058	13,620
3	5,898	22,883	10,556	6,945	22,958	12,422
4	6,945	19,759	11,162	6,646	28,656	12,430
5	6,646	21,601	10,947	8,434	25,420	13,244
屈曲回数平均	6,091	20,979	10,498	7,212	27,438	12,715
標準偏差	736.3	1500.8	657.0	928.1	3442.5	707.5
標準偏差/平均値	12.1%	7.2%	6.3%	12.9%	12.5%	5.6%

試験番号	30回/分 曲げひずみ0.06			60回/分 曲げひずみ0.06		
	-15°C	23°C	80°C	-15°C	23°C	80°C
1	21,564	108,305	41,628	18,527	88,039	36,595
2	17,572	119,000	34,229	15,070	89,018	44,541
3	18,533	129,000	33,468	17,052	116,681	34,326
4	21,747	104,283	41,236	16,814	95,561	46,521
5	19,928	127,652	38,540	19,455	83,749	36,967
屈曲回数平均	19,869	117,648	37,820	17,384	94,610	39,790
標準偏差	1834.7	11143.3	3825.0	1687.1	13042.7	5383.1
標準偏差/平均値	9.2%	9.5%	10.1%	9.7%	13.8%	13.5%

表 4.2、表 4.3 に示すように、屈曲回数は試験温度 23 >80 >-15 の順であったが、曲げひずみ量：0.22、屈曲速度：30 回/分のみが-15 が 80 よりも屈曲回数が多く標準偏差が 80 の 2 倍以上であった。

また-15 ではほぼ全数で破断部が先細るネッキングが起きていた。

試験温度によって屈曲回数が異なる原因については後述の考察で述べる。

表 4.5～表 4.10 に各試験条件に於ける破断部の観察結果を示す。

表 4.5 曲げひずみ量 0.22 30 回/分の破断部写真

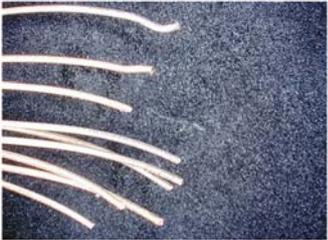
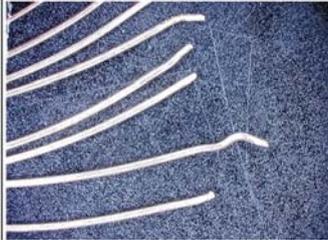
屈曲速度	30回/分	30回/分	30回/分
曲げひずみ量	0.22	0.22	0.22
平均屈曲回数	5614	3514	2458
ネッキング割合	20%	97%	27%
実験温度	23℃	-15℃	80℃
破断部 ×200倍率			
導体写真 ×35倍率			

表 4.6 曲げひずみ量 0.22 60 回/分の破断部写真

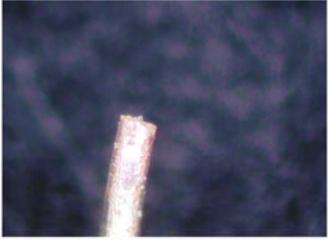
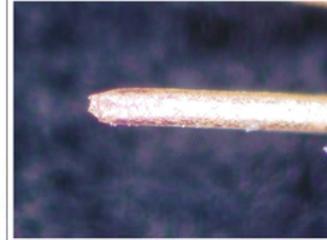
屈曲速度	60回/分	60回/分	60回/分
曲げひずみ量	0.22	0.22	0.22
平均屈曲回数	6107	2882	2951
ネッキング割合	13%	97%	23%
実験温度	23℃	-15℃	80℃
破断部 ×200倍率			
導体写真 ×35倍率			
所見	23	-15	80
曲げ ひずみ量 0.22	破断部が曲がっているものがある。 破断時には導体のみ切れ、被覆材は切れていない。 破断部の長手位置が同じ。	破断部の先端が曲がっているものが多い。 破断時には導体と被覆材が両方とも切れる。 破断部の長手位置が同じ。	破断部付近に金属微粉が付着している。 破断時には導体のみ切れ、被覆材は切れていない。 破断部の長手位置が同じ。

表 4.7 曲げひずみ量 0.11 30 回/分の破断面写真

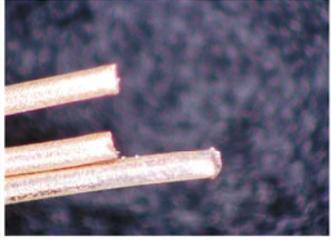
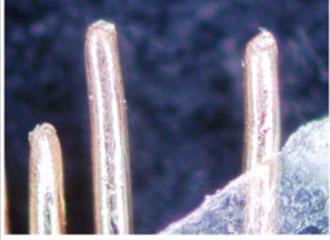
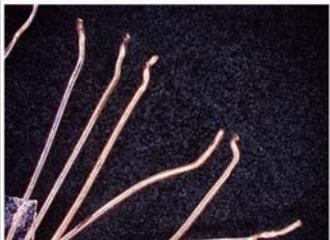
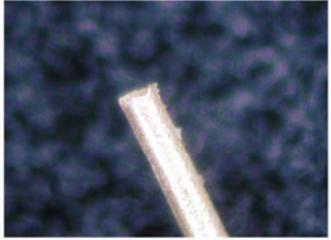
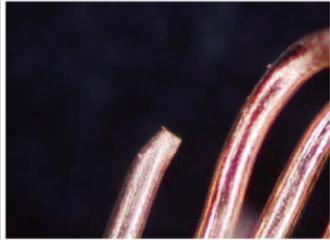
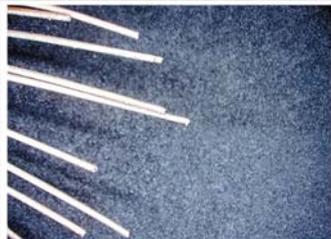
屈曲速度	30回/分	30回/分	30回/分
曲げひずみ量	0.11	0.11	0.11
平均屈曲回数	20979	6091	10498
ネッキング割合	3%	97%	13%
実験温度	23°C	-15°C	80°C
破断面 ×200倍率			
導体写真 ×35倍率			

表 4.8 曲げひずみ量 0.11 60 回/分の破断面写真

屈曲速度	60回/分	60回/分	60回/分
曲げひずみ量	0.11	0.11	0.11
平均屈曲回数	27438	7212	12715
ネッキング割合	3%	97%	10%
実験温度	23°C	-15°C	80°C
破断面 ×200倍率			
導体写真 ×35倍率			

所見	23	-15	80
<p>曲げ ひずみ量 0.11</p>	<p>先端が曲がっているものはない。</p> <p>屈曲部の被覆内部が黒ずんでいる。(銅粉?)</p> <p>破断時には導体のみ切れ、被覆材は切れていない。</p> <p>導体素線が 2mm くらいの棒状片に切れている。</p> <p>破断部の長手位置が同じ。</p>	<p>先端が曲がっているものが多い。</p> <p>屈曲部の被覆内部が黒ずんでいる。(銅粉?)</p> <p>破断時には導体と被覆材の両方とも切れる。</p> <p>短い棒状片の素線は見られない。</p> <p>破断部の長手位置が同じ。</p>	<p>先端が曲がっているものが見られる。</p> <p>破断部付近に金属微粉が付着している。(銅粉?)</p> <p>破断時には導体のみ切れ、被覆材は切れていない。</p> <p>短い棒状片の素線は見られない。</p> <p>破断部の長手位置が同じ。</p>

表 4.9 曲げひずみ量 0.06 30 回/分の破断面写真

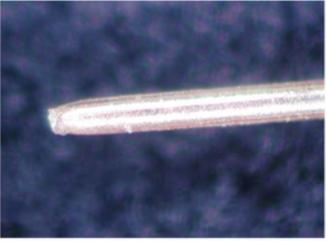
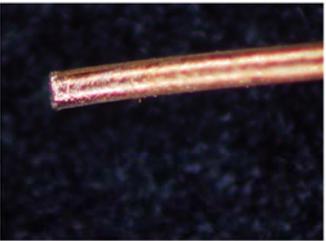
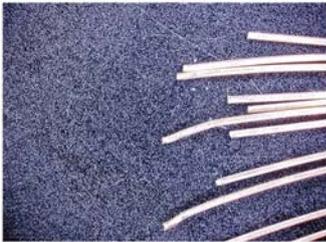
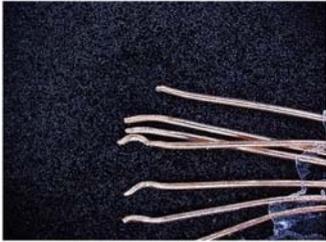
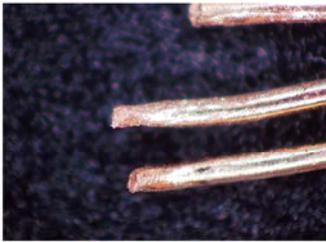
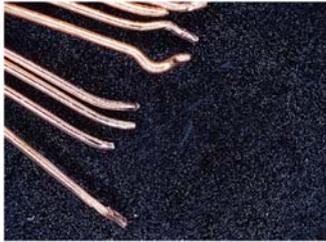
屈曲速度	30回/分	30回/分	30回/分
曲げひずみ量	0.06	0.06	0.06
平均屈曲回数	117648	19869	37820
ネッキング割合	3%	97%	7%
実験温度	23°C	-15°C	80°C
破断面部 ×200倍率			
導体写真 ×35倍率			

表 4.10 曲げひずみ量 0.06 60 回/分の破断面写真

屈曲速度	60回/分	60回/分	60回/分
曲げひずみ量	0.06	0.06	0.06
平均屈曲回数	94610	17384	39790
ネッキング割合	7%	100%	13%
実験温度	23°C	-15°C	80°C
破断面部 ×200倍率			
導体写真 ×35倍率			

所見	23	-15	80
曲げ ひずみ量 0.06	先端が曲がっているものはない。 破断時には導体のみ切れ、被覆材は切れていない。 導体素線が 2mm くらいの棒状片に切れている。 破断部の長手位置が同じ。	先端が曲がっているものが多い。 破断部付近には金属微粉が付着している。 破断時には導体と被覆材は両方とも切れる。 短い棒状片の素線は見られない。 破断部の長手位置が同じ。	先端が曲がっているものが見られる。 破断部付近に金属微粉が付着している。 破断時には導体のみ切れ、被覆材は切れていない。 短い棒状片の素線は見られない。 破断部の長手位置が同じ。

表 4.5～表 4.10 に示したように破断部の形態は、曲げひずみ量や屈曲速度に依らずほぼ同じ傾向であった。

試験温度 23 では素線 30 本のうち、ほぼ全ての素線が長手方向に対して垂直に切れており、素線のみが破断して被覆材が切れた電線はなかった。

試験温度 -15 ではほぼ全ての素線の破断部が先細りしており、素線と被覆材が双方とも破断した。また破断部先端が湾曲しているのが -15 だけに見られた。

試験温度 80 では素線の約 90% が長手方向に垂直に切れているが一部に先細りしている素線も確認された。屈曲によって破断したのは 23 と同様に素線のみであった。表 4.7 の 80、200 倍率のように破断面の端がカップ状に盛り上がったものが素線の 30% 未満で確認された。

4.2.2 曲げひずみ量の影響

各曲げひずみ量に於ける屈曲試験結果を表 4.11、4.12 に示す。

表 4.11 屈曲回数とネッキング本数の割合 (屈曲速度 30 回/分)

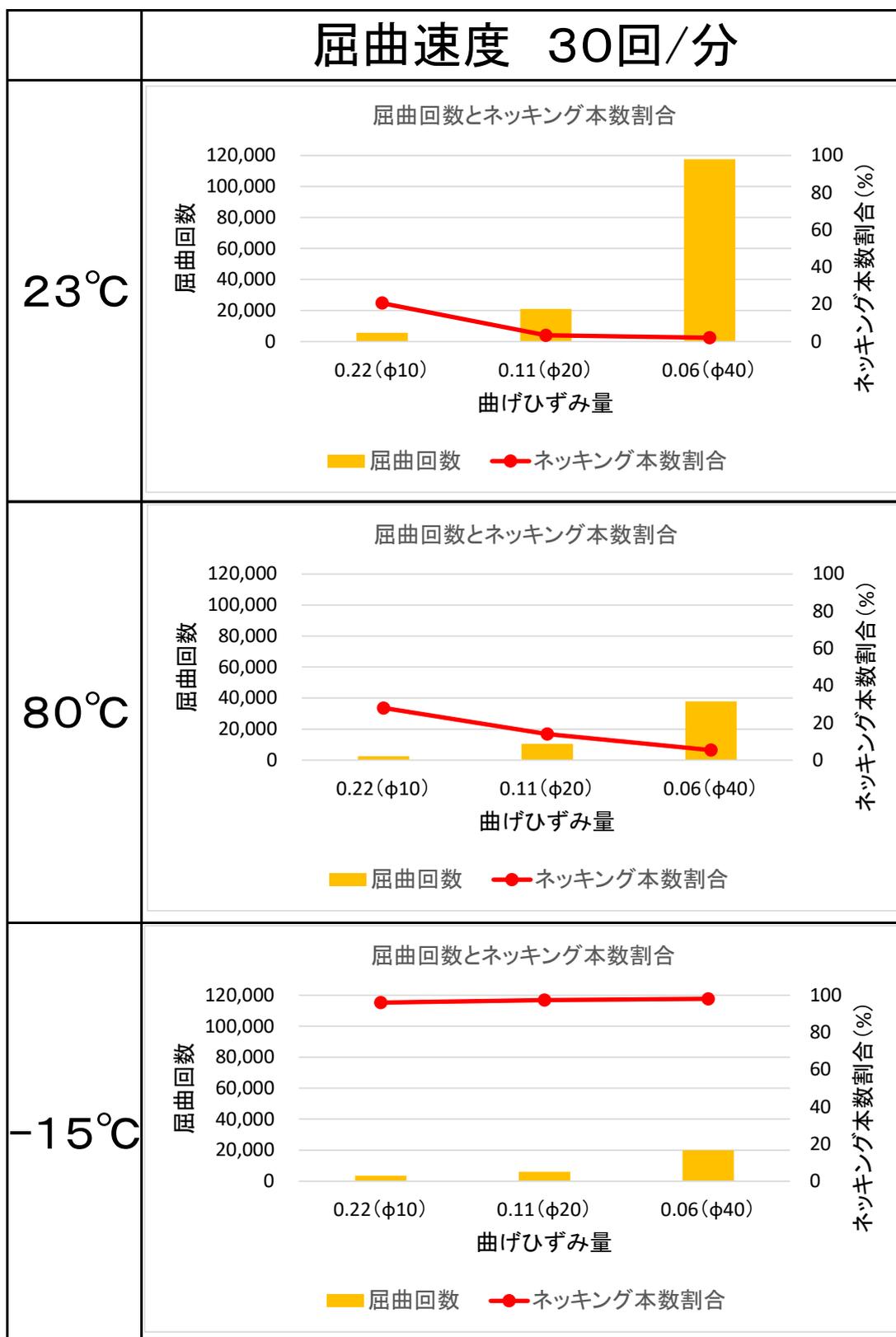
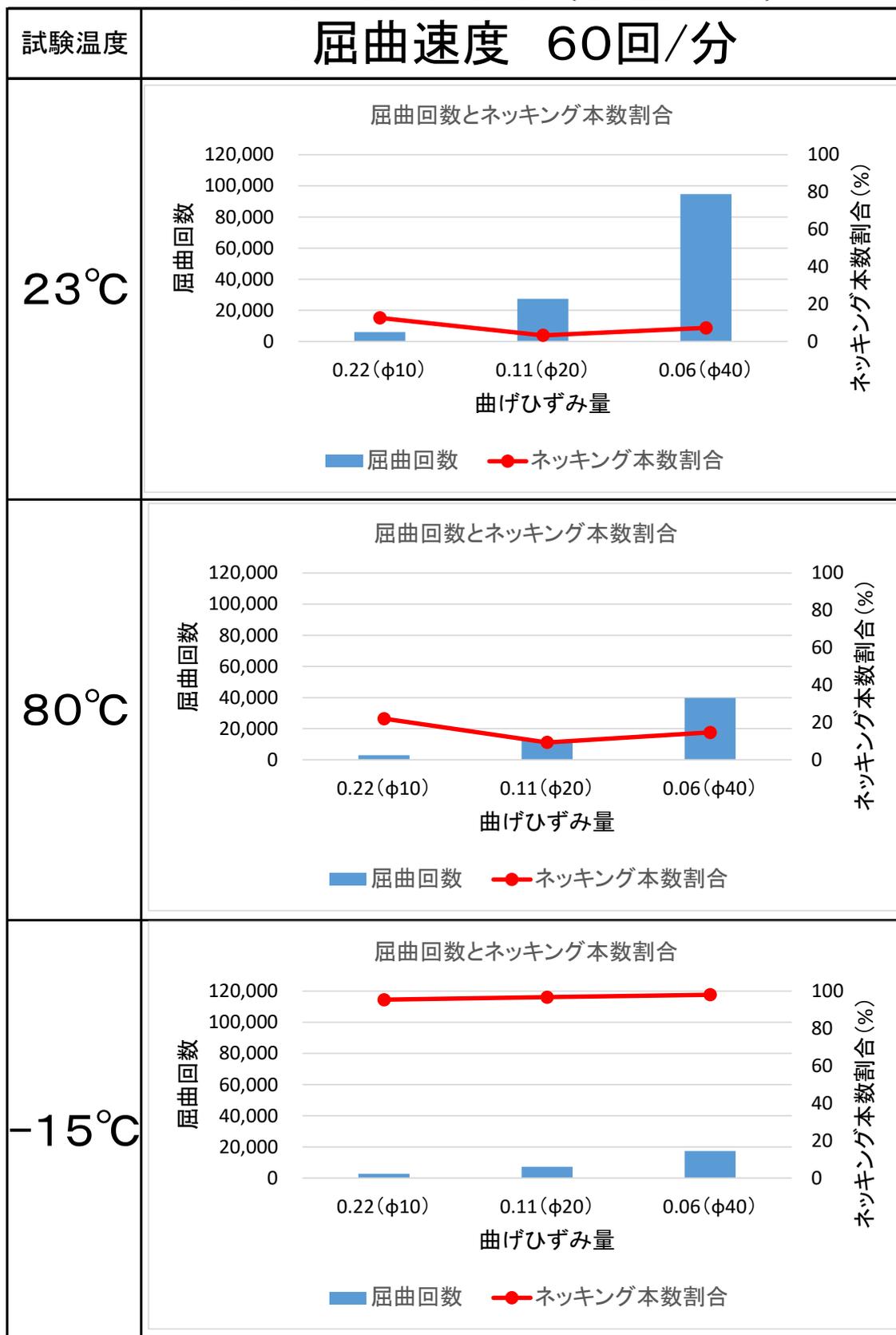


表 4.12 屈曲回数とネッキング本数の割合（屈曲速度 60 回/分）



試験温度、屈曲速度に依らず曲げひずみ量が小さいと屈曲回数が多く、ネッキング本数の割合は曲げひずみ量に依らずほぼ同じであった。

屈曲速度の影響

各屈曲速度に於ける屈曲試験結果を表 4.13 ~ 表 4.15 に示す。

表 4.13 屈曲回数とネッキング本数の割合 (曲げひずみ量 : 0.22)

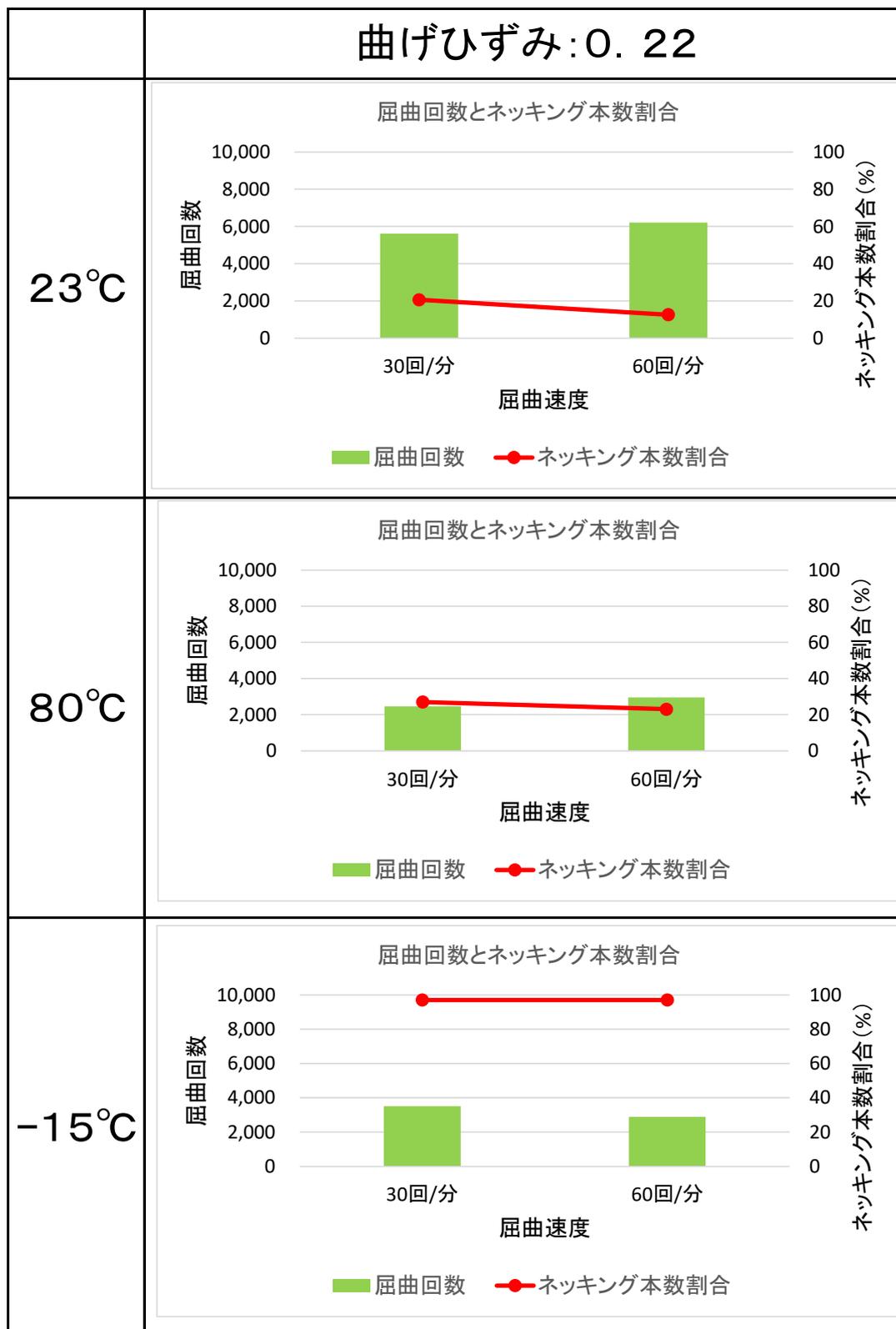


表 4.14 屈曲回数とネッキング本数の割合（曲げひずみ量：0.11）

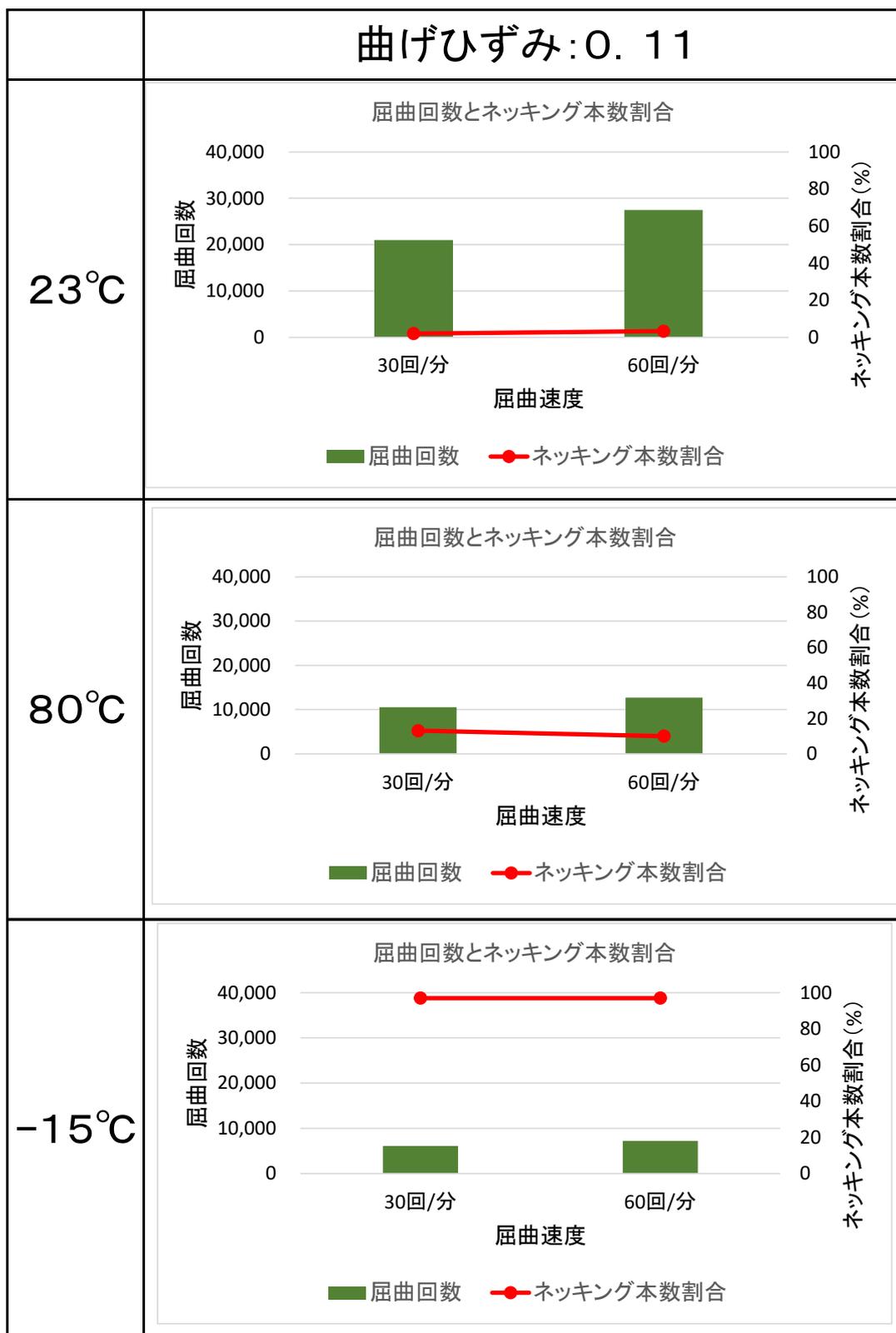
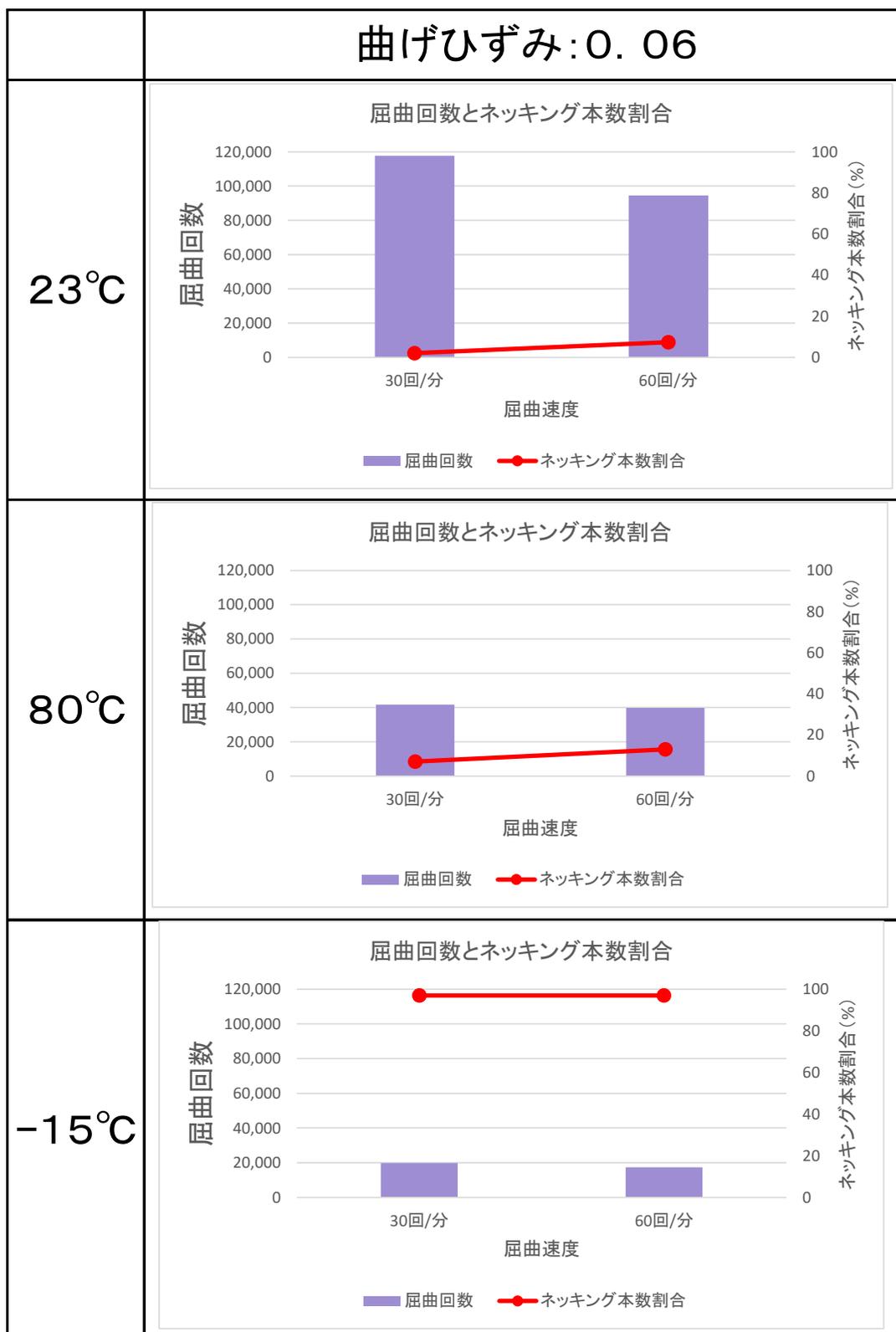


表 4.15 屈曲回数とネッキング本数の割合 (曲げひずみ量 : 0.06)

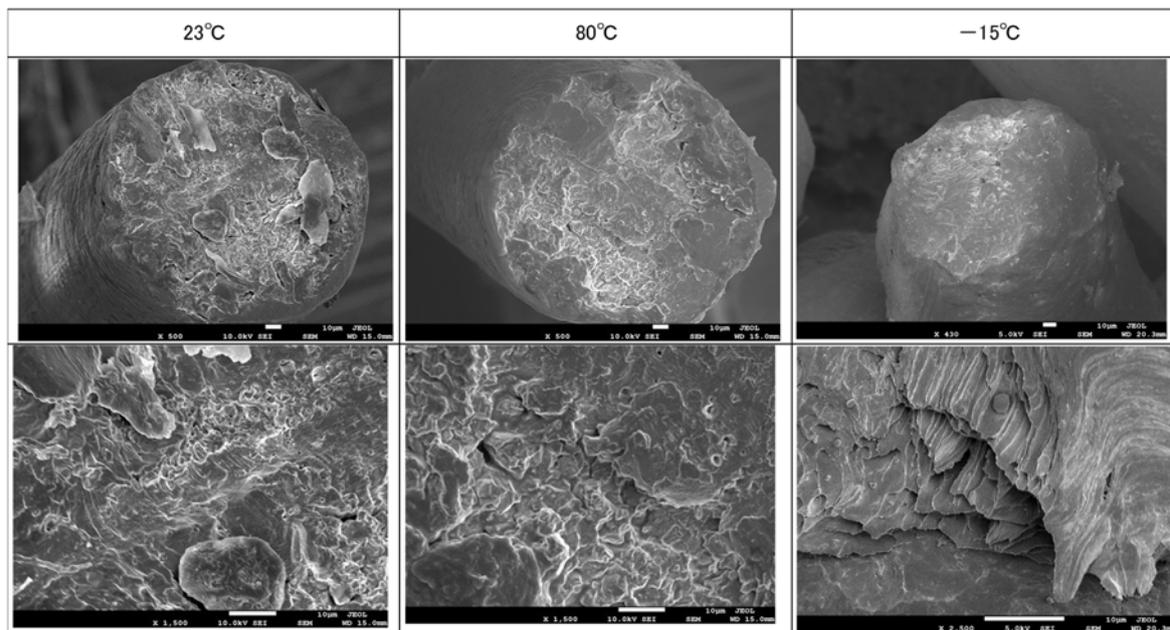


今回の試験条件の範囲では、屈曲回数とネッキング本数の割合に対する屈曲速度の影響は見られなかった。

全屈曲試験を通して被覆材と導体が共に破断に至ったのは試験温度 - 15 の試料だけであり、導体が破断した後に被覆材が破断した。

表 4.16 に各試験温度での破断面の観察結果を示す。

表 4.16 各試験温度での破断面 S E M 写真



試験温度 23、80 ではうろこ状の薄片が重なったような断面であるが、-15 は表面が滑らかで一部は引っ張られたような痕が見られた。

4.2.3 まとめ

本調査では曲げひずみ量、試験温度、屈曲速度が屈曲特性に与える影響を調査した。直径の異なる 3 種類のマンドレルを用いて屈曲試験を実施した結果、屈曲回数は $10^3 \sim 10^5$ 回、最大で 10^5 回程度であったことから低サイクル疲労である。

低サイクル疲労のひずみ振幅と疲労寿命の関係は Coffin Manson 則とよばれる実験式(1)に従うとされている。

$$\varepsilon_p = C_p N_f^{-\alpha} \quad (1)$$

ここで ε_p はひずみ振幅、 N は破断までの回数、 C_p および α は材料の疲労特性を示す材料固有の定数である。

これを破断までの回数 N を求める式に変形すると(2)式になる。

$$N_f = \left\{ \frac{\varepsilon_p}{C_p} \right\}^{-\frac{1}{\alpha}} \quad (2)$$

屈曲試験結果から C_p および α を求めることができる。

縦軸に塑性ひずみ振幅、横軸に破断に至るまでの屈曲回数をとった疲労曲線を図 4.1 に示す。

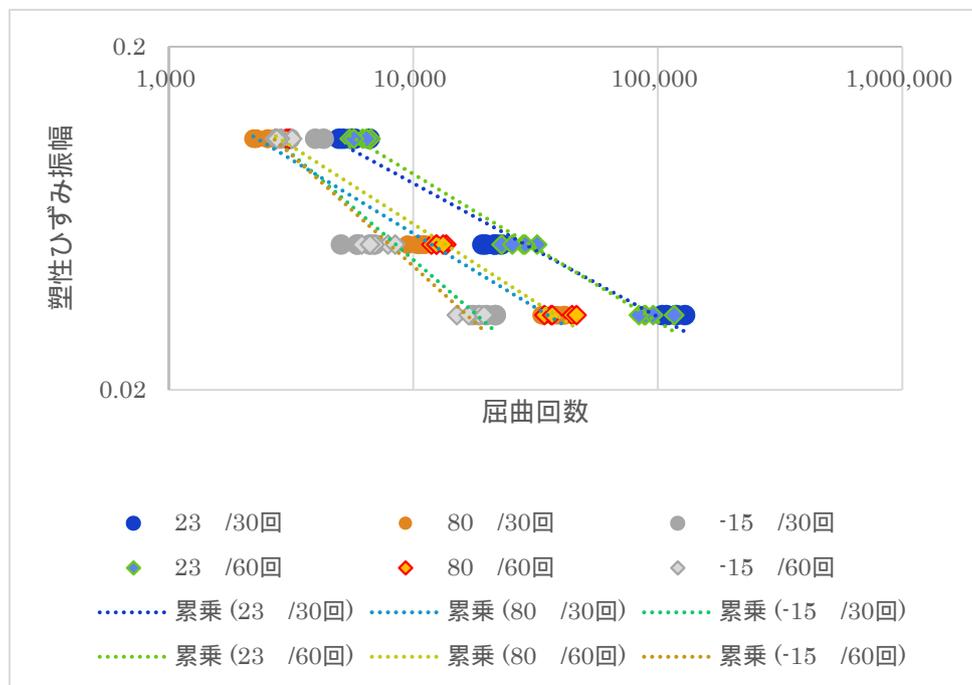


図 4.1 各屈曲速度、試験温度における疲労曲線

式 (1) と図 4.2 に示した近似式から α を求めると屈曲速度によらず各温度では下記の値であった。

$$\begin{aligned} -15 & \dots = 0.6 \\ 23 & \dots = 0.4 \\ 80 & \dots = 0.4 \end{aligned}$$

今回得られた定数と式 (2) を使えば、この電線で曲げひずみ量を変えた時に概算での屈曲回数を算出できる。通常定数 α は材料固有の値と言われているが、今回の試験では試験温度 15 は 23、80 と異なる値になった。

4.2.4 考察

本試験で試験温度によって屈曲回数に違いが見られた。屈曲回数には被覆材と導体の特性が影響を及ぼすと考えられるため、それぞれについて調査した。

4.2.5.1 被覆材の影響

被覆材の影響を知るために、マンドレルに接触する部分の被覆材を除去して導体を露出させた試料と通常（被覆材有り）の電線の屈曲特性を比較した。

試験条件：曲げひずみ量：0.12、荷重：100 g、屈曲角度：180°

屈曲速度：30 回/分、試験温度：23

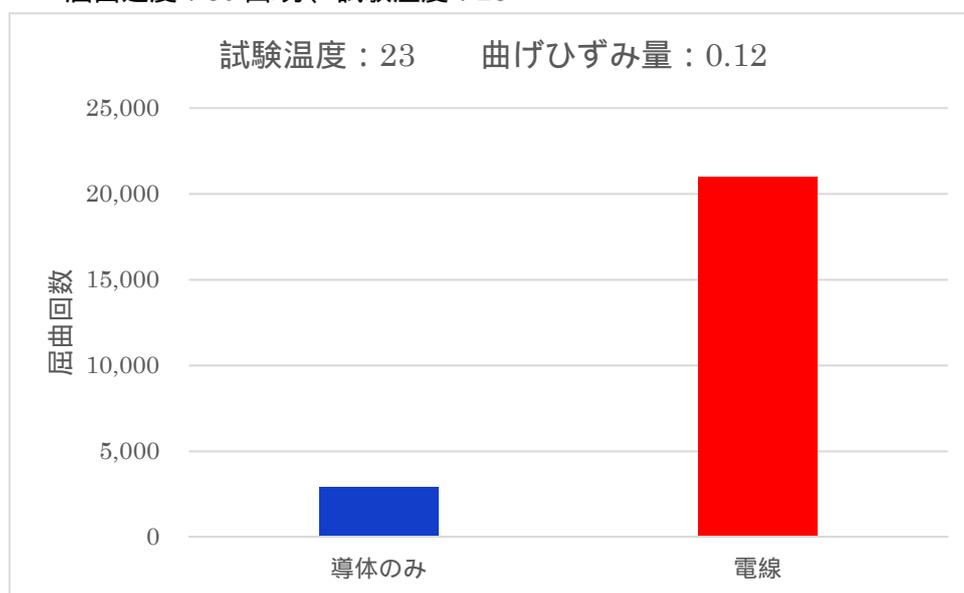


図 4.2 被覆材の有無による屈曲回数への影響

同じ試験条件でも被覆材の有/無によって屈曲回数が大きく異なることから、被覆材が屈曲特性に大きな影響を及ぼしていると考えられる。

屈曲試験した電線の被覆材（PVC）の機械的特性の温度依存性について調査した結果を図 4.3 に示す。本試験の曲げひずみ量と等価な伸びひずみ量に相当するストローク量を点線で示した。引張条件は以下の通りである。

引張試料：被覆材のみの管状試験片

チャック間距離：20mm

引張速度：50mm/ min

試験温度：23 , -15 , 80

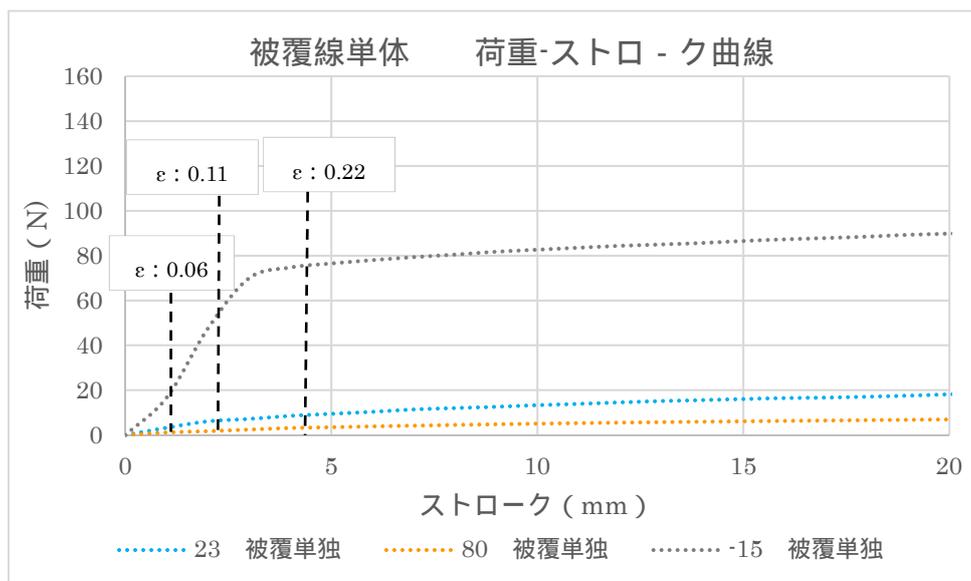


図 4.3 被覆材の引張特性の温度依存性

試験温度 23、80 の荷重-ストローク曲線には明確な降伏点を確認できず、ひずみ量：0.06、0.11、0.22 のいずれでも被覆材は破断することなく十分に追従すると考えられる。

ただし試験温度-15 場合は降伏ひずみ量が $\epsilon = 0.15$ (ストローク量 3mm) 程度であることから、ひずみ量：0.22 では $\epsilon = 0.05$ (ストローク量 1mm) の塑性ひずみが発生すると考えられる。

4.2.5.2 導体強度の影響

被覆材と同様に各温度で導体の引張試験を実施した。撚り線では均一な引張試験が難しいため、試験片に直径 0.65 mm のタフピッチ軟銅線を使用した。各試験温度における引張強度、破断伸び、ヤング率を図 4.4、4.5 に示す。引張条件は下記の通りである。

引張試料： 直径 0.65 mm タフピッチ軟銅線
 チャック間距離： 20mm
 引張速度： 50mm/min
 試験温度： 23、-15、80 の各温度

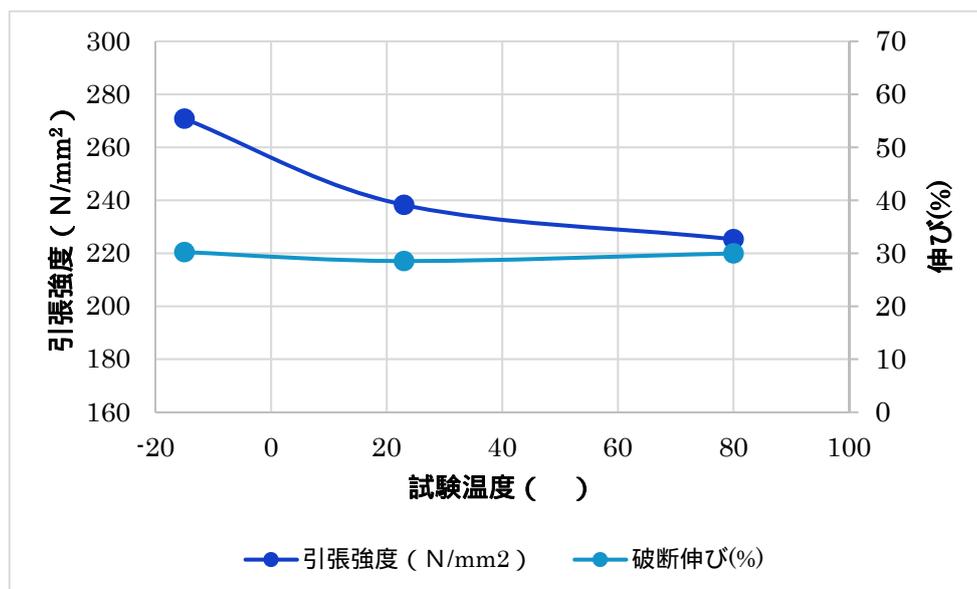


図 4.4 引張強度温度依存性 (0.65 mmタフピッチ軟銅線)

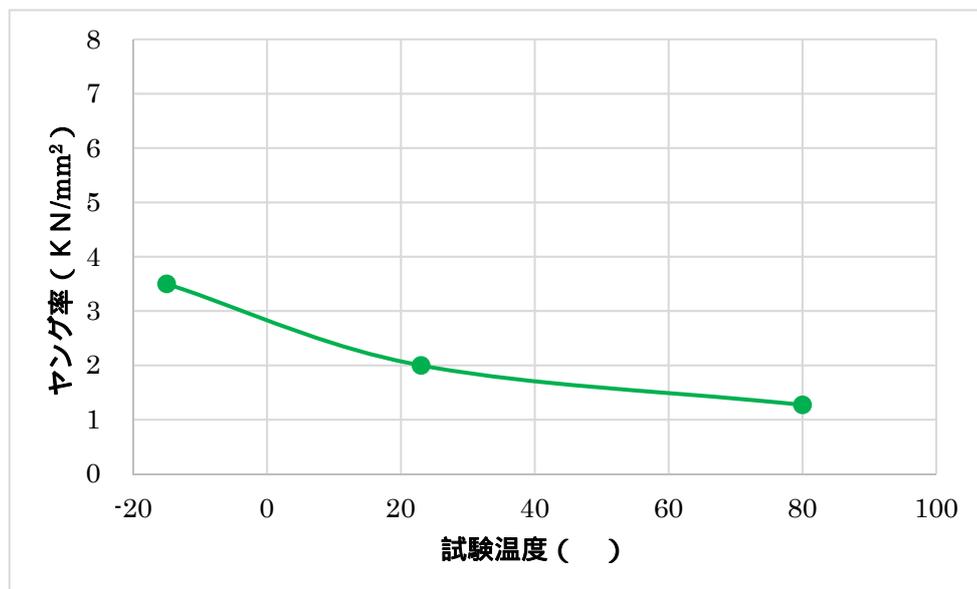


図 4.5 ヤング率の温度依存性 (0.65 mmタフピッチ軟銅線)

この結果より試験温度によって導体の引張強度とヤング率が異なり、特に-15 °Cでは導体の引張強度が12%程度高い(硬化)ことが分かった。

4.2.5.3 導体抵抗の変化

本試験では導体抵抗が3 Ωを越えた時に全断線と判断して屈曲試験が終了するように設定している。各試験温度における屈曲試験中の導体抵抗の変化を図4.6から図4.8に示す。尚、試験条件は以下の通りである。

試験条件：曲げひずみ量：0.06、荷重：100 g、屈曲角度：180 °

屈曲速度：60 回/分、試験温度：23 °C

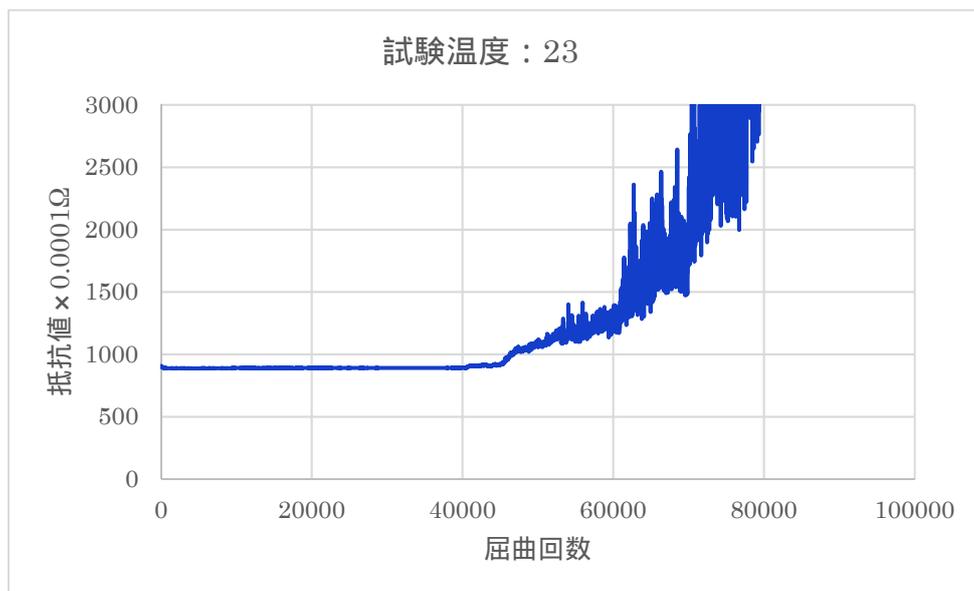


図 4.6 23 での導体抵抗の変動

試験温度 23 では 45,000 回付近から導体抵抗の変動が始まり 83,000 回で破断に至った。

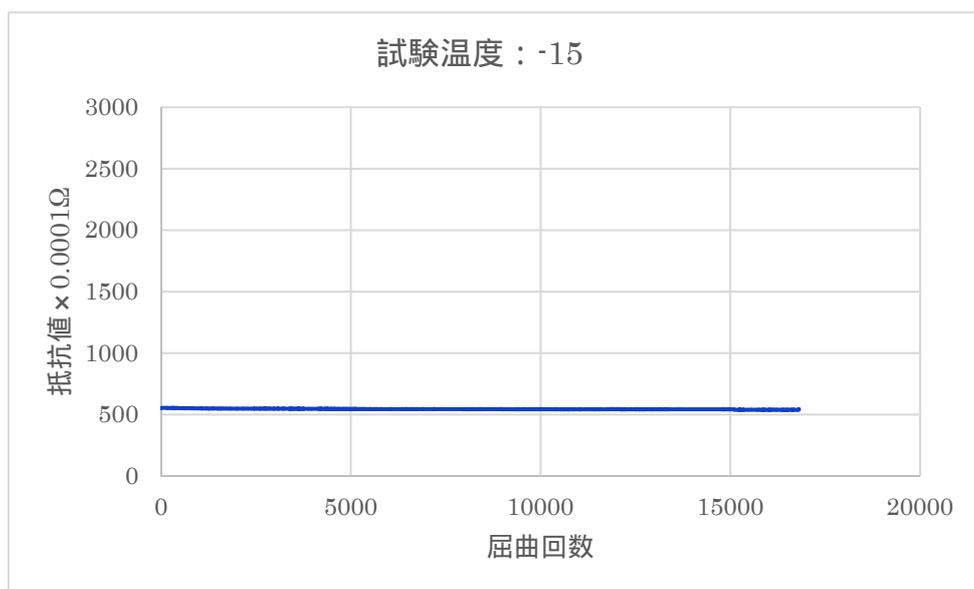


図 4.7 -15 での導体抵抗の変動

試験温度-15 では屈曲試験中には導体抵抗の増加はほとんど見られず、破断の直前に急激に増大した。このことから、-15 では 30 本の素線が比較的まとまって同じタイミングに切れたものと推測できる。

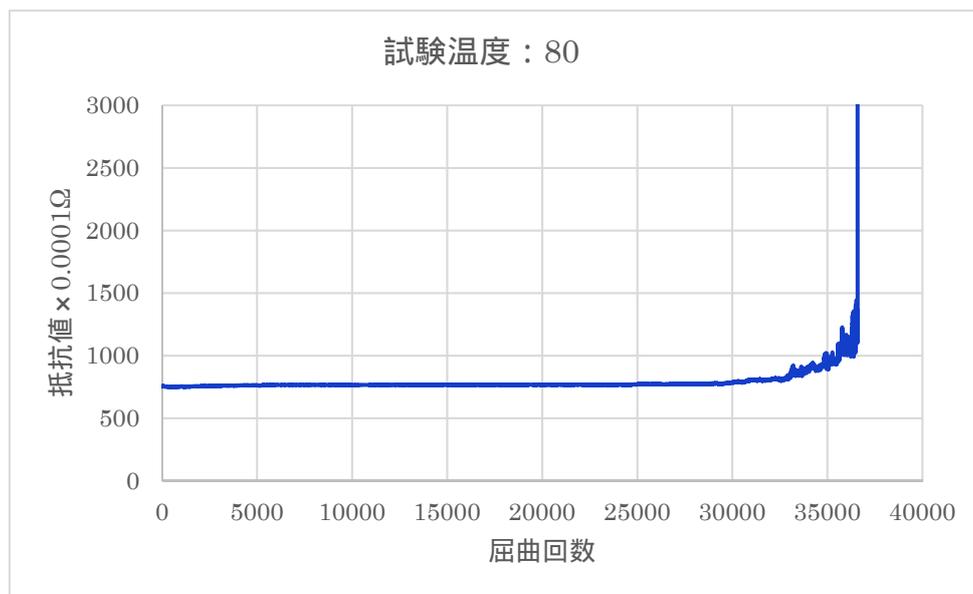


図 4.8 80 での導体抵抗の変動

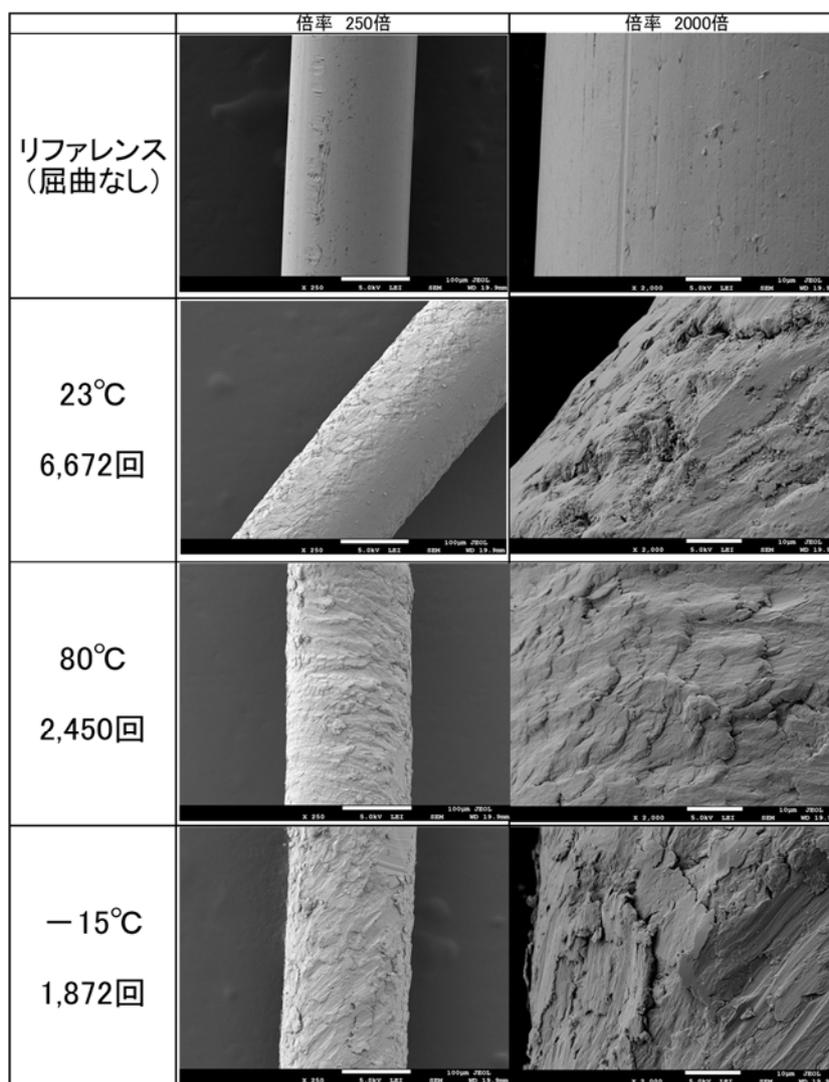
試験温度 80 では 33,000 回付近から少しずつ導体抵抗値が増加し、38,000 回で破断している。

試験温度 23、80 は被覆材が破断せず導体だけが破断したが、-15 は導体が破断した後に錘が被覆材のみにかかったために被覆材も破断に至るといった違いが見られた。

4.2.5.4 導体の表面観察結果

各試験温度で破断に至る寸前の導体表面状態の観察を行った。予め 23、80、-15 で屈曲試験を実施して試験温度毎の破断回数を調査した上で、各破断回数よりもやや少ない屈曲回数で試験を終了させて破断寸前と思われる試料を作製した。これらの SEM 観察結果を表 4.17 に示す。

表 4.17 破断寸前の試料観察結果



SEM 写真から屈曲方向とは異なる斜めのうろこ状の皺が見られ、試験温度 23 の表面に比べて、80 、 - 15 は皺が立体的に重なっているように見える。このうろこ状の皺は素線同士が揉まれて擦れた際に発生したように見える。

さらに試験温度毎の表面状態の違いを明らかにするために、屈曲回数 1000 回、2000 回の導体表面を観察した結果を表 4.18 に示す。

表 4.18 屈曲回数 1000,1500,2000 回の素線外観確認 (倍率 250 倍)

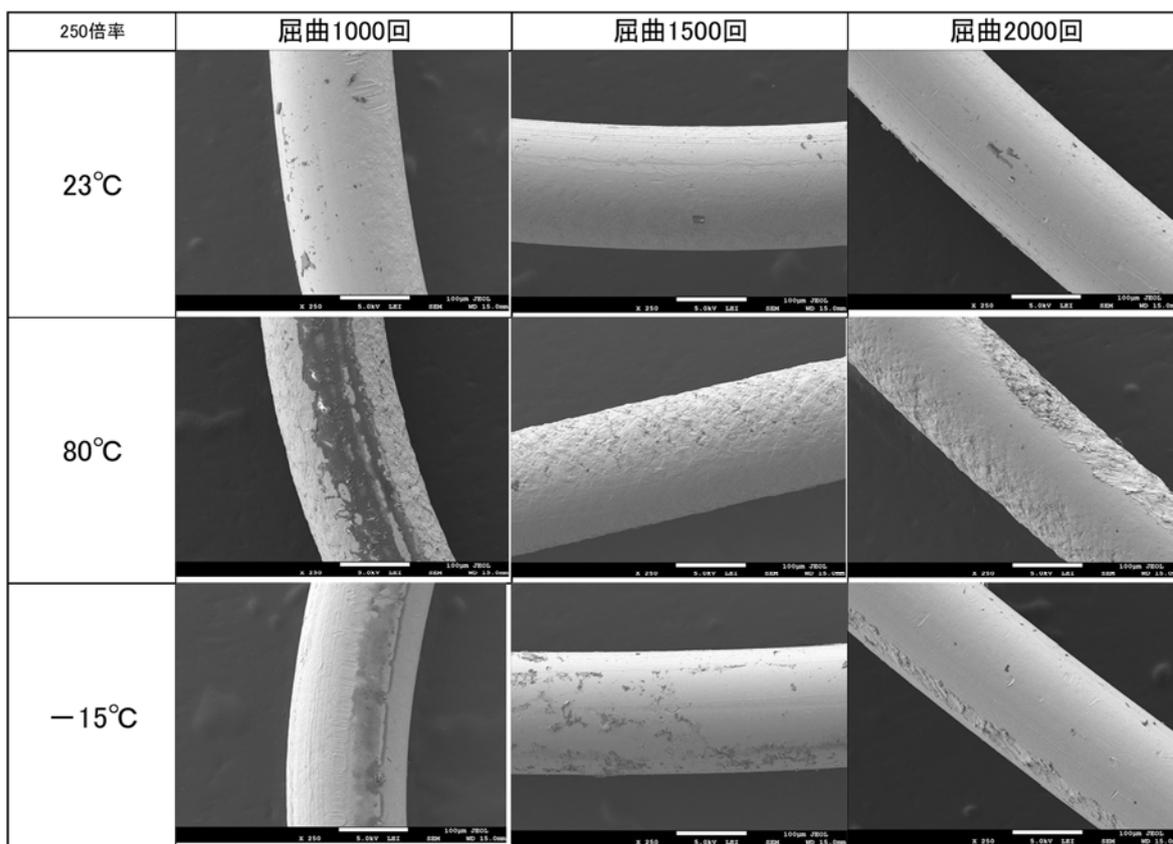
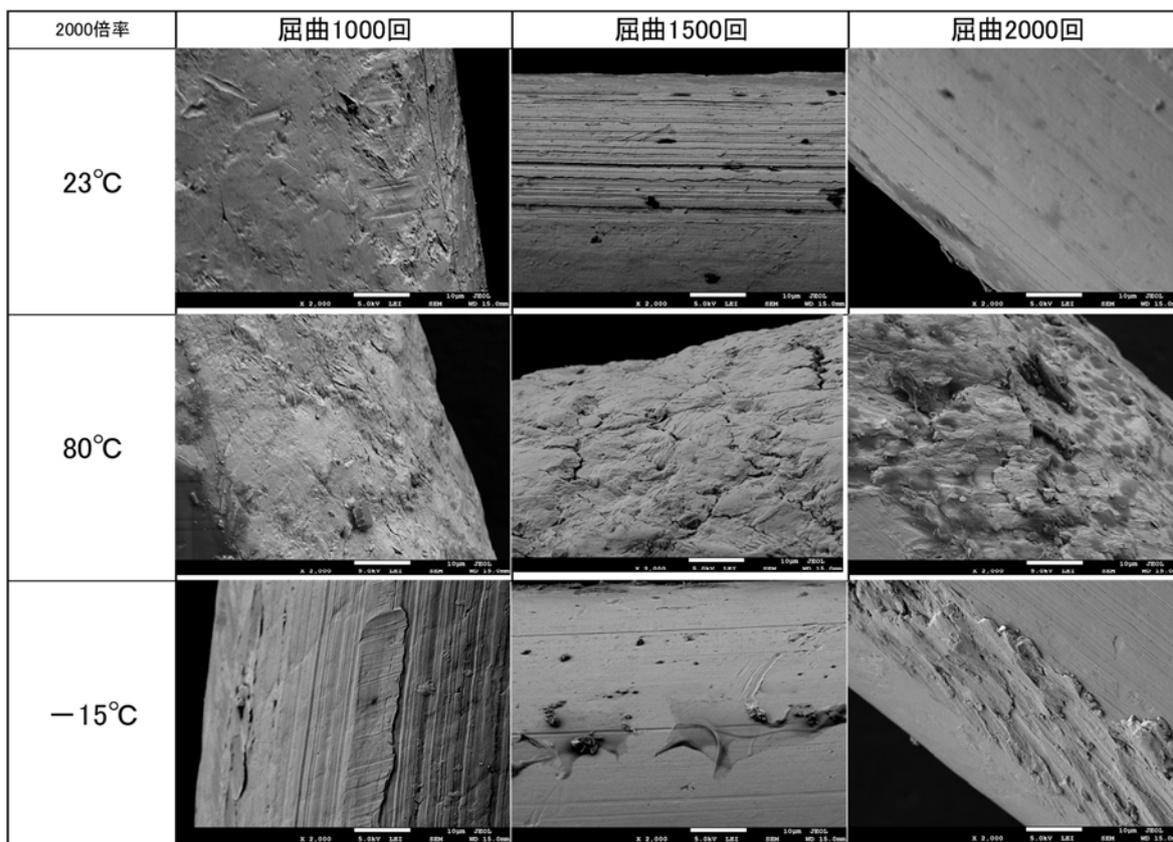


表 4.19 屈曲回数 1000,1500,2000 回の素線外観確認 (倍率 2000 倍)



破断に至る屈曲回数は、試験温度 23 は 6100 回、80 と -15 は 2900 回程度であった。

試験温度 23 と 80 を比較すると、23 は 2000 回で素線側面に縞模様がわずかに見られる程度であるのに対して、80 では 1000 回で素線側面に明瞭な皺模様が見られており、屈曲回数が増えると皺が立体的になっている。この模様は他の素線と擦れて摩耗によってできたものと考えられ、80 では 23 と比較して導体が軟らかいために擦れによる縞模様が明確に表れていると考えられる。また、-15 の縞模様は 80 よりも軽微であった。

したがって試験温度によって導体強度と摩耗の進行度合いが異なるために、屈曲回数が異なると考えられる。

4.2.5.5 単線の屈曲試験

銅線の単純な疲労形態を知るために常温で5連屈曲試験機を用いてタフピッチ軟銅線(直径0.65 mm単線)の屈曲試験を実施した。

試験装置：5連屈曲試験装置

試験条件：曲げひずみ量：0.07、荷重：100 g、屈曲角度：135°

屈曲速度：30 回/分、試験温度：23

屈曲回数は $n=3$ の平均で74回であった。

図4.9に破断面のSEM写真、図4.10に側面のSEM写真を示す。破断面にはディンプルが観察され、側面には屈曲方向に対して約45°の亀裂が多数見られた。これらのことから単線は繰り返し曲げによる疲労により破断したと考えられ、4.2.5.4項に示した被覆有電線の素線破断側面の形態とは異なっていることから両者は破断に至るメカニズムが異なると考えられる。

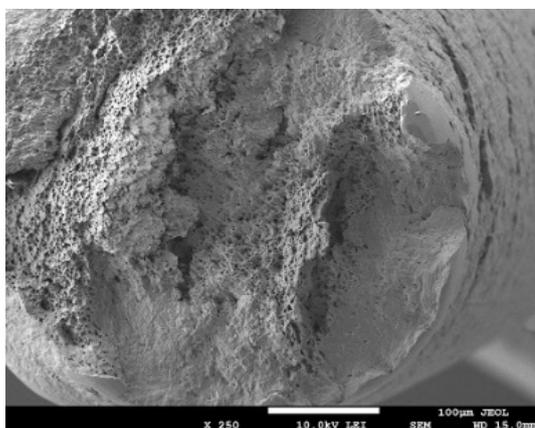


図 4.9 直径 0.65 mm単線の破断面

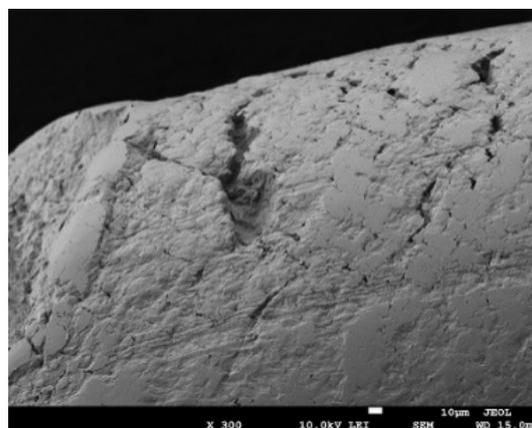


図 4.10 直径 0.65 mm単線の破断部近傍の側面

4.2.5.6 導体の影響(被覆除去試料の屈曲試験)

4.2.5.5 で被覆なしの単線と被覆有りの撚り線(電線)とでは破断状態が異なることが分かった。そこで被覆無し撚線と電線(被覆有り)の違いを確認するために、マンドレルと接触する部位の被覆を除去した試料の屈曲試験を実施した。

試験条件：曲げひずみ量：0.12,0.06、荷重：100 g、屈曲角度：180°

屈曲速度：30 回/分、試験温度：23

試験温度毎の屈曲回数を図 4.11、4.12、表 4.20 に示す。

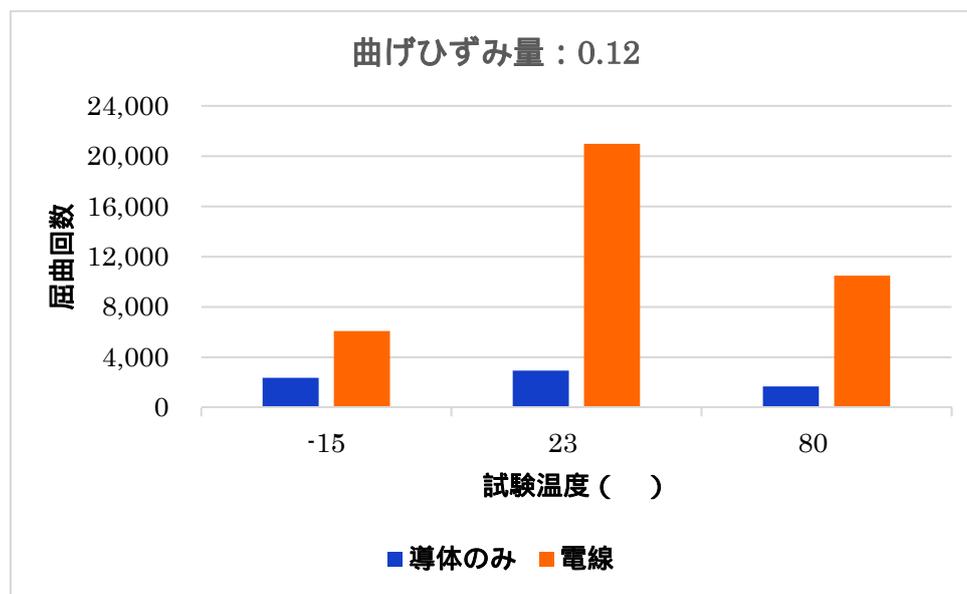


図 4.11 曲げひずみ量 0.12 の時の温度別の屈曲回数

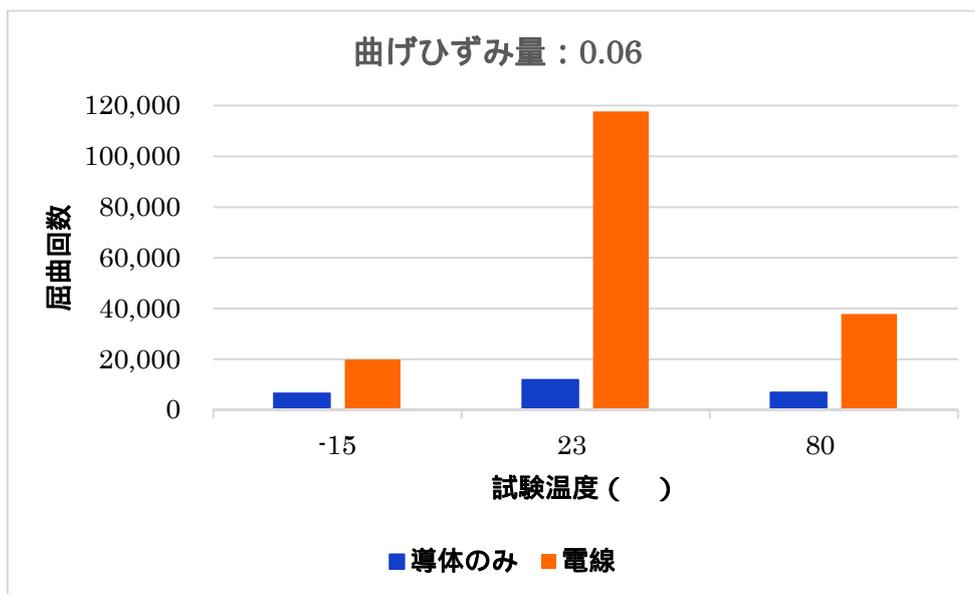


図 4.12 曲げひずみ量 0.06 の時の温度別の屈曲回数

表 4.20 被覆材有無による屈曲回数の比較

曲げひずみ量		-15°C	23°C	80°C
導体のみ	0.12	2,368	2,942	1,682
電線	0.11	6,091	20,979	10,498
		38.9%	14.0%	16.0%
導体のみ	0.06	6,476	11,831	6,823
電線	0.06	19,869	117,648	37,820
		32.6%	10.1%	18.0%

電線（被覆材有り）の屈曲回数に対する導体のみ（被覆材無し）の屈曲回数の割合は、試験温度 23 と 80 が 10% 台であるのに対して、試験温度-15 は 30% 台であり被覆材の影響が少ない。このことから、試験温度-15 の屈曲回数が他の試験温度と比較して少ない理由として導体の温度特性の影響が大きいと考えられる。

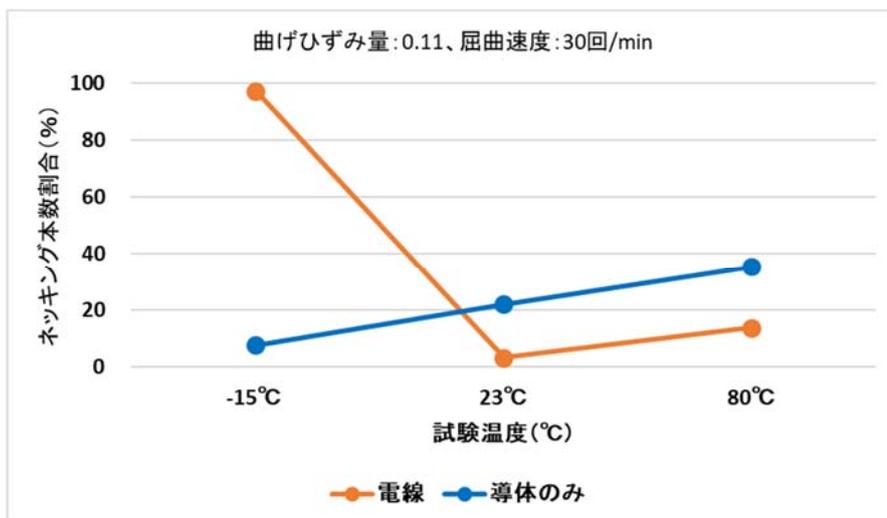


図 4.13 曲げひずみ量 0.11 の屈曲回数とネッキング割合

図 4.13 に被覆材除去、曲げひずみ量：0.12 での試験温度毎のネッキング本数割合を示す。被覆材有り（電線）の屈曲試験では、ネッキング本数割合は-15 で 100%であったが、被覆除去試料では 10%未満となった。

被覆材有り（電線）試験温度-15 のネッキング（先細り）部の表面は、表 4.17 破断寸前の試料観察結果に示したように素線同士が擦れてうろこ状であったことから、ネッキング（先細り）は、素線同士が擦れて局部的に線径が細くなったものと考えられる。

被覆材有り、試験温度：-15 でネッキング本数割合が高い理由は、低温で導体と被覆材が硬化し、硬化した被覆材で周囲を拘束された状態で硬化した導体が曲げと曲げ戻しされ導体同士が擦れるために導体が細くなり破断に至ったと考えられる。これに対して被覆除去試料は、被覆材による周囲の拘束が無いために曲げと曲げ戻しされた際に撚りが崩れて素線同士が擦れにくくネッキング（先細り）が発生し難かったと考えられる。

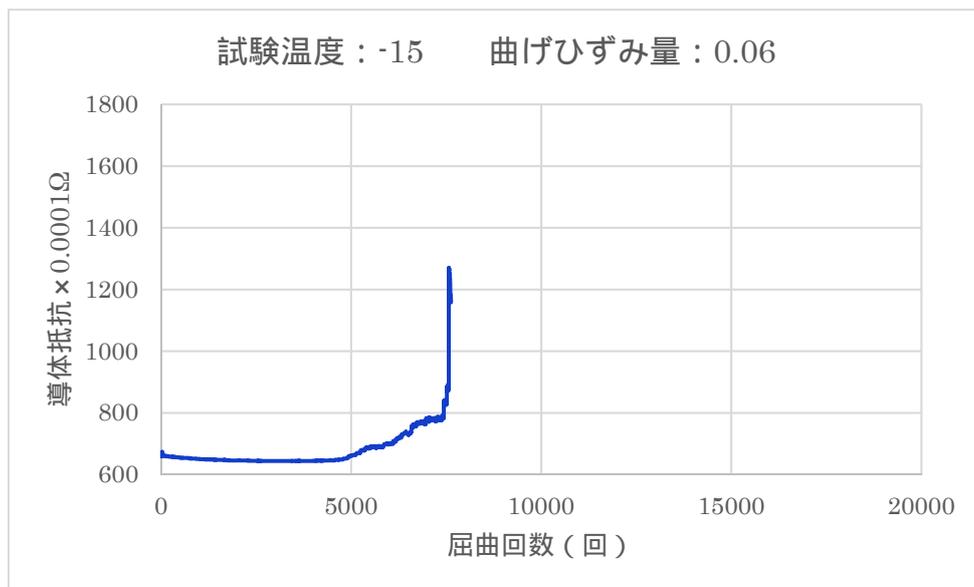


図 4.14 (a) -15 での屈曲試験時の導体抵抗の推移



図 4.14 (b) 23 での屈曲試験時の導体抵抗の推移

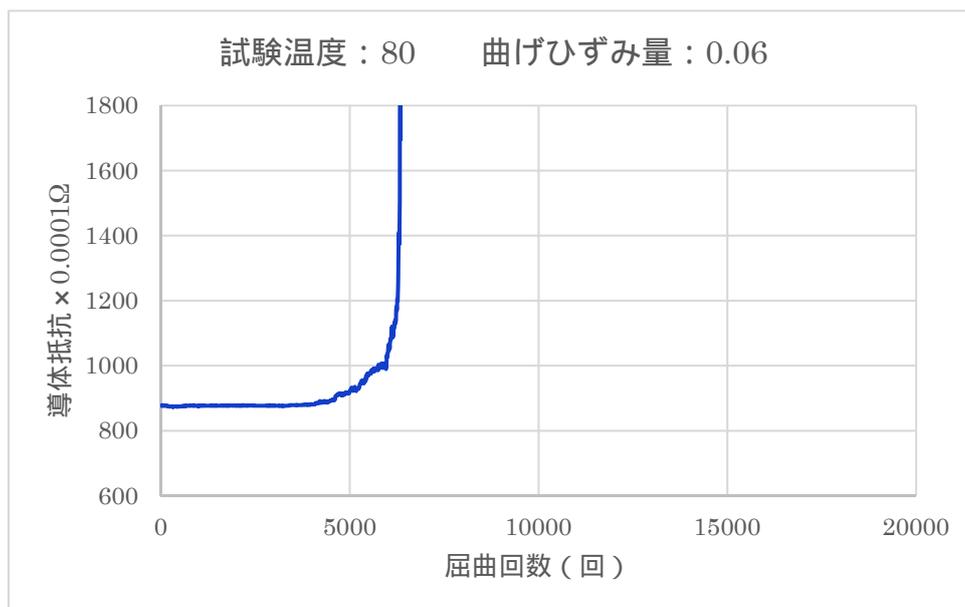


図 4.14 (c) 80 での屈曲試験時の導体抵抗の推移

電線屈曲試験中の導体抵抗推移 (図 4.8) に示した様に、被覆有り (電線) 試験温度 : -15 では屈曲試験中に導体抵抗の変化は見られず、突然導体抵抗が高くなり破断した。これに対して図 4.15(a)に示す被覆材除去試料の屈曲試験時の導体抵抗推移は、試験温度 : -15 の場合も破断前から徐々に導体抵抗が上がっている。

これらのことから被覆材の有/無によって破断のメカニズムが異なると考えられる。

被覆材除去試料の破断面 SEM 写真を表 4.21 に示す。

被覆材除去試料の破断面は、矢印で示したように亀裂は 2 方面から進展し、最後に両方の亀裂に挟まれた所で破断したと考えられる。また、亀裂内にはストライエーションが確認された。この形態は表 4.16 に示した被覆有（電線）の破断面とは形態が異なっており、このことから被覆ありと無しでは破断メカニズムが異なることが分かる。

表 4.21 各温度での被覆材除去試料の破断面

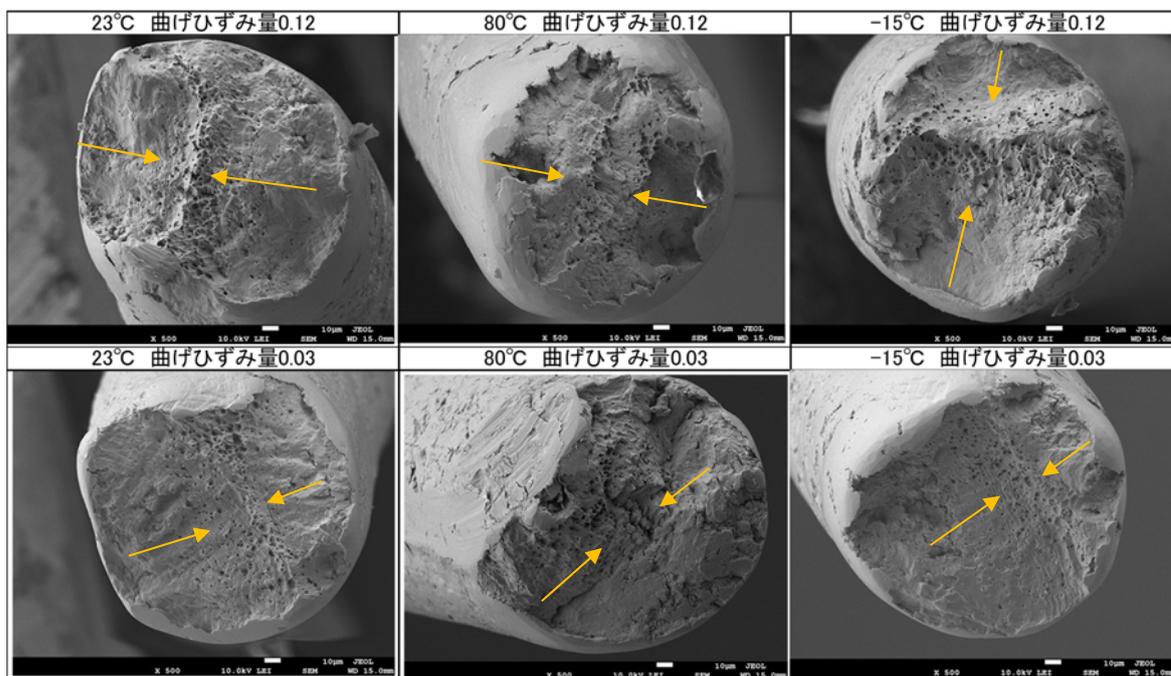
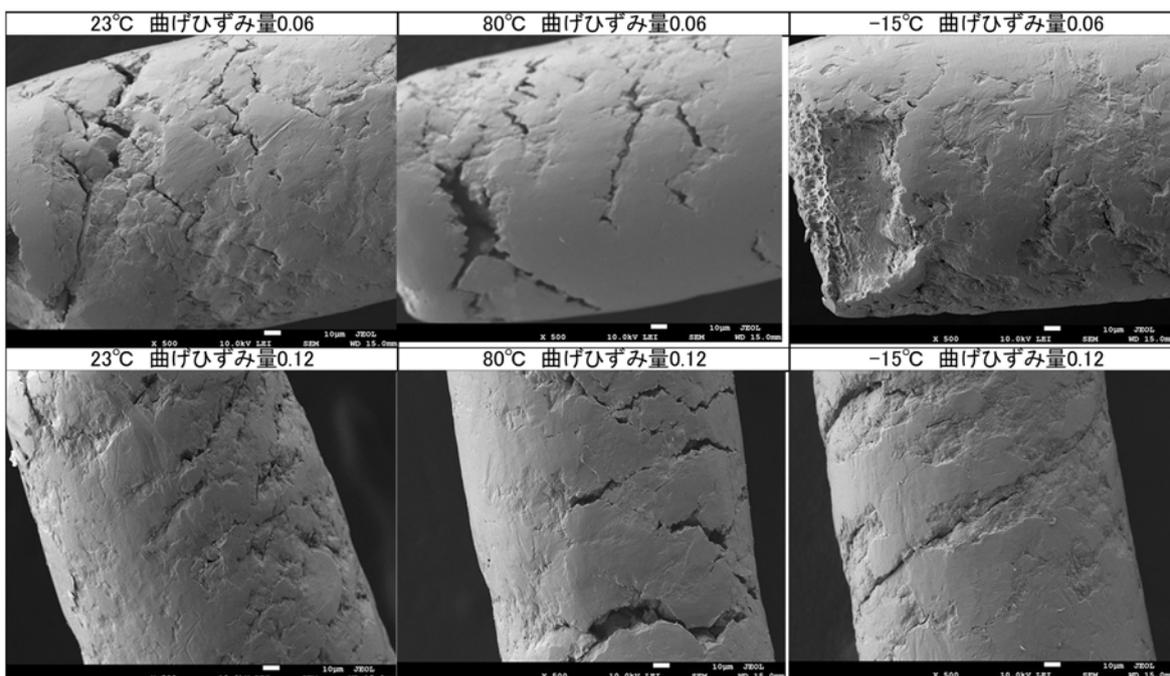


表 4.22 各温度での被覆材除去試料の破断面近傍の側面



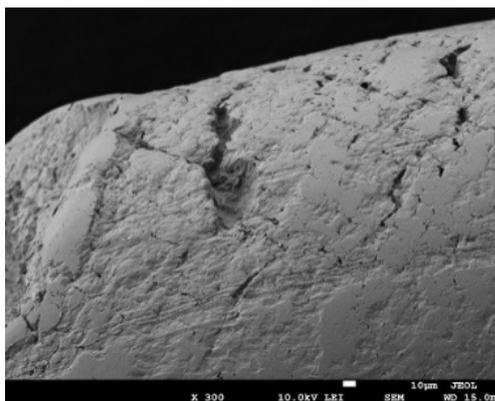


図 4.10 直径 0.65 mm 単線の破断部近傍の側面

被覆材除去試料の破断側面は単線の破断側面写真（図 4.11）と同じように屈曲方向に対して 45° 方向の亀裂が多く見られ、小さな亀裂が屈曲によって大きな亀裂に発展していったと考えられる。

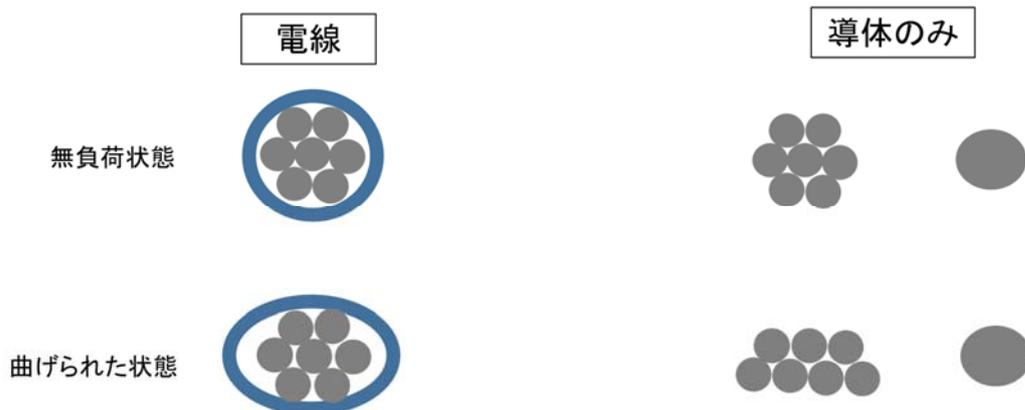


図 5. 被覆材の有無による違い

試験温度や被覆材の有無によって屈曲回数と破断の形態が異なる原因について考察する。

図 5 に示すように、被覆された電線が曲げられた場合には、導体である撚り線は被覆材によって周りを拘束されているために、撚りの崩れは少なく素線の長手方向の伸びひずみの差が生じて素線同士が擦れて凝着摩耗を起こした部位が細くなり破断に至ったと考えられる。特に試験温度が低い場合には、被覆材が硬化するために曲げによる被覆材の変形が更に小さく素線の拘束が強くなることから、素線同士の擦れが強くなり屈曲回数が少なくなったと考えられる。また試験温度が高温の場合には、素線の強度低下と素線同士の凝着摩耗の促進によって屈曲回数が少なくなったと考えられる。

一方で被覆材が無い導体のみを曲げた場合には、導体の周囲に拘束が無いために撚りが崩れ素線同士の長手方向の伸びひずみの差は小さく素線同士の擦れは小さいために、繰り返しの曲げひずみによって疲労破壊したと考えられる。

5 総まとめ

第 2 章では本試験用の電線の押出製造とその出来栄え評価結果を報告した。

第 3 章では適正な屈曲試験条件を決めたプロセスを報告した。

第 4 章では試験計画と屈曲試験結果および考察を報告した。

試験温度は屈曲特性に大きな影響を与えることや、ひずみ振幅と屈曲回数は Coffin Manson 則に従うことが分かった、

また、電線、被覆材除去試料、導体単独の屈曲試験を比較することで屈曲により破断するメカニズムの違いを明らかにした。

この研究を通して同じ電線であっても試験条件の違いによって屈曲回数が大きく異なることが分かった。今後は屈曲特性に対する被覆材と導体の機械的強度、撚り線の構造（撚り本数、ピッチなど）の影響などを検討したい。

禁無断転載

自主研究

「屈曲試験デ - タベ - ス」

(研究期間: 平成 30 年 4 月 ~ 平成 31 年 3 月)

報 告 書

平成 31 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。