



宇宙用電気配線工程標準  
(JERG-0-041) 技術データ集

2023年3月31日 C改訂

宇宙航空研究開発機構

免責条項

ここに含まれる情報は、一般的な情報提供のみを目的としています。JAXAは、かかる情報の正確性、有用性又は適時性を含め、明示又は黙示に何ら保証するものではありません。また、JAXAは、かかる情報の利用に関連する損害について、何ら責任を負いません。

Disclaimer

The information contained herein is for general informational purposes only.

JAXA makes no warranty, express or implied, including as to the accuracy, usefulness or timeliness of any information herein. JAXA will not be liable for any losses relating to the use of the information.

発行

〒305-8505 茨城県つくば市千現 2-1-1

宇宙航空研究開発機構 安全・信頼性推進部

JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency)

## 目 次

1.	総則.....	1
1.1.	目的.....	1
1.2.	適用範囲 .....	1
2.	関連文書 .....	1
3.	技術データ一覧 .....	3

付録：

技術データ 1	不具合事例 .....	1-1
技術データ 2	太陽電池パドルに適用する圧着工法の長期熱信頼性評価 .....	2-1

## 1. 総則

本文書は、「宇宙用電気配線工程標準(JERG-0-041)」において引用される技術データ(付録Ⅲ及びⅣ)について、その詳細情報を示すものである。

### 1.1. 目的

本文書は、JERG-0-041 に規定する要求事項、品質保証事項などの事項について、その背景／事例／評価データを解説し、JERG-0-041 の利用に資することを目的とする。

### 1.2. 適用範囲

- (1) 本書に定める要求事項は、宇宙飛行体に適用する電気配線などについての要求事項を示すものである。
- (2) 本書は、契約上の仕様書で規定された場合に適用する。この場合、契約の相手方のみならず、契約の一部を履行する下請業者などにおいても本書を適用しなければならない。
- (3) その他の適用範囲、付帯事項については、上位文書である JERG-0-041 に従うものとする。

## 2. 関連文書

下記の文書は、本書に規定する範囲内において、本書の一部をなすものである。特に規定のない限り本書適用時の最新版とする。

### (1) 宇宙航空研究開発機構文書

- a. JERG-0-039 ; 宇宙用はんだ付工程標準
- b. JERG-0-041 ; 宇宙用電気配線工程標準
- c. JERG-2-200 ; 電気設計標準

### (2) 公共規格など

#### NASA 規格

- a. NASA-STD-8739.4 ; “CRIMPING, INTERCONNECTING  
ABLES, HARNESSSES, AND WIRING”

#### ESA 規格

- a. ECSS-Q-ST-70-18 ; Preparation, assembly and mounting of RF coaxial cables
- b. ECSS-Q-ST-70-26 ; Crimping of high-reliability electrical connections

ANSI 規格

- a. ANSI/J-STD-004 ; Requirements for Soldering Fluxes
- b. ANSI/J-STD-006 ; Requirements for Electronic Grade Solder Alloys and Fluxed and Non-Fluxed Solid Solders for Electronic Soldering Applications

JIS 規格

- a. JIS K 8101 ; エタノール (99.5) (試薬)
- b. JIS K 8839 ; 2-プロパノール (試薬)
- c. JIS Z 3282 ; はんだー化学成分及び形状

MIL 規格

- a. MIL-I-23053 ; Insulation Sleeving,Electrical,Heat Shrinkable,Polyvinyl Chloride, Flexible,Crosslinked and Non-Crosslinked
- b. MIL-C-22520 ; Crimping Tools,Terminal,Hand or Powèr Actuated,Wire Termination,and Tool Kits,General Specification for

### 3. 技術データ一覧

本文書に示す技術データ1について、上位文書である JERG-0-041 において引用される項番との対応表を以下に示す。

技術データ No.	名称	JERG-0-041 引用項番
1	不具合事例	5.8.6 (1)
2	太陽電池パドルに適用する圧着工法の長期熱信頼性評価	5.7.2

技術データの詳細内容について、付録に示す。

## 技術データ 1 不具合事例

## 目 次

1.	ケーブル組立品の不具合事例 .....	1-2
1.1	圧縮タイプコネクタへのプラスチックジャケットの入込みによる不具合 .....	1-2
1.2	同軸中心導体とコネクタコンタクトのはんだ接続不良 .....	1-2
1.3	ストレスリリーフスリーブの破損 .....	1-2
1.4	同軸ケーブルの組立不具合 .....	1-3
1.5	同軸ケーブル配線に関する不具合 .....	1-3
1.6	ハーネスにおける不具合 .....	1-3
2.	圧着型コンタクト不具合事例 .....	1-6
2.1	不具合事例 .....	1-6

## 図 表 目 次

図 1.1-1	同軸ケーブルの金属編組の端末処理 .....	1-4
図 1.1-2	はんだが不十分なため生じた接続部の破損 .....	1-5
図 1.1-3	ストレスリリーフスリーブの問題点 .....	1-6
図 1.1-4	同軸ケーブルの D サブコネクタにおける不具合とその対策 .....	1-6
図 1.2-1	コンタクト圧着不具合例 .....	1-7

## 1. ケーブル組立品の不具合事例

コネクタ設計不良、誤った組立指示書、材料選択又は作業不良が原因で、次のようなケーブル組立の問題が発生する。

### 1.1 圧縮タイプコネクタへのプラスチックジャケットの入込みによる不具合

圧縮タイプの高周波コネクタの組立指示書では、ジャケットがクランプシステム内に入ってもよいとしている場合がある。これは、金属クランプナットがテフロンケーブルジャケットを押し、テフロンケーブルジャケットが金属編組を押し、金属編組がコネクタの金属部と接触することになる。

この配列では、トルク締め後にテフロンジャケットがコールドフローして接続がゆるくなることが発生する問題がある。この結果、回路の接続やシステムの故障が発生する可能性がある。この問題の解決方法としては、このようなタイプのコネクタを使用しない様にするか、金属と金属の接触となるように、プラスチックジャケットを短く切るようにすべきである（図 1.1-1 参照）。コネクタのトルク締め後に満足のゆく接続が達成できない場合は、このタイプのコネクタを使用すべきではない。

### 1.2 同軸中心導体とコネクタコンタクトのはんだ接続不良

予備はんだした中心導線を予備はんだしたコンタクトの中に入れ、はんだをリフローすることによって接続が行われている場合がある。この方法では、はんだ接続が常にな充分になる（図 1.1-2 参照）。十分なはんだ接続を行うにはやりに入りはんだ（例として、長さが 3.17mm で、直径が 0.38mm のはんだ）をソルダカップに入れることによって行われる。ソルダカップを中心導線の上に置き、コンタクトを加熱してはんだを溶かし、中心導線をコンタクトに挿入する。

### 1.3 ストレスリリーフスリーブの破損

コネクタシェルからケーブルへのストレスリリーフを行うために熱収縮絶縁スリーブを使用した組立では、図 1.1-3 に示すように直径の大きな変化が発生することがある。MIL-I-23053/8 によるスリーブをストレスリリーフ用として使用することは、直径の大きく変化する所でひびがはいることがあるので、このスリーブの使用は避けるべきである。もし、アウトガスの問題がなければポリオレフィン製の 2 重スリーブ（MIL-I-23053/5）が優れている。



#### 1.4 同軸ケーブルの組立不具合

購入した同軸ケーブルは、一般に巻かれた状態で納入されている。この状態のまま所定の長さに切断し、両側にコネクタ付けの組立を行うと、組立てられたコネクタから芯線が飛び出してくることがある。

対策として、巻かれた同軸ケーブルを直線状に慣らしてからケーブル組立を行う。また、ケーブル組立前にケーブルに温度エージング（温度サイクル印加）を行ってから組立作業を行うことが推奨される。

#### 1.5 同軸ケーブル配線に関する不具合

同軸コンタクトを使用する D サブコネクタにおいて、同軸コンタクトから出る同軸ケーブルとジャンクションシェルの内側がぶつかる。特に、コンタクト配列において両側に同軸コンタクトが配列されている場合は、同軸ケーブルを横方向に押すことになり、同軸コンタクトが斜めになってコネクタの嵌合不良や、コンタクトの接触不良等の問題が起こり やすい。

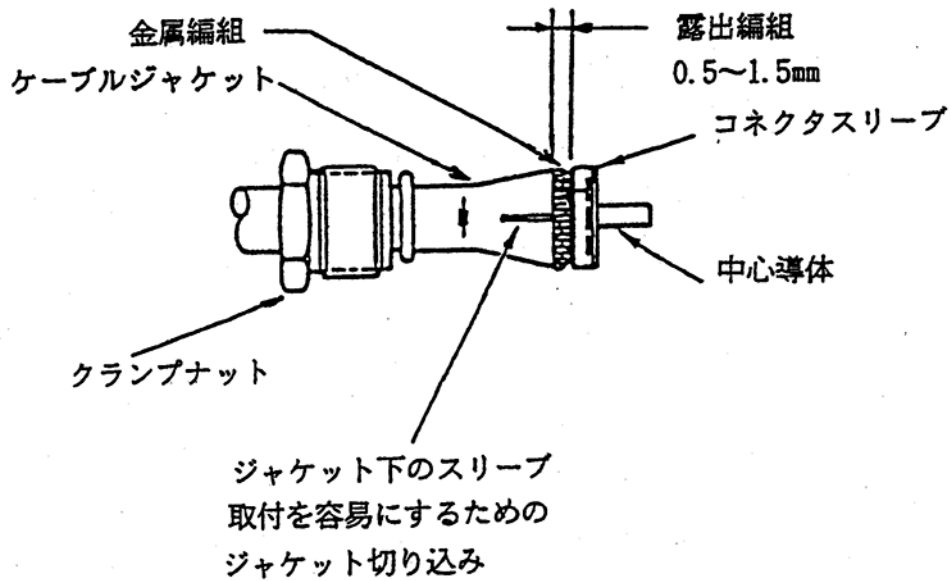
対策として、① 同軸型 D サブコネクタの両側に配置されているコンタクトを使用しない。② 奥行き長いジャンクションシェルを用いる、などの方法がある（図 1.1-4 参照）。

また、一般に同軸ケーブルは、普通の電線に比べて可撓性が無いので、曲げに対するストレスリリースには十分に注意すること。

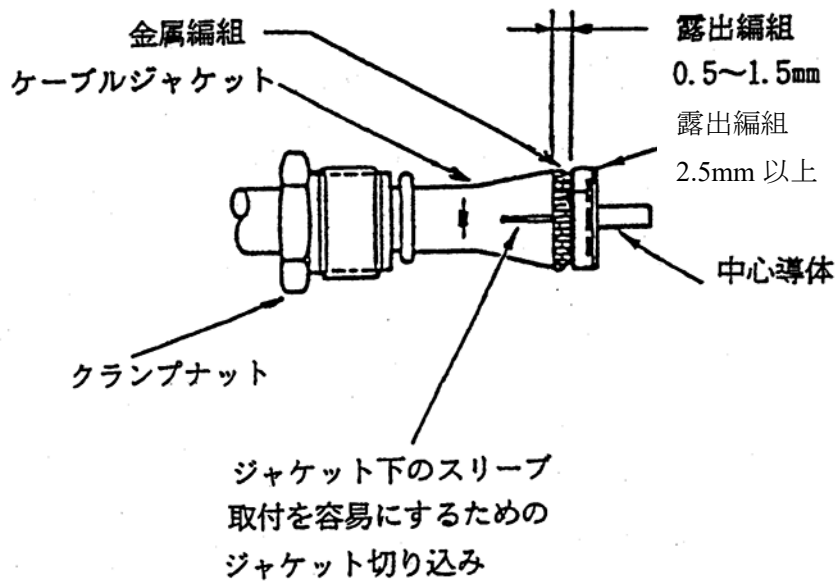
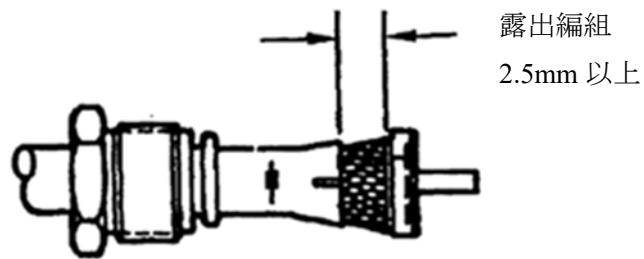
#### 1.6 ハーネスにおける不具合

一例として、2系統の信号線にそれぞれシールドを行い、さらにその上から両方の信号線にシールドを行ったフライト用シールドハーネスがある。内部シールドは、コネクタ端子へ、外部シールドはコネクタシェルに接続されている。この接続で、ケーブル端内部シールド線の端が熱収縮絶縁スリーブを突出し、外部シールド線と接触ショートし絶縁抵抗の規格をはずれた。

対策としては、① シールド線の端末処理に注意を払う（作業トレーニング、作業手順書の見直し）、② 熱収縮チューブの材料選定を考慮する、③ ハーネスを動かしながら電气的特性の確認を行う、などがある。



A. 金属編組の露出が不適当なもの



B. 金属編組の露出が適当なもの

図 1.1-1 同軸ケーブルの金属編組の端末処理

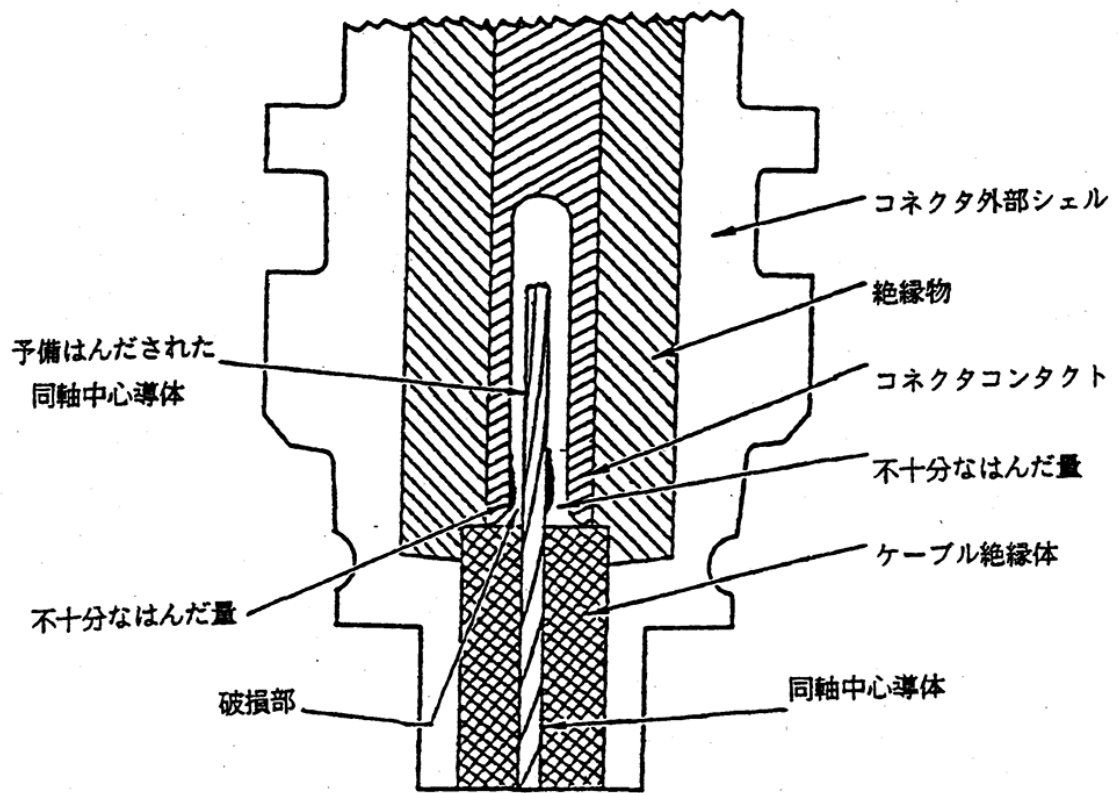


図 1.1-2 はんだが不十分なため生じた接続部の破損

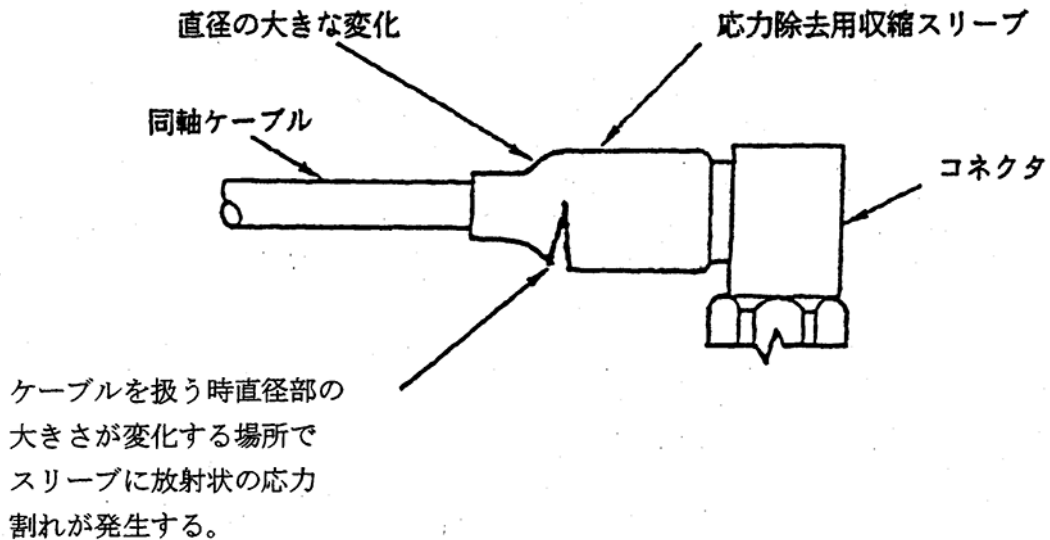


図 1.1-3 ストレスリリーフスリーブの問題点

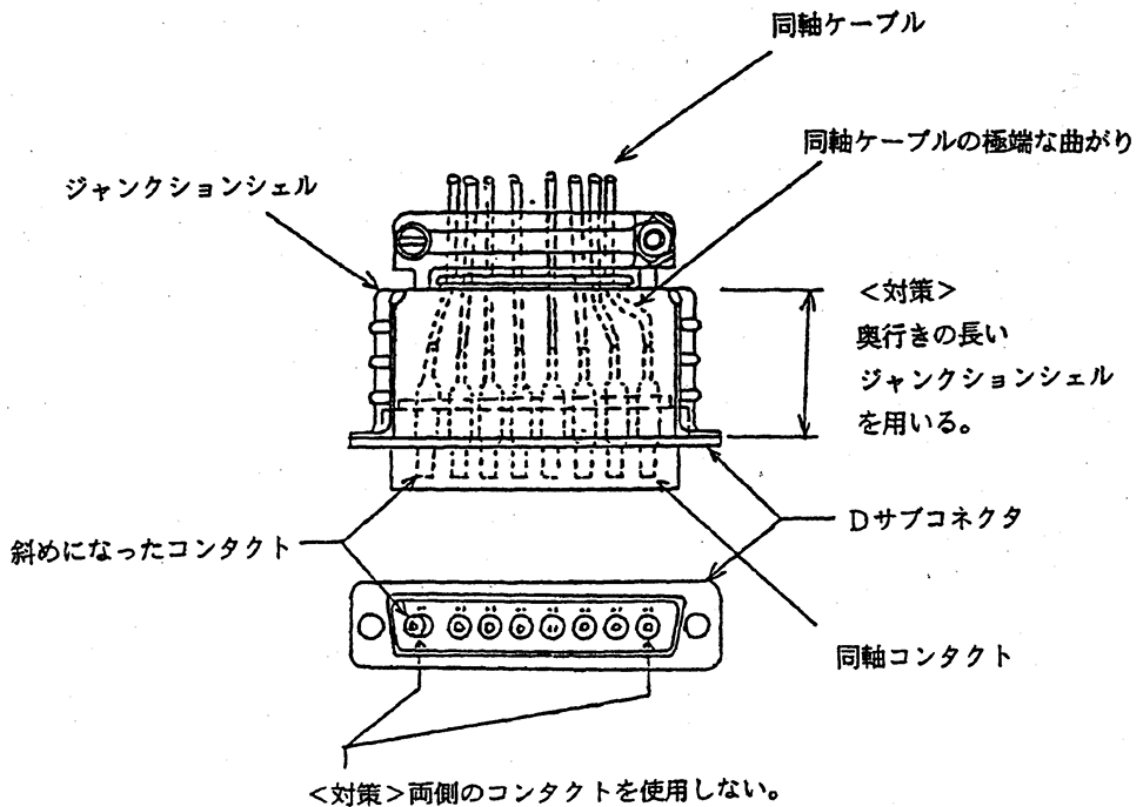


図 1.1-4 同軸ケーブルの D サブコネクタにおける不具合とその対策

## 2. 圧着型コンタクト不具合事例

### 2.1 不具合事例

圧着型コネクタにより製作したハーネスアッシーを機器に搭載し、搭載状態で導通・絶縁検査を実施したところ、そのうちの1本に導通の無いものが発見された。

AWG#22の電線に対して、コンタクトサイズは#20であった。

コンタクト#20は、圧着工具 M22520/1-01 と M22520/2-01 の2種類が使用可能である。そのため、工具の設定を混同し、M22520/2-01 に M22520/1-01 用の圧着設定を誤ってセ

ットしたため、圧着が強すぎ、搭載時及び検査時のハンドリングによるストレスにより電線が破断した。

設定可能な圧着工具を使用して、コンタクトの圧着を行なう場合、コンタクトの種類、コンタクトサイズ、電線サイズによって、圧着工具本体、ポジショナ、セレクトアの組合せが決まる。従って、コンタクト、電線サイズ、圧着工具の組合せが不適切な場合、必ず圧着が強すぎるか、弱すぎるかになり、上記の不具合例のように電線が破断したり、抜けたりする原因になる。

特にコンタクトサイズ#20のもの多くは、複数の圧着工具が使用可能であるが、対応するコンタクト／電線に対する設定は異なり、ヒューマンエラーの介在する余地がある。

不具合防止対策としては、以下のような方法が考えられる。

- (1) 圧着工具の設定を固定し、使用可能なコンタクトの種類と電線サイズを1種類に限定する。

ただし、組合せが多く、圧着工具が多数必要になる。

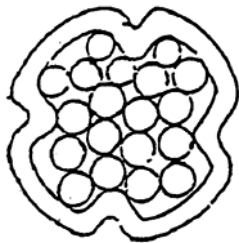
- (2) コンタクト、電線サイズにより、使用する圧着工具及び設定を作業指示文書で規定する。

作業者は、圧着工具の設定を確認し、使用中に設定がずれないように固定してから使用する。

- (3) コンタクトによっては、複数の圧着工具の使用が使用可能である。

コンタクトサイズにより使用する圧着工具を区別するなどの手段により複数の工具の混在した使用を避ける。

適正



不具合例



図 1.2-1 コンタクト圧着不具合例

## 技術データ 2 太陽電池パドルに適用する圧着工法の長期熱信頼性評価

## 目 次

1.	はじめに .....	2-3
1.1	本技術データの背景 .....	2-3
1.2	本評価試験の目的 .....	2-3
1.3	本評価試験のフロー .....	2-4
2.	部品の選定 .....	2-5
3.	評価試料の概要 .....	2-6
4.	評価試料の作製 .....	2-8
5.	評価試験の実施 .....	2-10
5.1	初期評価 .....	2-10
5.1.1	初期評価項目 .....	2-10
5.1.2	初期評価結果 .....	2-11
5.1.3	圧着初期評価の結論 .....	2-14
5.2	熱衝撃の影響の評価 .....	2-15
5.2.1	クーポンによる評価 .....	2-15
5.2.2	部分評価試料による評価 .....	2-18
5.2.3	単線に対する圧着の接続機能の評価結果 .....	2-23
5.3	引張試験への熱衝撃試験の影響要因の検討 .....	2-24
5.3.1	圧着工法試料分析結果の破断モードと引張試験の変動原因の考察 .....	2-24
5.3.2	考察結果のまとめ .....	2-29
6.	本評価のまとめ .....	2-29
7.	用語集 .....	2-32

## 図 表 目 次

表 1.1-1 より線と単線とを各種はんだで接続した試料の熱衝撃試験後の接続性比較.....	3
図 1.3-1 圧着工法評価試験フロー .....	4
表 2-1 圧着スリーブ選定結果.....	5
図 2-1 突き合わせ用圧着スリーブ外観※ (参考) .....	5
図 2-2 突き合わせ用圧着スリーブ外形寸法※ (参考) .....	6
図 3-1 初期評価試料の外観例を示す写真.....	6
図 3-2 部分評価用試料の外観例を示す写真.....	7
表 4-1 各試料の工程管理方法の JERG-0-041B との比較 .....	8
表 4-2 初期評価試料の仕様一覧表.....	9
図 4-1 圧着工具のスリーブ圧着部の模式図(閉じた状態) .....	9
表 5.1.1-1 圧着工法初期評価試料の検査項目(試作時管理値) .....	10
表 5.1.1-2 電圧降下基準値(試作時管理値) .....	11
表 5.1.1-3 引張強さ基準値(試作時管理値) .....	11
表 5.1.2-1 初期評価試料の電圧降下検査結果 .....	12
表 5.1.2-2 初期評価試料の引張強さ .....	12
図 5.1.2-1 圧着継手引張破壊カテゴリモード図(JERG-0-041B より引用) .....	12
図 5.1.2-2 引張強さ試験実施前後の外観写真.....	13
図 5.1.2-3 初期評価試料の圧着部断面写真.....	14
図 5.2.1-1 クーポン試験フロー.....	15
表 5.2.1-1 クーポンの評価内容.....	16
図 5.2.1-2 クーポン実装試料(1~10)の電圧測定検査のトレンドグラフ .....	17
表 5.2.1-2 圧着接続ダイオードクーポンのビッカース硬度(Hv) .....	18
図 5.2.1-3 圧着試料(約 7.5 万(上)及び約 11.2 万サイクル後(下))の断面顕微鏡像.....	18
図 5.2.1-4 圧着中央部の顕微鏡画像 .....	20
図 5.2.2-1 部分評価試料の試験フロー .....	21
表 5.2.2-1 部分評価試料の評価内容 .....	21
表 5.2.2-2 部分評価用試料(圧着)の引張強さと破断モード判定結果サマリ.....	22
図 5.2.2-2 圧着接続部分評価試料のリード部引張強さの熱衝撃サイクル数依存性 .....	23
図 5.3-1 圧着接続部の断面観察を示す模式図 .....	24
図 5.3.1-1 圧着試料(初期)の断面顕微鏡像 .....	26
図 5.3.1-2 圧着試料(約 4 万サイクル後)の断面顕微鏡像 .....	26
図 5.3.1-3 圧着中央部の顕微鏡画像 .....	27
図 5.3.1-4 圧着部端部の顕微鏡画像 .....	27
表 5.3.1-1 部分評価用試料(圧着)のビッカース硬度(Hv) .....	28
図 5.3.1-5 約 7.5 万サイクル後の圧着試料の断面顕微鏡像 .....	28
図 6-1 部分評価試料の引張強さ(x)と Sn96 はんだの接合長さ(o)の保存率.....	30

## 1. はじめに

## 注意

この試験結果は他のいかなる圧着工法が単線に適用できることを示すものではなく、圧着工法を適用する際の評価方法の例を示すものである。

## 1.1 本技術データの背景

現在、人工衛星の運用年数の長寿命化が求められており、衛星の構成品の中で最も過酷な熱サイクル環境におかれる太陽電池パネル(以下 SAP: Solar Array Panel)の長寿命化は重要課題の一つとなっている。SAP は、地球周回に伴って太陽光が直接照射される一方で地球の影においては低温環境に曝され、衛星の中で最も熱衝撃の大きい部品となる。従来 SAP 部の電気部品の接続にははんだがよく用いられてきたが、低サイクル疲労を生じるため、特に熱衝撃回数が多い低軌道周回衛星では近年の長寿命化要求により、実装方法・実装箇所によってはミッション期間における熱衝撃に対する寿命の余裕がなくなっている。

実際に、はんだを接続に用いた部品に対して、 $-94\sim 97^{\circ}\text{C}$ の熱衝撃試験を実施した際には、10 年相当の熱衝撃を加えた結果、はんだ部分の熱疲労によるクラックの進展により接続されている面積が低下し、はんだ部の接続が大きく損なわれたという結果が得られている。共晶はんだと鉛フリーはんだの特性の比較を表 1.1-1 に示す。

表中では各種はんだの約 6 万サイクルの熱衝撃試験後の接続性を示しているが、共晶はんだについては 6 万サイクルの実績でなく比較による見込みを参考として記載している。

表 1.1-1 より線と単線とを各種はんだで接続した試料の熱衝撃試験後の接続性比較

6 万サイクル後	共晶はんだ (Sn63-Pb)	Sn96 (Sn96-Ag3.5)	Sn92.5 (Sn92.5-Ag-Sb)
接続性の評価	×	△	△

×:電気特性に異常が生じるものが出てくる可能性が高い △:断線に至るおそれのあるクラック進展がみられる

## 1.2 本評価試験の目的

上記のように、低軌道周回衛星の厳しい環境に置かれる SAP において更なる長寿命化の要求にこたえるには、はんだ接続以外の新たな接続方法を視野に入れる必要がある。はんだ以外の電気接続方法として圧着工法の適用が考えられるが、単線に対する圧着工法の適用は JERG-0-041B 中で原則として禁止されている(注 1)。

そこで、このような新たな接続方法を検討するに際し、実際に低軌道 10 年相当以上の熱衝撃を加えることによって、長期信頼性を実証する必要がある。

本評価試験では、はんだ以外の電気接続方法として圧着工法によって単線(リード線)と圧着スリーブ間を接続した試料を作成し、この試料に低軌道周回環境 10 年相当(2 倍マージンである 20 年相当の約 11.2 万サイクル)以上を模擬した熱衝撃試験を行い、圧着工法接続への熱衝撃の影響について検討した結果をまとめた。

なお、単線に対する圧着工法は JERG-0-041B で原則的には禁止されており、また本試験は特定条件で作成し、実装した試料に対して試験を行ったものであり、この試験結果は他のいかなる圧着工法が単線に適用できることを示すものではなく、圧着工法を適用する際の評価方法の例を示すものである。



### 1.3 本評価試験のフロー

本評価試験の構成を図 1.3-1 に示す。本稿では、圧着工法に使用する部品について 2 項で記載し、3 項で試験試料の概要を記載している。試料としては、圧着工法によってリード線と圧着スリーブとを接続した初期評価試料と部分評価試料、および太陽電池パネルを模擬して部品を実装したクーポン試料とを作成している。

4 項では圧着を行った試料に熱衝撃試験を実施しない状態での機械的・電氣的接続性を評価する目的で、初期評価を行った結果を記載している(図 1.3-1 中の点線囲み部)。

初期評価では主に破壊物理分析(DPA: Destructive Physical Analysis)によって圧着工法によるリード線と圧着スリーブとの間の機械的接続性を評価することとした。

このため、破壊試験用の試料として圧着部のみを模擬した試料として初期評価試料を作成し、熱衝撃試験を実施しない状態で引張試験を行った。また、機械的接続性を確認するための断面観察や定電流印加時の圧着部による電圧降下量の測定を行った。

クーポンは実際の実装状態を模擬した試料であり、このクーポンに対して実際の SAP の軌道環境を模擬した熱衝撃試験を実施した結果を 5 項で記載する。

熱衝撃試験後の破壊試験用として、圧着工法で作成した部分評価試料に対してもクーポンと同様の熱衝撃試験を実施し、引張試験によって機械的接続性について確認した結果を 5 項に記載する。その試験の際に一部の試料生じた引張強さの低下の原因を検討した結果について 5.3 項に記載する。

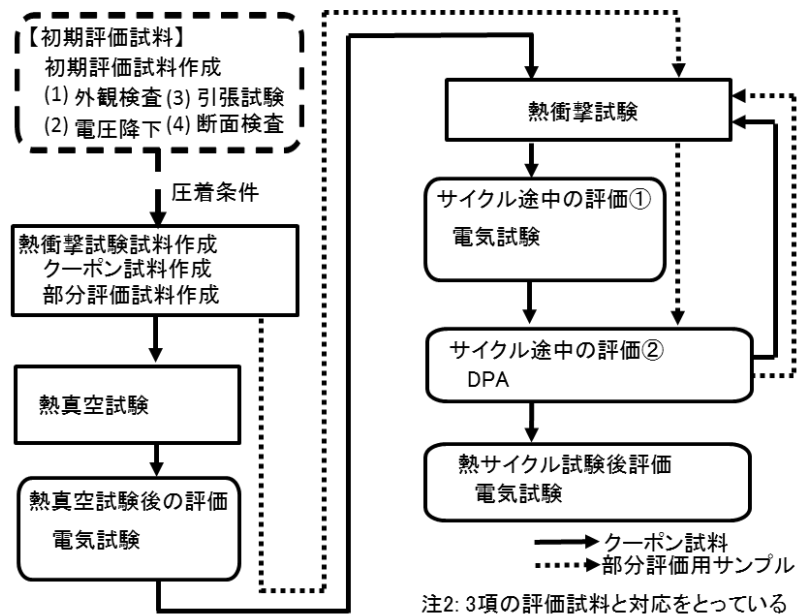


図 1.3-1 圧着工法評価試験フロー

これらの実施した評価は疲労寿命をより長くする観点で行っており、例えば図 1.3-1 中に示す DPA として断面観察とビッカース硬度測定、引張試験を行っている。

但し、このフローは圧着工法を適用する際の評価方法の例を示すものであり、上記の内容を実施すれば必要十分というものではなく、評価する部品・実装方法によって異なり、必要に応じて評価を追加あるいは減らす、もしくは異なる評価方法を用いることができる。

この他に疲労寿命以外の評価として、振動試験を実際の環境に合わせてパドル単位などでの実施も考慮すること。

2. 部品の選定

試験を行う圧着スリーブの仕様について次の通り検討した。一般的に、電線を圧着する「圧着スリーブ」としては突合せタイプ・重ね合わせタイプ・オフセットタイプの3種類が使用される。それぞれの種類のスリーブに関するSAPへの適用時の長所や短所を表2-1に示す。この調査結果より、ハンディタイプの工具が使用でき、また配線の位置決めがしやすいことから、作業性の良さを考慮し、突合せタイプを選定した。また、今回の目的である熱衝撃に対する寿命向上のためには、熱衝撃の影響を減らすためリードと同じ材質の圧着接続子を選定することが望ましいと考えられるため、導線に使用する銅に合わせて裸圧着スリーブとしても母材が同じ銅であるものを用いることとした。

上記の検討から、今回の試験に使用する圧着スリーブは日本圧着端子製造のCW-1.25とした。この圧着スリーブは母材が無酸素銅、表面が錫めっき(厚み1マイクロメートル以上)からなる。その外観及び外形寸法を図2-1、図2-2に示す。

表 2-1 圧着スリーブ選定結果

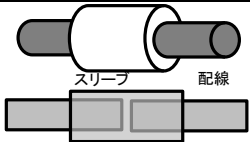
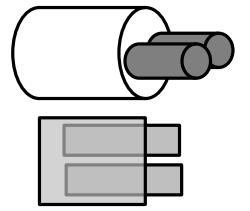
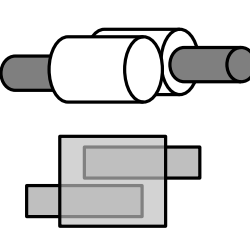
L/N	スリーブ情報			作業性項目			SAP用途 総合評価
	接続形式	模式図	メーカー	使用する工具	配線位置決めの しやすさ	実装性 (地球観測を前提)	
1	突合せ		多数あり	○ 標準的な ハンディタイプ	○ リード側とワイヤ側を別々に圧着できるため作業性がよい	○ 接続部がオフセットタイプよりも大きくなるが、大きくは変わらない	○
2	重ね合わせ		A社	○ 標準的な ハンディタイプ	△ リード線とワイヤを同時に圧着するため、リード線とより線を固定する必要があり、SAP用途では作業性が悪い	○ 接続部は突合せタイプよりコンパクトにまとめられる	△
3			B社	○ 標準的な ハンディタイプ	△ リード線とワイヤを同時に圧着するため、リード線とより線を固定する必要があり、SAP用途では作業性が悪い	○ 接続部は突合せタイプよりコンパクトにまとめられる	△
4	オフセット		A社	○ 標準的な ハンディタイプ	△ リード線とワイヤを同時に圧着するため、リード線とより線を固定する必要があり、SAP用途では作業性が悪い	○ 接続部は突合せタイプよりコンパクトにまとめられる	△
5			C社	× メーカー推奨は 卓上タイプの 専用工具である	○- 突合せタイプと同様にリード側とワイヤ側を別々にか締められる可能性はあるが、このためには別途開発が必要	○ 接続部は突合せタイプよりコンパクトにまとめられる	×



図 2-1 突き合わせ用圧着スリーブ外観※ (参考)

※;出典:日本圧着端子製造(株)カタログより

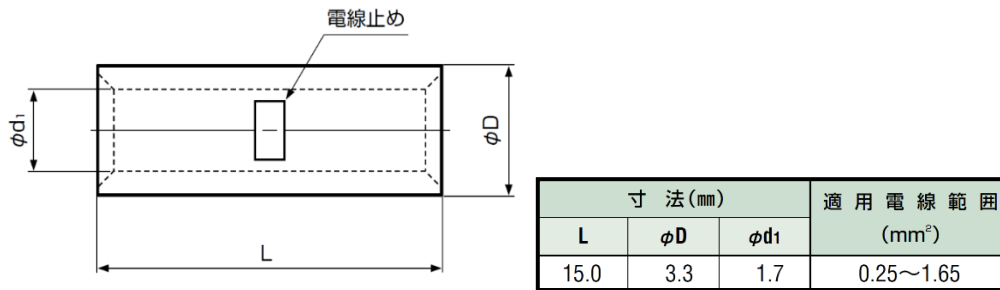


図 2-2 突き合わせ用圧着スリーブ外形寸法※ (参考)

※;出典:日本圧着端子製造(株)カタログより

### 3. 評価試料の概要

本項では、本評価に用いた評価試験用クーポンと部分評価試料および初期評価試料の仕様及び接続方法の概要について説明する。このうち熱衝撃試験に供する試料は部分評価試料とクーポンとなる。試料作成と評価は、単線に対する圧着に注力して実施した。

なお、リードやより線は直線的に引き出し、圧着の根本で曲げ等は実施していない。また熱集収縮チューブで覆うこともしていない。これは圧着部に機械的や熱的なストレスが極力加わらないように考慮したためである。なお、フライト品では接着剤等で部品や端子、より線の固定(ストレスリリーフを阻害しないよう)や絶縁等は必須となる。今回の評価試料は(2)テストクーポンがフライト品と同様な実装構成となっており、実際の運用形態における評価が重要となる。

#### (1) 初期評価試料

圧着条件の健全性を DPA で確認するための試料として圧着高さやリードが異なるものを用いた試料を用いて初期評価試料を作成した。初期評価試料の外観写真を図 3-1 に示す。図右側の円筒部分がスリーブ、その左側がリード(単線)であり、四角形状の圧痕部分が圧着部であり、この圧着部でスリーブとリードが接続されている。初期評価では、このような試料をいくつかの条件で作成し、評価を実施した。

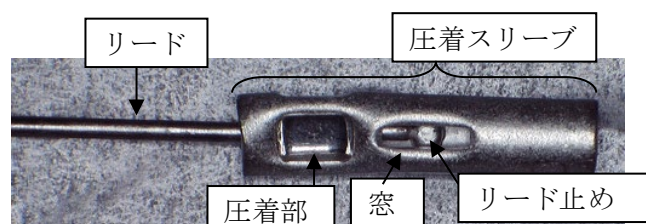


図 3-1 初期評価試料の外観例を示す写真

#### (2) クーポン

前記の部分評価試料に加えて、熱衝撃試験による電気接続機能への影響を非破壊で確認するための試料として、実際の太陽電池パネル上での実装を模擬したクーポンを作成した。部分評価試料は、リードとスリーブを圧着した部品のみであるのに対し、このクーポンは CFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastic) フェースシートハニカムパネル構造のサブストレート上に圧着工法でリードと圧着スリーブとを接続したものを実装したものであり、電氣的に全ての部品に個別に通電出来得るようにしている。ストレスリリーフについても、実際の実装状態を模擬している。

これにより、同一クーポン上の各部品に電流を通電することができ、断線故障が発生した際に抵抗の上昇によって検知することができる。このクーポンのサブストレートのサイズは約20cm角であり、部品の実装数は20個とした。

このクーポン2個に熱衝撃を負荷し、熱衝撃試験負荷後に電気機能の確認の実施と、一部の試料で断面観察を行い機械的な接続性の確認を行った。電気機能の確認には実際に電流を流して、熱衝撃試験前に比べて抵抗値に大きな変化が生じないかを確認した。この熱衝撃試験後の電気機能の確認により、圧着工法による長期信頼性の最終的な評価としている。

### (3) 部分評価試料

熱衝撃後試験後のDPAによる検証を主な目的とした試料としてリード線と圧着スリーブとを圧着接続した試料を作成した。本評価ではこれを部分評価用試料と記載している。

圧着接続部分評価用試料の外観写真を図3-2に示す。写真中央部の円筒部分がスリーブ、その右側がリード(単線)、左側がより線、四角形状の圧痕部分が圧着部であり、より線と単線とが圧着で接続されている。

圧着の工程管理については4項で記載する。なお、より線部の工程管理についても、リード部の圧着と同じ方法で行った。

本試料は、加工をせずにDPAをできるように熱衝撃試験においてリードや試料を拘束・保持しない状態としており、このような点を除いてクーポン試料の圧着部の状態を模擬している。クーポンとは別にこのような試料を作成することによりクーポン上に実装された試料では実施が難しい引張試験等の機械的評価を実施することができる。

また、初期評価試料とほぼ同様な試料であるが、より線が圧着されている点と圧着条件が1条件のみである点と、主に熱衝撃試験を実施した後のものを評価する点が異なる。

試験では、この試料に熱衝撃を負荷し、熱衝撃試験負荷後に引張試験および断面観察をおこなった。部分評価試料の引張試験としては数量を4つ以上とした。



図 3-2 部分評価用試料の外観例を示す写真

## 4. 評価試料の作製

単線に対する圧着工程の工程管理に関しては、対象となる部品が異なるが JERG-0-041B の圧着に関する部分として 5.7.1.6 項から一部を流用した。JERG-0-041B 中の 5.7.1.6 項に対する一致部分を表 4-1 に示す。

表中の 5.7.1.6.2(1)と(2)はいずれかの方法となっているが初期評価試料については両方を適用した。また、全ての試料でセッティングがない工具を使用したため、非該当としている。

5.7.1.6.2(1)e は本書の引張試験結果を適用した。

表 4-1 各試料の工程管理方法の JERG-0-041B との比較

JERG-0-041B 中 5.7.1.6 項の項目		初期評価 試料	クーポン	部分評価 試料
5.7.1.6.1 圧着工具の確認	(1) 調整不要工具	○	○	○
	(2) セッティングとポジションが封止された工具	N/A	N/A	N/A
5.7.1.6.2 圧着工具の点検 (1) 試験による方法	a.試験方法	○	○	○
	b.点検間隔	○	○	○
	c.供試品数	○	○	○
	d.供試品の試験	○	○	○
	e.要求圧着強度	○	○	○
5.7.1.6.2 圧着工具の点検 (2) GO-NO GO ゲージによる方法	a.点検方法	○	-	-
	b.点検間隔	○	-	-

○:適用 -:非適用 N/A:非該当

## (1) 初期評価試料(評価結果は 5.1 項に記載)

初期評価に用いる初期評価試料については、圧着工具を変えた試料および線径の異なるリード 2 種類のリードを使用した試料を試作した。各試料の一覧を表 4-2 に示す。

本試料に使用するリードには、A~D については実際にクーポン試料に実装するものと同じ部品から切除したものを使用した。

これらのすべてのリードの母材は無酸素銅からなり、最表面にはんだが施されている。工具については 3 種類の異なる工具を用いた。図 4-1 に圧着工具のスリーブ圧着部の模式図を示す。本書では、圧着高さを図 4-1 で示す部分とする。

表 4-2 初期評価試料の仕様一覧表

名称	リード径 (スペック値)	圧着高さ (スペック値)	工具 区別番号
初期評価試料 A	約 1mm	1.65～1.85 mm	1
初期評価試料 B	約 1mm	1.65～1.85 mm	4
初期評価試料 C	約 1mm	1.35～1.75 mm	2
初期評価試料 D	約 1mm	1.17～1.13 mm	3
初期評価試料 E	約 0.8mm	1.65～1.85 mm	4

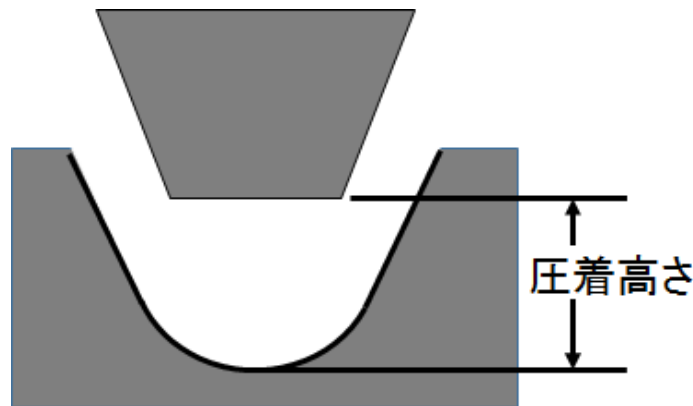


図 4-1 圧着工具のスリーブ圧着部の模式図(閉じた状態)

## (2) クーポン(評価結果は 5.2.1 項に記載)

クーポン製造の際には、全てのリードとスリーブの圧着を初期評価試料 A と同等の条件で行った。リードとスリーブとの圧着を行った後、実際の太陽電池パネル上への実装方法に合わせて CFRP フェースシートハニカムパネル構造のサブストレート上に実装し、クーポンを作成した。

なお、本評価で使用した 2 個のクーポンは、製造方法、スリーブ、実装方法などの仕様は同一のものである。

## (3) 部分評価試料(評価結果は 5.2.2 項に記載)

熱衝撃試験に用いる部分評価試料については、全てのリードとスリーブの圧着を初期評価試料 A と同等の条件で行った。部分評価試料についても、実際にクーポンに実装するものと同じ部品から切除したリードを使用している。試料数は 25 個とし、5 個は熱衝撃試験前の引張強さの確認に使用し、残り 20 個を熱衝撃試験に供し、熱衝撃試験の途中で 1 回に 5 個ずつ、4 回に分けて取り出し、熱衝撃試験の進行に伴う引張強さおよび断面観察を実施した。

## 5. 評価試験の実施

## 5.1 初期評価

## 5.1.1 初期評価項目

JERG-0-041Bには単線に対する評価項目が無いため、単線に対する圧着自体の電気的・機械的接続性を確認することを目的として、リード線を圧着しただけの試料(初期評価試料)を用いてし初期評価を行った。

機械的・電気接続性の合否基準としてより線の圧着に対する試験に準じて単線の外径に対応する外径のより線の規格値を流用して単線圧着の基準として評価・判断することとした。

単線に対する評価項目としては、JERG-0-041B および ECSS-Q-70-26(ESA 規格)のうちのより線に対する圧着の評価方法から引張試験、電圧降下量測定、断面検査を流用した。

この際、単線に対する規格値は約 1mm φ と約 0.8mm φ のおおよそ同等の太さに該当する AWG20 と AWG22 を採用した。これらの検査項目、検査基準を表 5.1.1-1、5.1.1-2、5.1.1-3 に示す。

ただし、本規格はより線のものであり、本評価では妥当性については評価できていないため、リード線の引張強さがより線の規格を満たさない場合は、引張強さ以外にリードとスリーブとが接続されていることの評価指標として、電圧降下や断面検査の規格を満たしているか、かつ、引張強さ試験時の引張破断モードが引抜きではないかを確認することとした。

熱衝撃試験を実施した試料が電圧降下や断面検査の規格を満たしてかつ引張強さ試験の引張破断モードが圧着スリーブからのリード線の引抜きでない場合(リード部破断の場合)は、機械的接続は保たれており、圧着作業上の問題はないと判断し、合格とすることとした。

表 5.1.1-1 圧着工法初期評価試料の検査項目(試作時管理値)

L/N	検査項目	検査基準	試料数	備考
1	外観検査	・圧着部の割れなし ・圧着部のメッキ剥がれなし	リード線: 5 本/種類	
2	電圧降下	表 5.1.1-2 による	リード線: 5 本/種類	規格値は ECSS-Q-70-26C 中のより線の AWG#20(約 1mm φ リード)と AWG22 (約 0.8mm φ リード)と等価とした。
3	引張強さ	表 5.1.1-3 による	リード線: 5 本/種類	規格値は ECSS-Q-70-26C 中のより線の AWG#20(約 1mm φ リード)と AWG22 (約 0.8mm φ リード)と等価とした。
4	断面検査 (空隙率)	・観察部に異物や汚染がないこと ・空隙は導線断面積の 10%以下 ・スリーブに傷や破壊のないこと	リード線: 1 本/種類	空隙率の規定は、ECSS-Q-70-26C を参照した。

表 5.1.1-2 電圧降下基準値(試作時管理値)

ワイヤサイズ	試験電流(A)	最大電圧降下(mV)
20	7.5	4.0
22	5.0	4.0

表 5.1.1-3 引張強さ基準値(試作時管理値)

ワイヤサイズ	最小引張強さ(N)
20	91.6
22	56.9

### 5.1.2 初期評価結果

本評価で参照する JERG-0-041B に記載の引張試験時の破断モードの判定基準の模式図を図 5.1.2-1 に引用して示す。

#### 1) 外観検査

圧着部の割れはなく、めっき剥がれがないことから、外観検査は問題ない結果となった。初期外観写真(引張強さ試験前)を図 5.1.2-2 に示す。

#### 2) 電圧降下

リード圧着部の電圧降下はより線の規格値よりも小さい値となり、より線の規格値を満足する結果を得た。結果を表 5.1.2-1 に示す。

#### 3) 引張強さ

引張試験の結果を表 5.1.2-2 に、引張試験後の試料の写真を図 5.1.2-2 に示す。

リードとスリーブを圧着して作成した部分評価試料について、表 5.1.2-1 中に示した各試料の最小値であっても、外径がリードとおおよそ同径のより線圧着の引張強さの規定値以上の強度が得られるという結果となった。

また、初期評価試料 A~C の破断モードは全てリード破断(リード途中で破断)であり、リード引き抜けや圧着部での破断はなかった。

これらの結果から、リード圧着部の機械的接続機能に問題はないと判断する。D,E については破断モードが A モードのものも存在したが、引張強さは規格値を満たした。

念のため D,E の条件は今回の寿命評価のクーポン試験には適用していない。

なお、図 5.1.2-1 中の写真では、今回使用したスリーブの長さが長いことスリーブの外でなく、スリーブ端部よりも圧着部側でリードが破断しているが、圧着部での破断ではなくリード部での破断となっている。

このため、破断モードの判定となる図 5.1.2-2 中の B モードの破壊モードはコンタクト外部での破断となっているが、本文書のなかでは、図 5.1.2-1 中に示されるような、スリーブ端部よりも圧着部側でのリード破断であっても圧着部での破断でなければ B モードとしている。



表 5.1.2-1 初期評価試料の電圧降下検査結果

品目	AWG	規格 *1	試験電流 (A)	電圧降下(mV)		
		(mV)		min.	max.	Ave.
初期評価試料 A	20 相当	<4.00	7.5	2.035	2.059	2.045
初期評価試料 B	20 相当	<4.00	7.5	2.021	2.131	2.063
初期評価試料 C	20 相当	<4.00	7.5	2.016	2.055	2.037
初期評価試料 D	20 相当	<4.00	7.5	2.031	2.104	2.059
初期評価試料 E	22 相当	<4.00	5.0	2.026	2.076	2.051

\*1) ECSS-Q-70-26C(Crimping of high-reliability electrical connections)に示すクリップハレル 20、導線サイズ AWG#20 のより線タイプの Voltage-drop test requirements の規格値を示す。

表 5.1.2-2 初期評価試料の引張強さ

品目	AWG	規格*1	引張強さ(N)		
		(N)	min.	max.	Ave.
初期評価試料 A	20 相当	>91.6	157	170	165
初期評価試料 B	20 相当	>91.6	152	171	162
初期評価試料 C	20 相当	>91.6	161	182	174
初期評価試料 D	20 相当	>91.6	157	170	163
初期評価試料 E	22 相当	>56.9	132	162	150

\*1) ECSS-Q-70-26C(Crimping of high-reliability electrical connections)では、ワイヤ強度の 75%を引張強さの最小値としてよい記載がある。

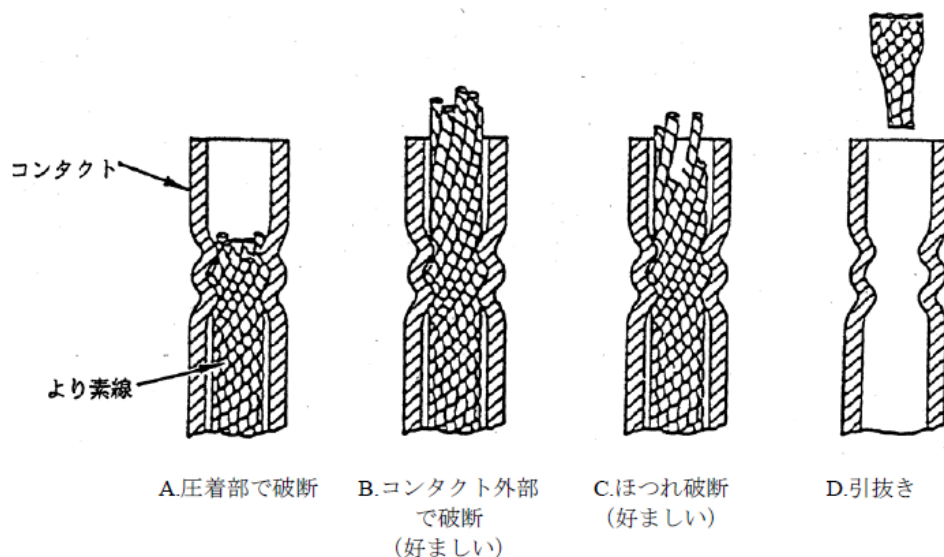


図 5.1.2-1 圧着継手引張破壊カテゴリ一模式図(JERG-0-041B より引用)

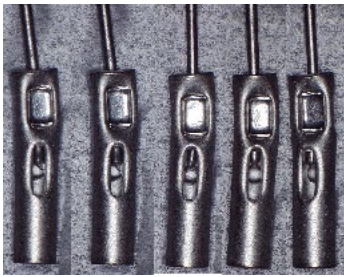

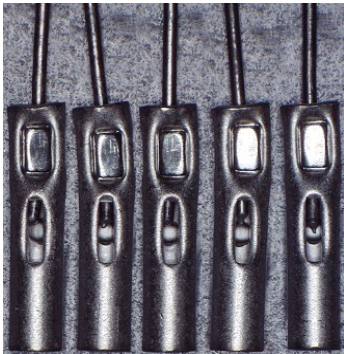

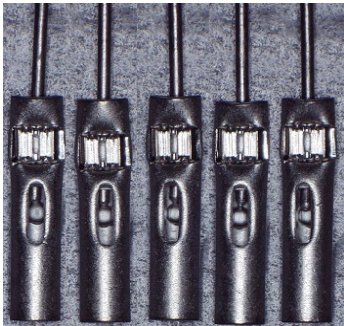
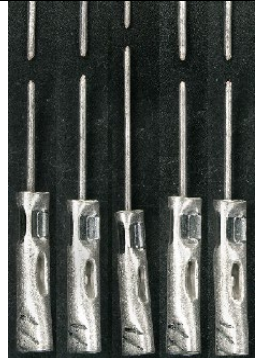
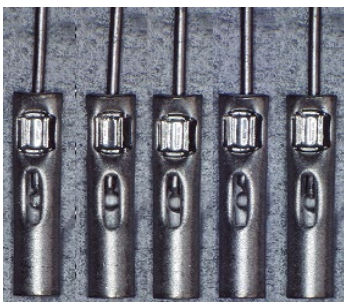
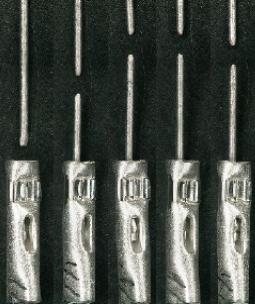


品目	初期評価試料外観写真	
	引張試験前	引張試験後
初期評価試料 A		
初期評価試料 B		
初期評価試料 C		
初期評価試料 D		
初期評価試料 E		

図 5.1.2-2 引張強さ試験実施前後の外観写真

4)断面検査

圧着部の短辺方向断面を観察した写真を図 5.1.2-3 に示す。観察部に異物や汚染はなく、リードが隙間を埋めるように変形し、空隙率は 10%以内となった。このことからスリーブとリードの接触が良好であり、電圧降下量が小さかった要因であることがわかる。また、圧着スリーブにクラックは観察されず、圧着状態は良好と判断する。

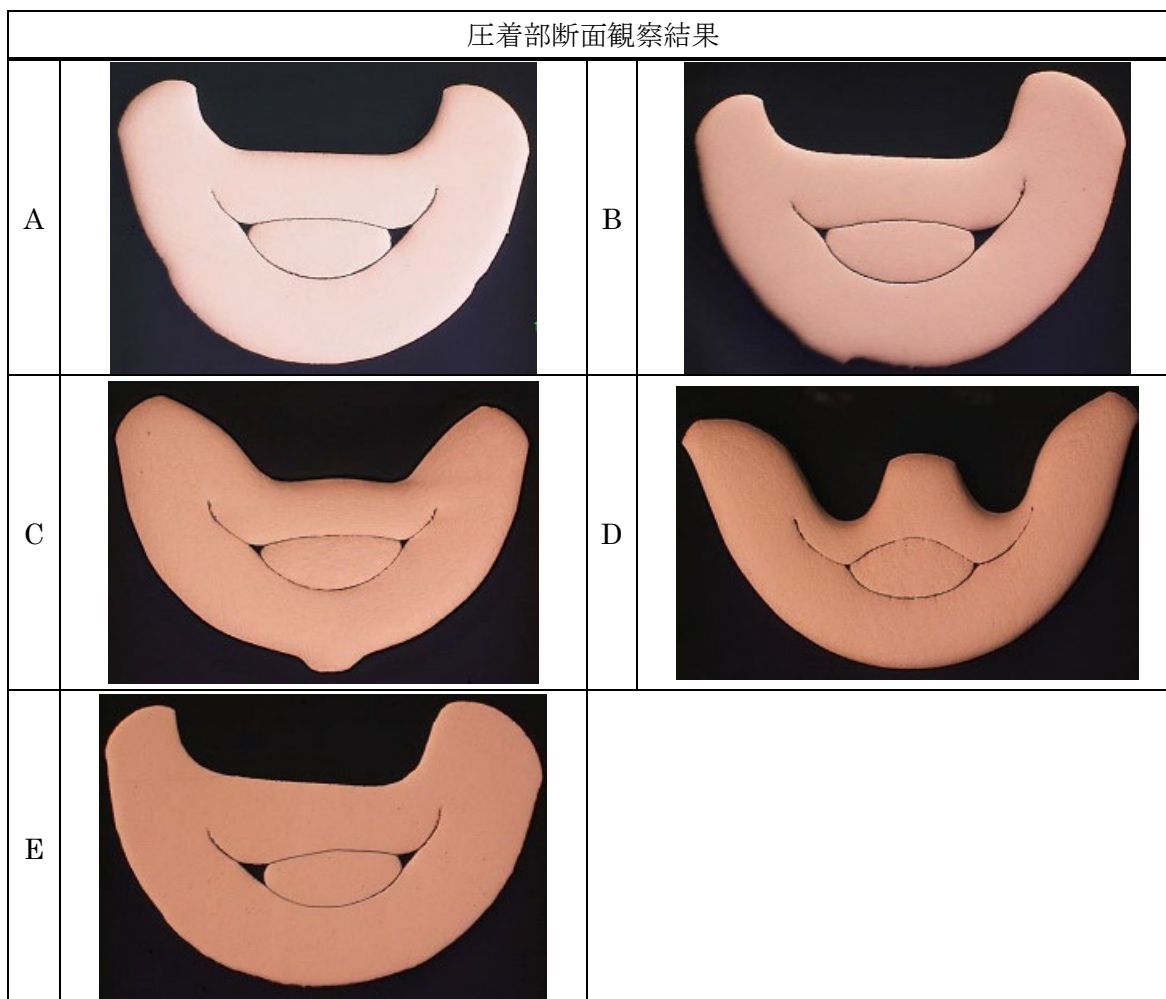


図 5.1.2-3 初期評価試料の圧着部断面写真

5.1.3 圧着初期評価の結論

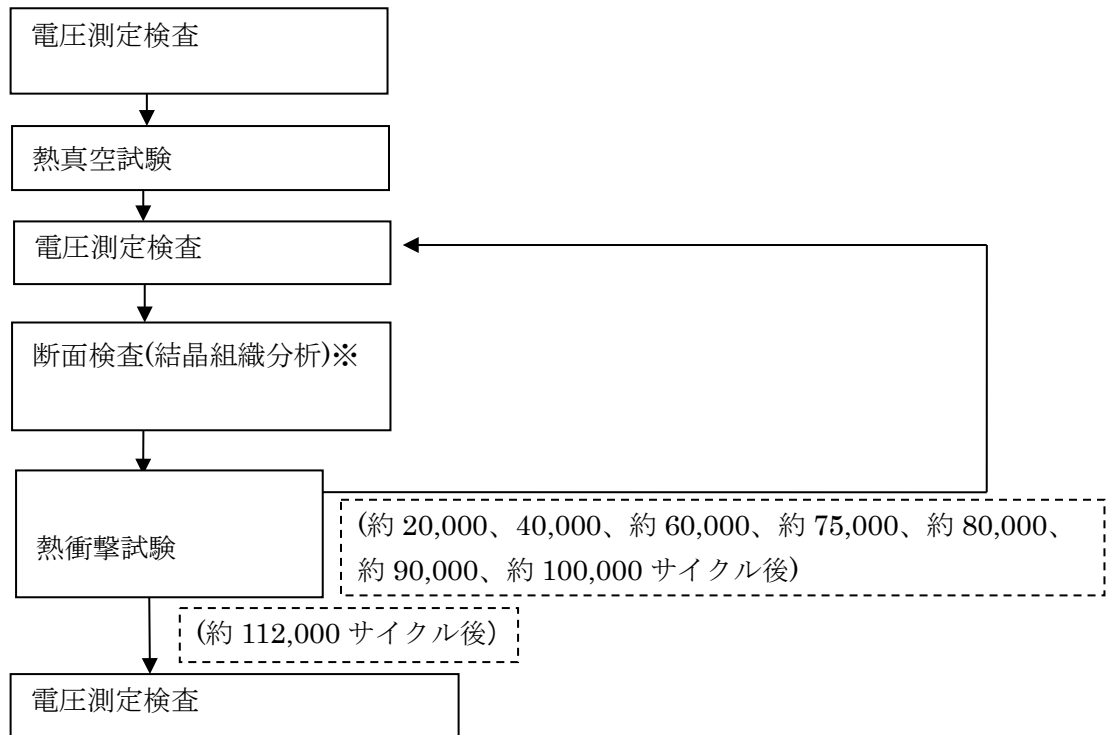
圧着した部分評価試料を評価した結果、単線のリードについて電圧降下及び引張強さはより線圧着接続に対する規格を満足した。更に、引張破壊モードは主にリード部での破断であり、単線圧着作業の問題はないと判断する。また、断面検査の結果、圧着部のリードはスリーブ内でスリーブとの間に大きな隙間がない状態で接続されており、こちらもより線圧着接続に対する規格を満たしていた。

以上の初期評価より、リードと圧着スリーブとの圧着接続は機能として問題がなかった。以下では、耐環境性評価のためクーポンと部分評価試料とを用いた熱衝撃試験について記載する。

## 5.2 熱衝撃の影響の評価

## 5.2.1 クーポンによる評価

## 5.2.1.1 クーポン試料の試験内容



※：約 40,000、約 60,000、約 75,000、約 112,000 サイクル後に実施

図 5.2.1-1 クーポン試験フロー

クーポン試料による熱衝撃の影響の評価試験フローを図 5.2.1-1 に示す。熱衝撃温度範囲としては $-94^{\circ}\text{C}$ 以下から $+97^{\circ}\text{C}$ 以上の温度範囲とし、約 80,000 サイクルの熱衝撃試験を実施した。熱真空試験前後および熱衝撃試験の途中と最後に電圧測定検査を、熱衝撃試験の途中で断面観察をおこなった。

この検査項目をまとめたものを表 5.2.1-1 に示す。電圧測定検査については、定電流時の電圧降下量を測定することで電気接続に開放が無いかを検知し、圧着部の電氣的接続の健全性を確認することを目的としており、断面観察については熱衝撃試験によるリードの金属組織への影響を調べるために実施している。

表 5.2.1-1 クーボンの評価内容

L/N	検査項目	検査基準	試料数	備考
1	電圧測定 検査	・初期状態にくらべて、圧着 接続部の抵抗増大に起因す る定電流印加時の電圧の著 しい増大がないこと	リード線:全部/1 回 の試験フェーズ	
2	断面観察 (結晶組織 分析)	N/A	リード線:2 本/1 回	熱衝撃とともにリード内 で生じる現象をとらえる ことを目的として実施。 断面研磨とエッチングで 試料作成。

### 5.2.1.2 クーボンの接続機能の評価

#### (1) 電気試験による評価結果

本項では、圧着工法によってリード線を接続したクーボンを図 5.2.1-1 に示す熱衝撃試験の特定サイクルにおいて電圧測定検査を実施した結果について記載する。

クーボンの電圧測定検査の結果について、試料ごとの測定結果を図 5.2.1-2 にまとめた。図 5.2.1-2 では、試験開始からの各試料に定電流を流した際の電圧測定値の初期値に対する変化量(V)のトレンドグラフを示している。

このトレンドグラフでは試料までの配線抵抗等を含んでいるため、初期評価試料の電圧降下試験に比べて電圧値が高い値となっており、直接比較はできない。

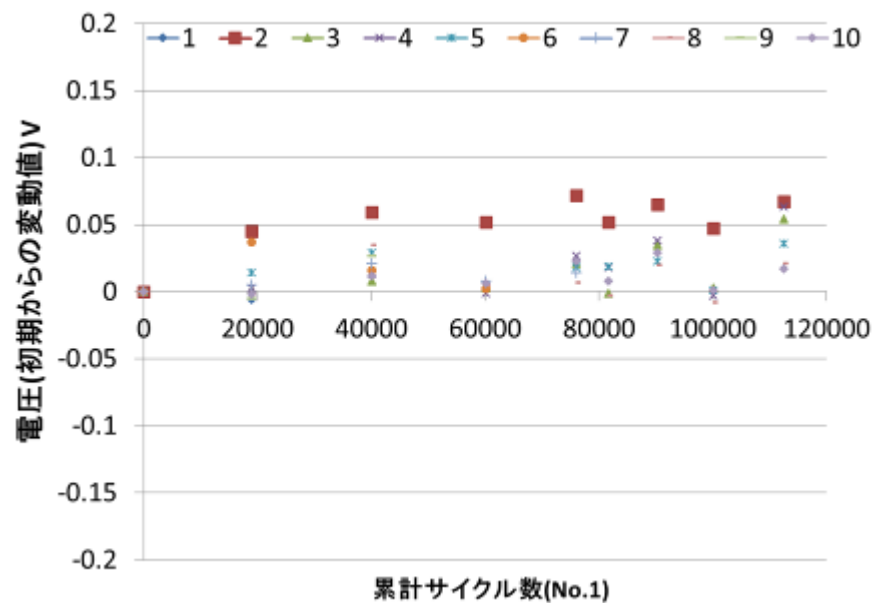
また図中では電圧測定が若干変動しているが、断線のような大きな抵抗の増大を示しておらず、また測定時の発熱や断面観察のための試料取り出しによる配線経路や配線長の変更等による変動であると考えられるため、圧着接合部としては問題ないと判断している。

このように電圧測定の測定値は大きな経時変化はなく、各熱衝撃試験後の電気特性は、経時変化や傾きの増大も見られず、衝撃試験の進行に対して大きな変化が生じていないことから、リードおよび圧着接続部で抵抗の著しい増大は見られず、11.2 万サイクルの熱衝撃試験の後でも電気接続機能に問題が生じていないことがわかった。

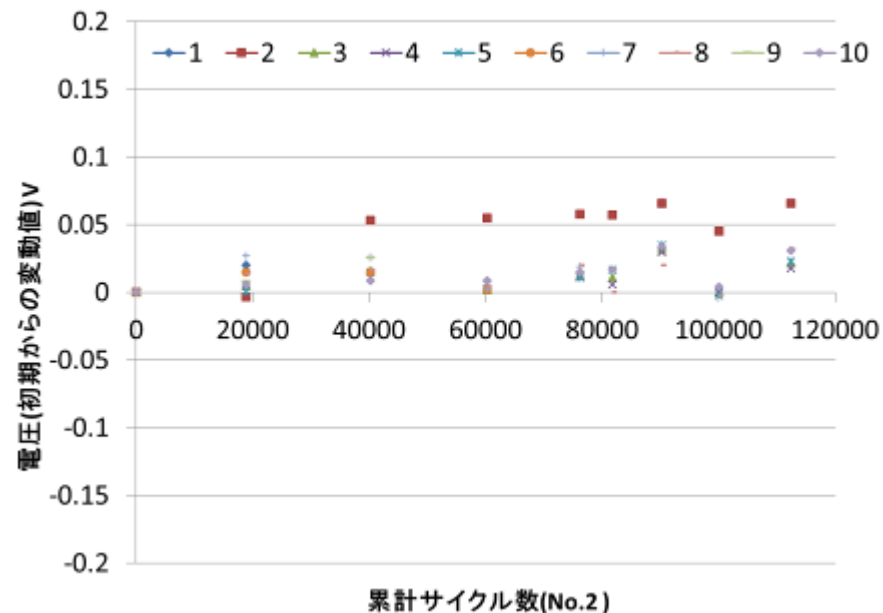
このことから、単線に対する圧着接続は電氣的接続が健全であることが分かった。

#### (2) 断面観察による評価結果

圧着接続クーボンの圧着接続部の断面の結晶組織観察の結果については、11.2 万サイクル後の結果を 5.2.1.3 項に、部分評価試料の結果とともに 5.3 項に記載する。



クーポン番号:1



クーポン番号:2

注;値は初期値に対する相対値

図 5.2.1-2 クーポン実装試料(1~10)の電圧測定検査のトレンドグラフ

## 5.2.1.3 クーポン試料の断面分析結果

累計約 11.2 万サイクルの熱衝撃試験負荷後の圧着接続クーポンから取り出した圧着試料の断面組織観察及びマイクロビッカースによる硬さ測定を実施した。圧着接続ダイオードクーポンの圧着部の断面組織観察の結果を図 5.2.1-3 と図 5.2.1-4 に、ビッカース硬度測定の結果を表 5.2.1-2 に示す。比較のため、図中には 7.5 万サイクル後に圧着接続クーポンから取り出した試料の図も載せている。

表 5.2.1-2 圧着接続ダイオードクーポンのビッカース硬度(Hv)

熱衝撃 サイクル数	測定箇所 (径方向) <sup>※</sup>	リード長手方向測定箇所
		圧着端部
約 7.5 万サイクル後	1/4	92.0
	1/2	83.0
約 11.2 万サイクル後	1/4	94.9
	1/2	82.3

※:リード断面幅に対するリードの圧着部側からリード径方向に向かう距離の比

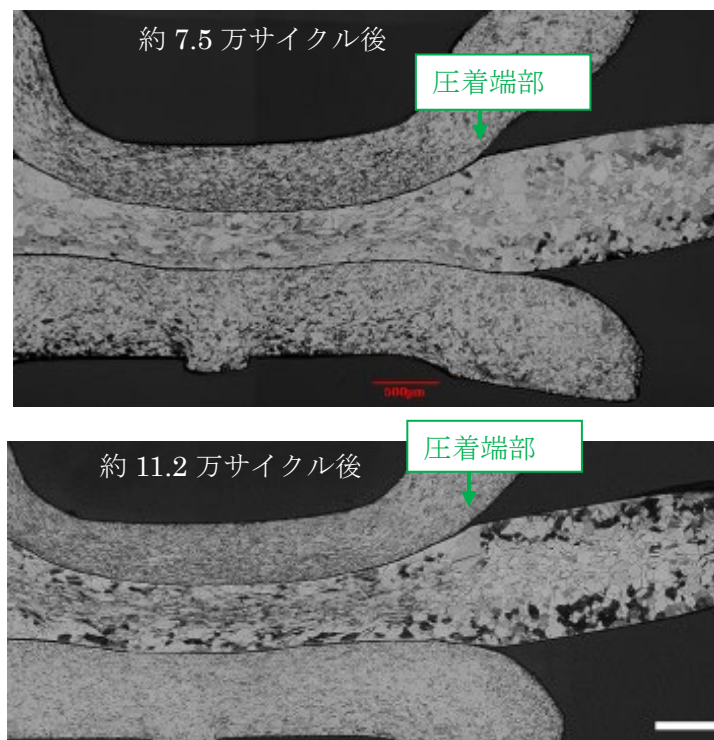


図 5.2.1-3 圧着試料(約 7.5 万(上)及び約 11.2 万サイクル後(下))の断面顕微鏡像

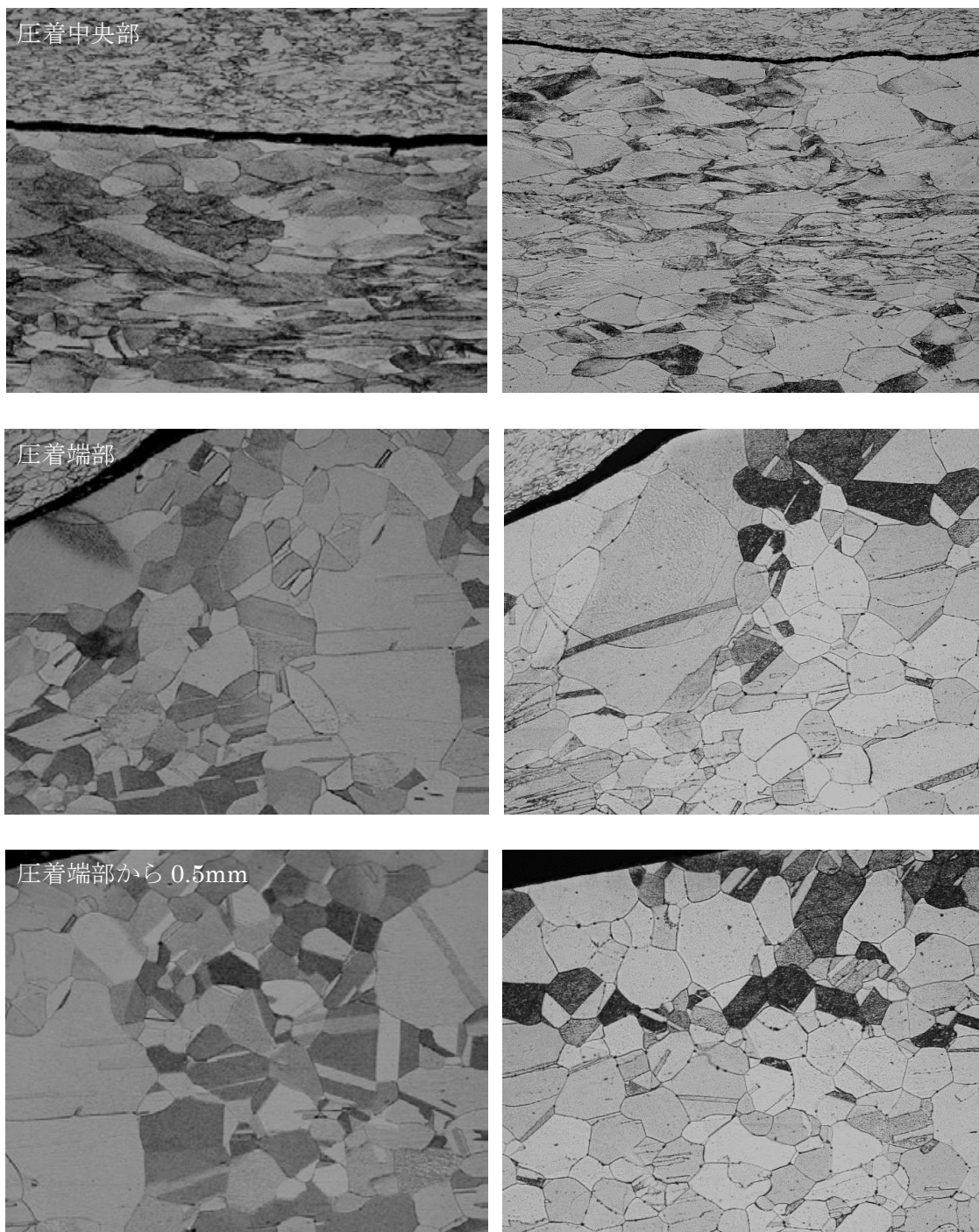
約 11.2 万サイクルの方が、熱衝撃サイクル数が多いものの、約 7.5 万サイクル後と比較して圧着部端部の結晶組織に明確な差はみられなかった。このことから、7.5 万サイクル以降の熱衝撃試験で結晶組織の変化は大きくなかったと推測される。

次にビッカース硬度の比較を行った。図 5.2.1-3 中に示す圧着部端部においては、ここは圧着部と非圧着部の境目であり、組織変化が大きい部分であるため位置による差異が大きいと考えられ、また、異なる試料間での比較が難しい点はあるものの、表 5.2.1-2 中のビッカース硬度を比較すると約 11.2 万サイクル後および約 7.5 万サイクル後ではおおむね同程度になっていることがわかる。このことは前記の結晶組織に明確な差がみられないことと一致している。引張強さとビッカース硬度には相関があることが知られていることから、上記の結果によって約 11.2 万および約 7.5 万サイクル後の圧着端部の引張強さには大きな差がないことが予想される。

なお、ビッカース硬度は約 11.2 万サイクル後の試料の方が以降に記載する部分評価サンプルとほぼ同じか若干高い値であった。この要因としては、クーポンに実装する試料ではリードを曲げる工程があるため、加工率が高くなっていることがあげられ、リード全体の初期の硬さが高いことによって直接比較することはできないことに注意が必要である。

このような実装時の製造(加工)による影響等があるが、クーポン試料のビッカース硬度としては全体的に高い値を保っており、また図 5.2.1-4 に示す通り、結晶組織も約 7.5 万サイクルと大きな違いがみられないことから、引張強さとしては約 7.5 万サイクル時点と同等であると予想され、機械的接続機能としては十分であると考えられる。





(左図:約 7.5 万サイクル後、右図:約 11.2 万サイクル後)

図 5.2.1-4 圧着中央部の顕微鏡画像

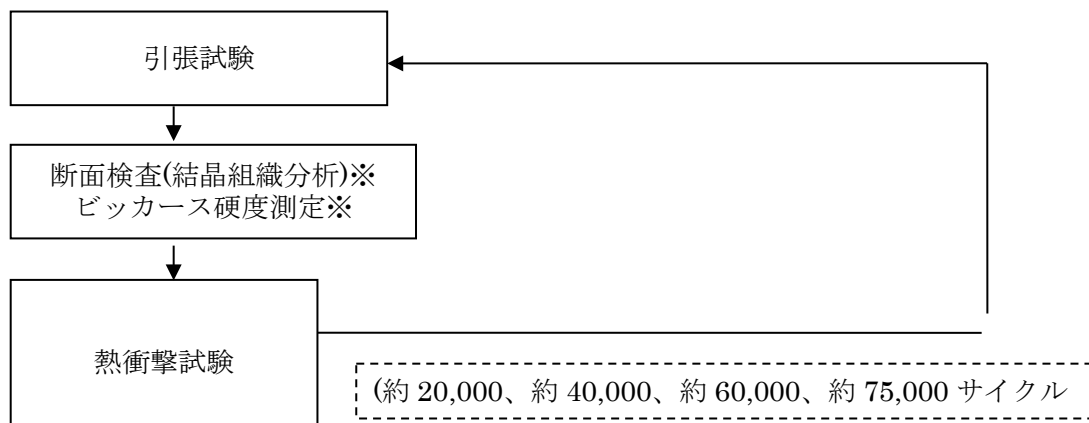
5.2.2 部分評価試料による評価

5.2.2.1 部分評価試料の試験内容

電気接続機能の確認としてはクーポン試料を用いたが、熱衝撃試験進行に伴う試料状態の変化をモニタするために部分評価試料についても熱衝撃試験を実施した。

実装状態を模擬して実装状態で評価を行うクーポンの試料に対して、部分評価試料はクーポンでは実施できない引張試験等を実施するのに用いた。

一定の熱衝撃試験を実施後の試料について引張試験および圧着部の金属組織の変化を見るための断面観察とビッカース硬度測定を行った。この部分評価試料による熱衝撃の影響の評価試験フローを図 5.2.2-1 に、検査項目をまとめたものを表 5.2.2-1 に示す。



※:約 40,000、約 60,000、約 75,000 サイクル後に実施

図 5.2.2-1 部分評価試料の試験フロー

表 5.2.2-1 部分評価試料の評価内容

L/N	検査項目	検査基準	試料数	備考
1	電圧測定 検査	・初期状態にくらべて、 圧着接続部の抵抗増大 に起因する定電流印加 時の電圧の著しい増大 がないこと	リード線:全部/1 回 の試験フェーズ	
2	断面観察 (結晶組織 分析)	N/A	リード線:2 本/1 回	熱衝撃とともにリード内で 生じる現象をとらえることを 目的として実施。断面研 磨とエッチングで試料作 成。

## 5.2.2.2 部分評価試料による接続機能の評価

## (1) 引張試験による機械的接続の評価結果

クーポン試料とは別に、圧着工法によってリード線を圧着スリーブに接続した部分評価用試料を作成し、熱衝撃試験を実施するとともに、累計約 2 万、4 万、6 万、7.5 万サイクルにおいて引っ張り試験を実施した。その結果について、以下に示す。

部分評価用試料の引張試験における破断モード判定結果を表 5.2.2-2 に示す。表中の破断モード分類は宇宙用電気配線工程標準 JERG-0-041B と同じもので表記しており、A はスリーブ内圧着部で導体が破断、B は圧着接点の外部で破断となっているが、スリーブ端部よりも圧着部側でのリード破断であっても圧着部での破断でなければ B モードとしている。また、試験は JERG-0-041B に基づき  $25.4\text{mm} \pm 6.3/\text{min}$  の引張速度で実施した。

表 5.2.2-2 中の各熱衝撃負荷後の引張強さは全ての試料でより線の規格値以上の値となっており、熱衝撃試験を経ても本試料の圧着部は機械的接続機能を十分に有していることが確認できた。このことから、前項に記載のように電氣的接続に問題がなかったのみならず、熱衝撃試験を負荷した後も引張強さの値としては規格値に対して十分高く、リードとスリーブは約 8 万サイクルの熱衝撃に対して機能上問題なく使用できる寿命を有することが分かった。

表 5.2.2-2 部分評価用試料(圧着)の引張強さと破断モード判定結果サマリ

サイクル数	引張試験力(N)	破断モード
0	123.2	B
	212.8	B
	208.6	B
	206.2	B
	212.4	B
19,693	109.4	A
	164.9	B
	125.0	A
	111.1	A
	161.2	B
41,297	178.8	B
	162.3	B
	160.8	A
	145.6	B
60,418	145.6	B
	123.9	A
	157.4	A
	141.3	B
76,070	146.2	A
	149.1	A
	145.3	A
	150.8	A

その一方で、表 5.2.2-2 に示されるように、リード線については 2 万サイクルで破断モードが、熱サイクル未負荷の試料の A モードから B モードへ変化する試料が生じるとともに引張強さが低下した。この引張強さの変化を示すため、各熱衝撃サイクル数での引張強さのトレンドグラフを図 5.2.2-2 に示す。

図 5.2.2-2 のトレンドグラフについては、熱衝撃を負荷していない試料を初期の引張強さとして考え、熱衝撃を負荷していない試料の引張強さの平均値に対する各取出しサイクル数での引張強さの百分率で表示している。

熱衝撃を負荷していない試料に比べて2万サイクルの熱サイクルを負荷した試料では、増えた破断モードはリード側圧着部付近のリードが破断となっており、熱衝撃によって圧着部付近で機械特性が変化していることが示唆される。また、4万サイクル後の試料を2万サイクル後の試料に対して比較した場合、引張強さに低下は見られずまた破断モードについてもAモードとBモードが混在しており、大きな差異は見られなかった。このことから、圧着試料については機械的な接続についても2万サイクルから劣化していないと考えられる。

以上のことから、熱衝撃の繰り返しにより、熱衝撃試験の初期段階において圧着部付近で、例えば圧着時の塑性変形によってリード線側に亀裂が形成され熱衝撃負荷によりクラックが進展したなど、なんらかの現象が進行している可能性が示唆される。

このため、約8万サイクル後の引張強さとしては十分高い値を保っておりものの、引張強さ低下の原因を調査する必要がある。このため、もともと部分評価試料でのDPAには引張試験を想定していたが、この原因調査のために金属組織の観察(結晶組織分析)を途中から行うこととした。

次の項で圧着部の断面分析によって2万サイクル以降での破断モードが変化した原因について調査した結果について記載する。

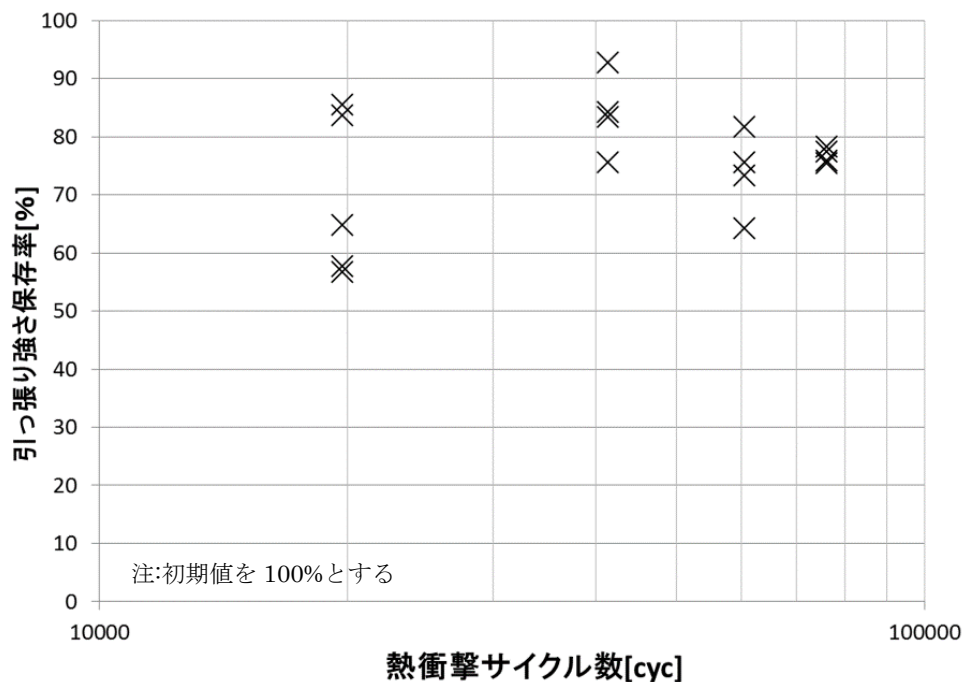


図 5.2.2-2 圧着接続部分評価試料のリード部引張強さの熱衝撃サイクル数依存性

### 5.2.3 単線に対する圧着の接続機能の評価結果

この評価結果から、初期のみでなく低軌道環境の約8万サイクルの熱衝撃の繰り返し後も単線に対する圧着接続は電氣的にも機械的にも十分な接続機能を有しており、熱衝撃に対する寿命に問題がないことが分かった。

### 5.3 引張試験への熱衝撃試験の影響要因の検討

5.2.2.2 項に記載の通り、2万サイクルでの引張強さの値としては十分高いものの、破断モードが引き抜きではなくリード部の破断であり、破断部が圧着部に近いため、熱衝撃で圧着部に負荷が加わっている可能性もあるため、この原因を調査するため約4万、7.5万サイクルの熱衝撃を負荷した部分評価試料とクーポンの圧着部の断面観察を行った。

断面観察は図5.3-1に模式図で示す部分で行い、エッチングにより金属結晶組織が圧着部位付近でどのように変化しているかを観察するとともにリード線の局所的な強度の指標とするために図中の青色の◇部分でビッカース硬度測定を実施し、各部位の硬度を調べた。

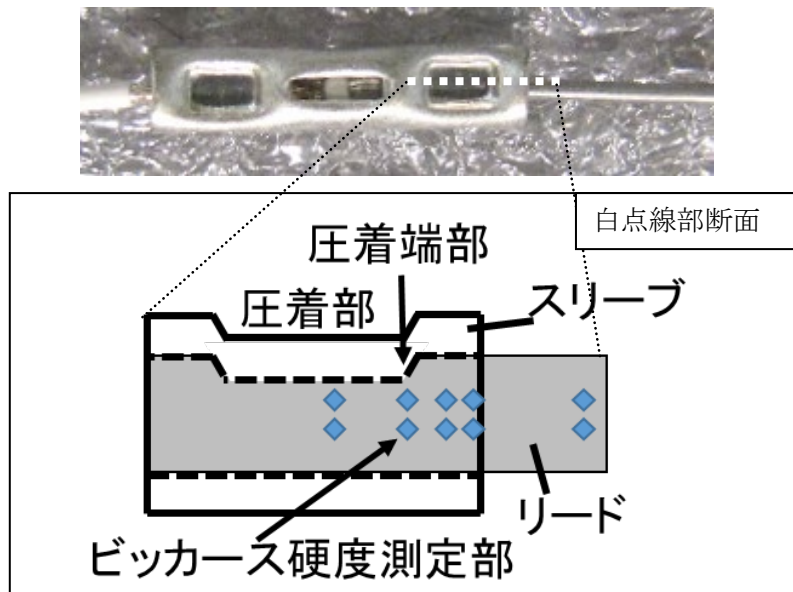


図 5.3-1 圧着接続部の断面観察を示す模式図

#### 5.3.1 圧着工法試料分析結果の破断モードと引張試験の変動原因の考察

累計約4万サイクルの熱衝撃試験負荷後の部分評価試料と、比較のために新たに圧着によってリードおよびスリーブを接続して初期状態を模した部分評価試料とに対し、圧着部長手方向の試料調製と顕微鏡による詳細組織観察結果及びマイクロビッカースによる硬度測定を実施した結果について図5.3.1-1(初期)、図5.3.1-2(約4サイクル後)に示す。

図5.3.1-1と図5.3.1-2共に、上の写真は結晶組織を下の写真はビッカース硬度測定位置を示す。各図中の下側の図で示される硬度測定的位置は左から圧着中央部、圧着端部、圧着端部から約0.5、1、3mmの位置で実施した。各図中の表はビッカース硬度(Hv)を表し、表中の1/2は上下方向リード中心部、1/4はリード外周とリード中心との中間点を表す。

図5.3.1-1の初期状態を模した試料の結晶組織写真において、圧着部は非圧着部に比べて結晶粒が微細化していることがわかる。圧着とは、変形によって機械的接触を形成する工法であることから、リードの圧着部で塑性変形による加工硬化が生じていると考えられる。

実際にビッカース硬度も非圧着部に比べて圧着部は2倍程度になっており、加工硬化が生じていることがわかる。このビッカース硬度の増大は圧着部中央以外にも圧着部端部においても生じているが、圧着部端部では圧着中央部に比べて変形量が少ないことに応じてビッカース硬度の増大も小さくなっている。

一般的にビッカース硬度は引張強さと相関を持つため、圧着部(中央部から端部付近にかけて)では加工硬化により引張強さが増加していることが推測される。このことから初期試料においては圧着部では引張強さが増大しており、リード自体が先に破断したため、破断モードがBモードになったと推測される。

圧着中央部および圧着端部をより詳細に顕微鏡観察した画像を図5.3.1-3と図5.3.1-4に示す。図5.3.1-3の左右の写真は、それぞれ図5.3.1-1、図5.3.1-2中の白破線の四角囲み部の断面を示す。スリーブとリードはどちらも銅母材であるが結晶組織の大きさが異なっているのがわかる。

図5.3.1-4の左右の写真は、図5.3.1-1、図5.3.1-2中の緑色記載の圧着端部の相当する部分となる。図5.3.1-4においては、試料にクーボン中に実装したものをもちい、研磨ひずみの影響を除いて結晶粒の状態を観察するためイオンミリングによって試料を調整し、電界放出形走査電子顕微鏡(FE-SEM)で観察している。

図5.3.1-3および図5.3.1-4中の初期試料と4万サイクル後の試料を比較すると、圧着部のリード外周部および圧着部端部の粒界が少なく、また結晶粒が大きくなっていることがわかる。このことから、これらの箇所では熱衝撃試験での高温負荷時に加工硬化した組織内で回復が生じているものと推測される。実際に、図5.3.1-1と図5.3.1-2中のビッカース硬度を比較すると圧着部のリード外周部および圧着部端部の黒色が薄くなっている部分では4万サイクルの熱衝撃後の試料において低い値になっている。

特に圧着部端部においては、組織形態の変化が大きくなっている部分であるため位置による差異が大きいと考えられ、異なる試料間での比較が難しい部分はあるものの、初期試料に比べて熱衝撃後の試料では硬度が最も大きく低下しており、このことは圧着部端部の引張強さが最も大きく低下していることを示している。また、図5.3.1-4中の初期試料と4万サイクル後の試料の比較によりクーボンに実装した試料でも圧着部付近で回復が生じていることがわかり、部分評価試料と同様の現象がクーボンにおいても生じていることが確認できる。

したがって初期試料がリード部で破断したのに対し熱サイクル後に圧着部端部で破断するものが出てくるようになったのは、初期においては圧着部端部において加工硬化により引張り強さが大きくなっており、相対的にリードの非圧着部が破断しやすかったのに対し、熱衝撃試験後では熱衝撃時の熱により回復が生じかつ圧着部の断面積が非圧着部に比べて小さいため、初期試料に比較して熱衝撃試験後の試料の圧着部端部で引張強さが低下し、圧着部端部において破断するようになったためと推測される。

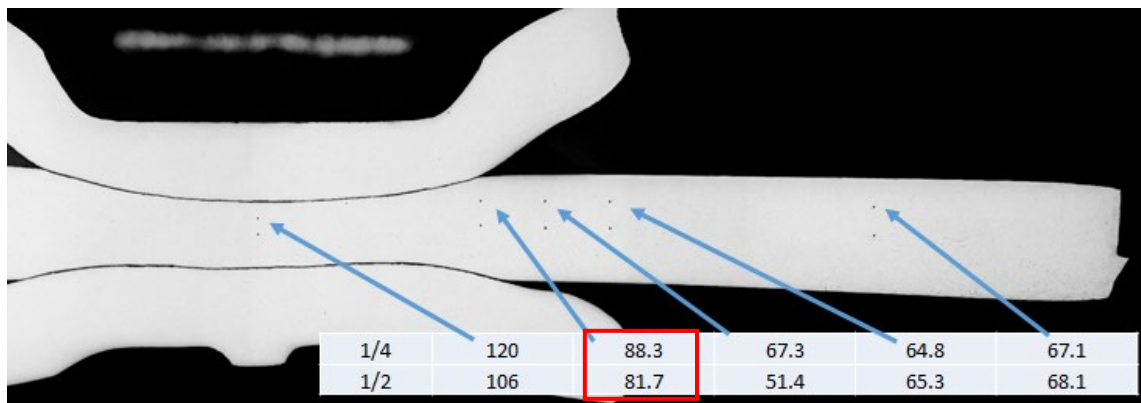
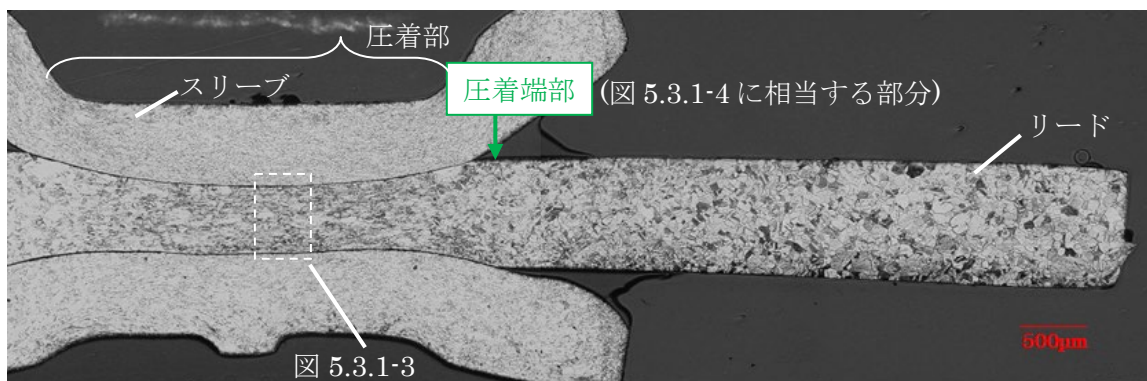


図 5.3.1-1 圧着試料(初期)の断面顕微鏡像

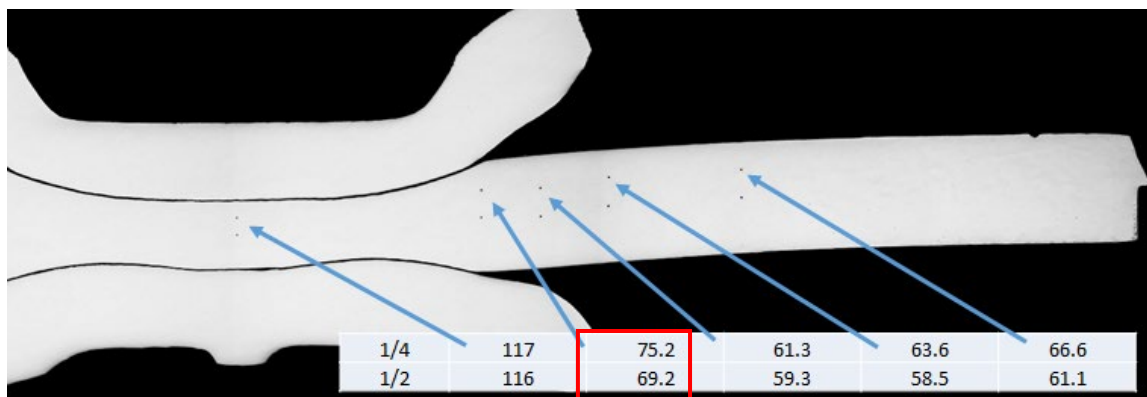
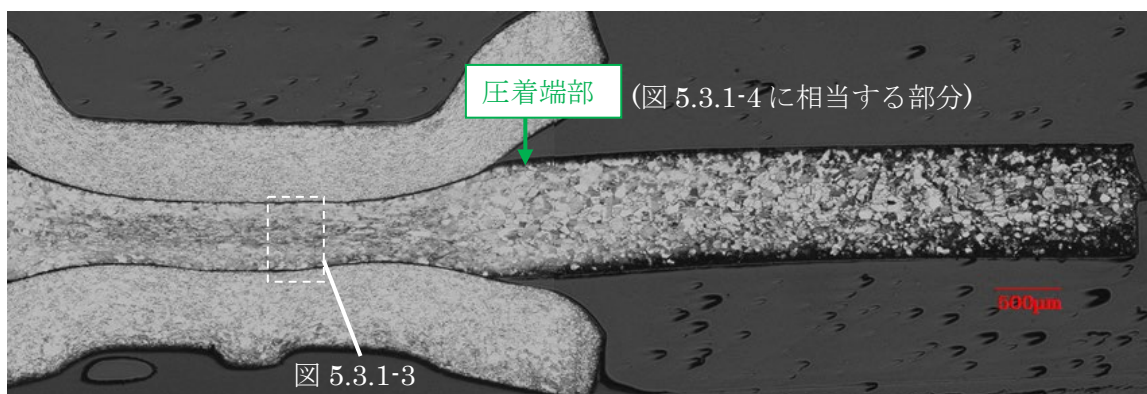
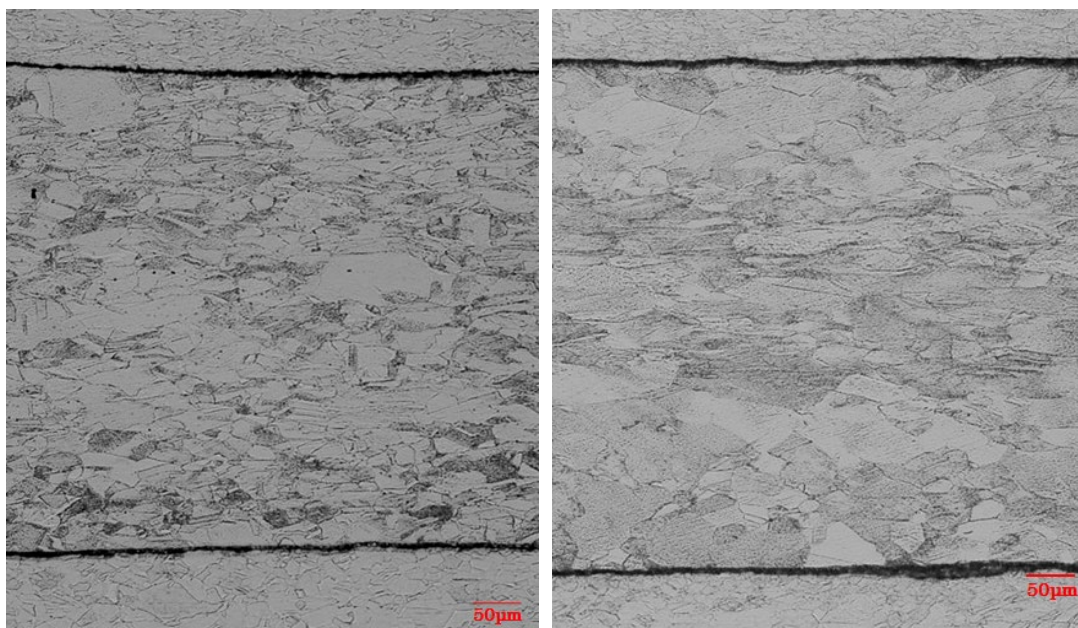
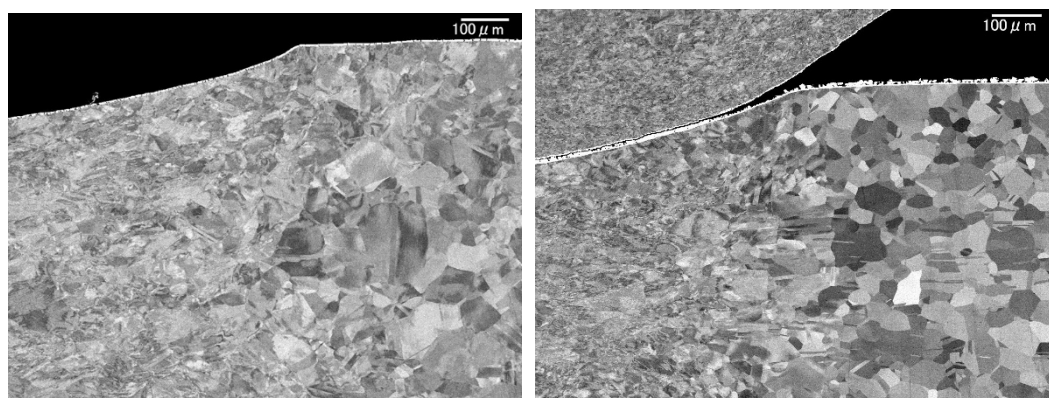


図 5.3.1-2 圧着試料(約 4 万サイクル後)の断面顕微鏡像



(左図：初期試料、右図：約4万サイクル後)

図 5.3.1-3 圧着中央部の顕微鏡画像



(左図：初期試料、右図：約4万サイクル後)

図 5.3.1-4 圧着部端部の顕微鏡画像

このような傾向が4万サイクル以降でも継続するかを確認するため、熱衝撃試験約7.5万サイクル後の部分評価試料の断面組織観察を実施した。その結果の写真を図 5.3.1-5 に、ビッカース硬度測定の結果を表 5.3.1-1 に示す。この図から4万サイクル後の結晶組織に比べてリードの圧着端部付近の結晶粒が大きくなり、回復・再結晶が継続していると考えられる。

一方で、これらの試料の圧着端部付近のビッカース硬度については初期に比較して低下しているものの、4万サイクル後の試料と同程度となっている。約7.5万サイクル後非圧着部のリード部分のビッカース硬度が比較的高いため、元のリードの状態によって異なっている部分はあるが、硬度の低下としては落ち着いてきていることから、引張強さの大きな低下要因とはならないと考えられる。



表 5.3.1-1 部分評価用試料(圧着)のビッカース硬度(Hv)

熱衝撃 サイクル数	測定箇所 (径方向)	リード長手方向測定箇所(表中の距離は圧着端部からの距離を表す)				
		圧着中央部	圧着端部	0.5 mm	1 mm	3 mm
0	1/4	120	88.3	67.3	64.8	67.1
	1/2	106	81.7	51.4	65.3	68.1
41,297	1/4	117	75.2	61.3	63.6	66.6
	1/2	116	69.2	59.3	58.5	61.1
76,070	1/4	121	73.9	78.9	78.3	77.0
	1/2	116	77.8	67.5	69.4	65.5

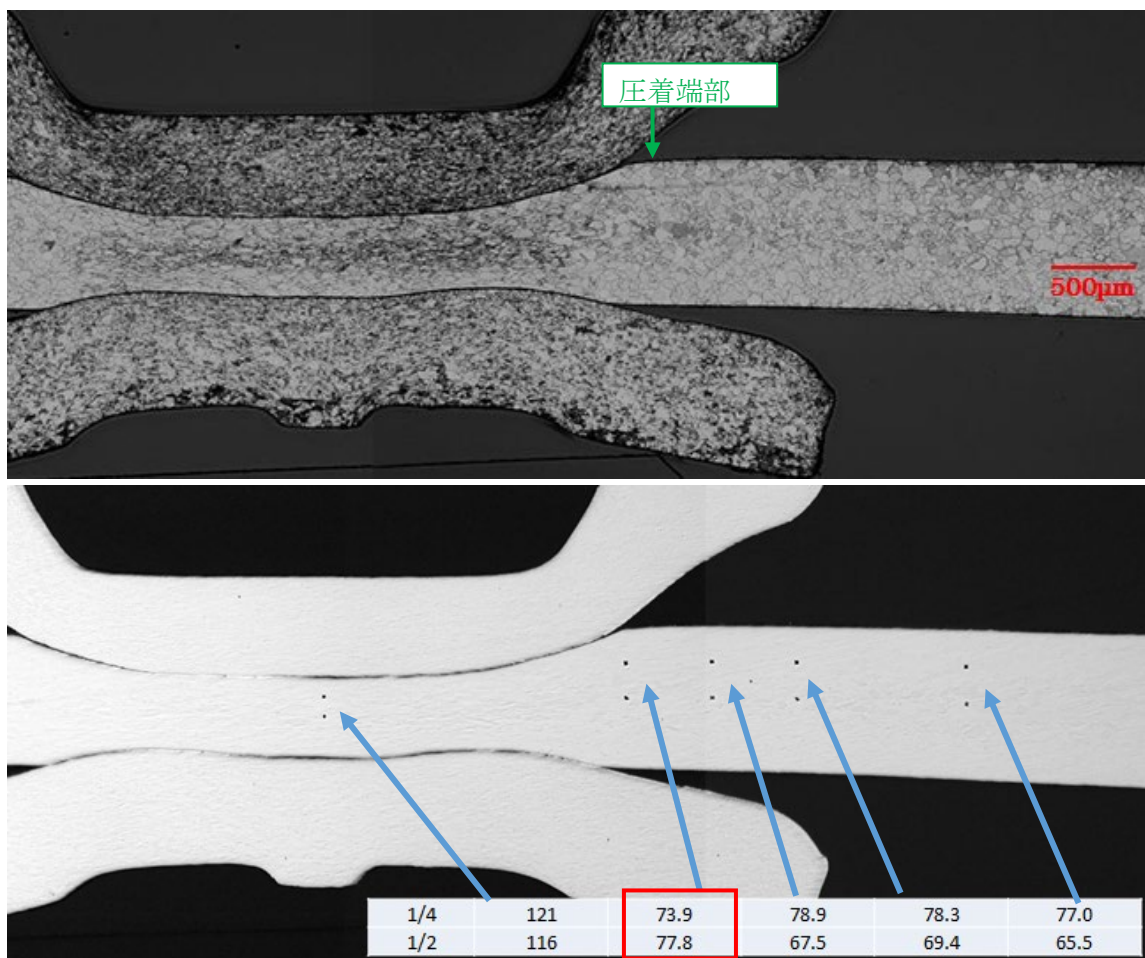


図 5.3.1-5 約 7.5 万サイクル後の圧着試料の断面顕微鏡像

### 5.3.2 考察結果のまとめ

本項の結果から、圧着部の断面組織観察およびビッカース硬度測定により、特に圧着部端部で加工硬化した銅組織の回復が生じている可能性が高いことが分かった。実際に結晶粒の粗大化とともにビッカース硬度が低下している部分の近傍部分が、破断モードが変動した際の破断位置となっており、現在の現象と一致している。

以上のことから引張試験における破断モードが変化した原因としてはリードの銅組織回復によるものと推定される。以上の結果から、圧着工法における破断モードが加工硬化の回復によって変化するメカニズムを解明することができた。この結果から、環境温度にも依存するが、十分な熱にさらされる前の状態の圧着部は圧着前に比べて脆くなり、せん断応力に弱くなっていることが示唆されるため、機械環境やハンドリングには注意を払う必要がある。

## 6. 本評価のまとめ

本評価の結果をまとめると次の通りとなる。

- ・ 初期特性評価(電圧降下測定、引張試験、外観検査、断面観察)を行い、5.1 項で示したようにいずれの評価もより線に圧着工法を適用した場合と同等の規格値を満たした。
- ・ 圧着工法を適用したリード線を、太陽電池パネルを模擬したクーポン上に実装し、約 8 万サイクルの熱衝撃試験を実施した。
  - クーポンに対する熱衝撃試験の途中及び最後に実施した電圧測定検査から、太陽電池パネルの電力を電送する電気接続機能に問題となる劣化は認められなかった。
  - 部分評価用試料について、熱衝撃試験の途中で取り出し、破壊試験として引張試験をおこなった結果、初期から 8 万サイクル後までの全ての試験で、より線に適用される規格値を満たした。
  - ◇ 部分評価用試料の圧着接続試料において断面観察を実施し、初期試料ではリード部の破断(B モード)だったものが、熱衝撃試験負荷後には圧着部付近での破断(A モード)が生じるようになった要因について検討を行った。  
その結果、熱衝撃未負荷の初期では、圧着部において圧着による加工硬化が生じ強度が増大するが、熱衝撃試験を経ることによって主に圧着部端部で加工硬化が一部回復し、圧着部のリードの強度が低下したと推定した。
  - ◇ 熱衝撃試験を経るにしたがってリード自体の特性によって引張強さが変化することから、初期評価試料による製造工程のみならずリード自体の特性を評価して使用することが重要である。

これらの結果より、今回の試験で用いた評価試料は該当する温度環境の約 8 万サイクルの熱衝撃負荷後でも電気的および機械的に接続機能を有し、約 8 万サイクルの熱衝撃寿命(低軌道周回衛星の 7 年×2MDC\*相当)を有することが確認できた。

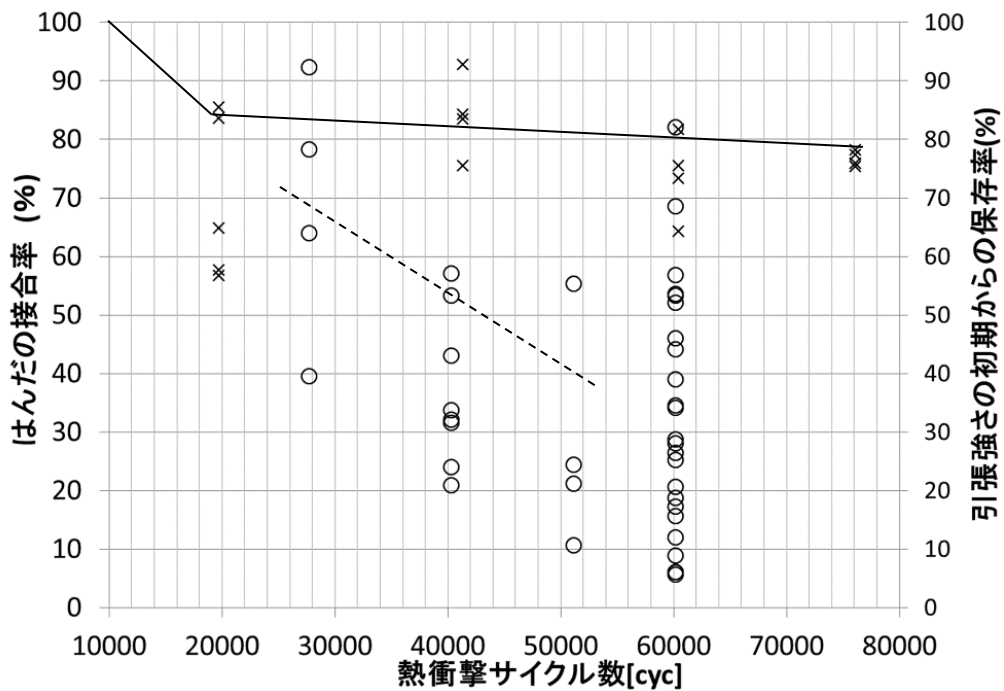
※; Mission Duty Cycle

更に、クーポン試料に累計約 11.2 万サイクル(低軌道周回衛星の 10 年×2MDC 相当)までの熱衝撃試験を追加で実施し(5.2 項)、以下の結果が得られた。

- ・ 11.2 万サイクル後においても開放故障等の電気機能に問題がないことを確認した。
- ・ 7.5 万サイクル後のクーポン試料のビッカース硬度と断面分析との比較から、11.2 万サイクル後における機械的接続機能の健全性を確認した

よって、追加の試験により約 11.2 万サイクルの熱衝撃負荷後でも電気的および機械的に接続機能を有し、約 11.2 万サイクルの熱衝撃寿命を有することが確認できた。新規接続方法を検討するに際しては、接続部のみならず実際のパネルの仕様を模擬した試料を用いて、実際のミッションに相当する以上の熱衝撃回数を加えることによって設計全体の熱衝撃に対する長期信頼性を実証することが重要である。

また、はんだ接続の熱衝撃試験によるクラックを除いた接合率と本評価の引張強さの熱衝撃による変化を比較すると図 6-1 となる。はんだ接続では熱衝撃試験の進行とともにリードとはんだとの接続される長さが圧着接続の引張強さに比べて有意に低下していることがわかる。はんだ接続の場合、6 万サイクル程度において断面によってははんだがリードに対してほとんど接続していない部分がみられるようになってしまい機械的にはほぼ接続が取れていない面が現れることがわかる。これに対し圧着工法で接続したリードについては熱衝撃試験の進行により圧着部の加工硬化の回復が生じ、圧着部近くで破断するようになるとともに引張強さが低下するが、約 8 万サイクルにおいても初期からの劣化率は小さく、約 8 万サイクルでは機械的接続機能を十分に有していることがわかる。



注:初期値を 100%とする。図中の線は目線ガイド用(実線:圧着、破線:はんだ)

図 6-1 部分評価試料の引張強さ(×)と Sn96 はんだの接合長さ(○)の保存率

なお、製造直後に圧着部は加工硬化により硬くなり、引張強さに対しては高くなっている。しかし、剪断に対しては弱くなっていることが想定される。今回の評価ではダイオード本体やリード部を、過去に評価実績のある方法で固定し、ロケット打上げ時の機械環境で影響を受けない(過大な振動が加わらない)実装形態としていることから振動試験等は実施していない。

ダイオード本体やリード部の固定方法に対して、ロケット打上げ時の機械環境を想定した評価を実施していない場合は、本評価に加えて実施する必要がある。

## 7. 用語集

- ・リード線

電気部品用の配線材。この文書では特に単線のことを示す。

- ・部分評価用試料

圧着部を模擬してリード線と圧着スリーブを圧着して作成された試験用試料。

- ・クーポン

実際の太陽電池パネルの構造を模擬して保持基板上に試験対象部品が実装された、比較的小さい試験用試料。

- ・太陽電池パネル(Solar Array Panel: SAP)

ここでは保持基板上に太陽電池セルが実装された宇宙用の太陽電池パネルを示す。

- ・太陽電池パドル

太陽電池パネルと衛星本体に対する保持機構とからなる太陽電池電源部を示す。