

宇宙転用可能部品の宇宙適用ハンドブック (JERG-0-052)技術データ集

2024年05月24日 初版

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
2.1 適用文書	1
3 技術データー覧	2
付録:	

技術データ 1	地上田半導体部品の宇宙適用性評価 1	-1

1 総則

本文書では、「宇宙転用可能部品の宇宙適用ハンドブック(JERG-0-052)」において引用 される参考情報について、その詳細情報を示す。宇宙転用可能部品の宇宙適用のための評 価にあたり、本書を参考に、JERG-0-052の利活用が進むことを期待して制定する。

1.1 目的

本文書は、JERG-0-052 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-0-052の利用に資することを目的とする。

1.2 適用範囲

本書は、宇宙転用可能部品の宇宙適用のための評価事例を参考情報として示すものである。

2.1 適用文書

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-0-052 ; 宇宙転用可能部品の宇宙適用ハンドブック

(2) 公共規格など

a.	JESD22-A110	; HIGHLY ACCELERATED TEMPERATURE AND
		HUMIDITY STRESS TEST (HAST)
b.	MIL-STD-883	; DEPARTMENT OF DEFENSE TEST METHOD
		STANDARD MICROCIRCUITS

3 技術データー覧

本文書に示す技術データについて、上位文書である JERG-0-052 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-0-052 引用項番
1	地上用半導体部品の宇宙適用性評価	4.4.5, 4.4.8

技術データの詳細内容について、各付録に示す。

技術データ1 地上用半導体部品の宇宙適用性評価

	$\gamma \rightarrow$
н	11/1
_	

1	はじめに	1-3
2	本評価で想定した地上用半導体部品を宇宙適用する上でのリスク	1-4
2.	1 本評価の対象部品	1-4
2.	2 本評価で想定したリスク	1-5
3	地上用半導体部品の接合部構造調査	1-6
4	検証方法	1-10
5	検証結果	1-12
5.	1 HAST 試験の検証結果	1-12
5.	1.1 腐食	1-13
5.	1.2 金属間化合物の成長	1-16
5.	1.3 カーケンタルボイドの生成	1-17
5.	1.4 クラック	1-18
5.	2 熱サイクル試験の検証結果	1-19
5.	2.1 クラック	1-20
5.	3 機械的環境試験の検証結果	1-21
5.	3.1 チップ内部のクラック	1-22
5.	3.2 ボール内部のクラック	1-27
6	確認されたリスクの調査	1-28
6.	1 イオンクロマトグラフィーによるハロゲン含有率の調査	1-28
6.	1.1 イオンクロマトグラフィーの概要	1-28
6.	1.2 イオンクロマトグラフィーの結果および考察	1-29
6.	2 C-SAM によるチップクラックの要因調査	1-31
6.	2.1 C-SAM の概要	1-31
6.	2.2 C-SAM の結果および考察	1-31

図表一覧

図 2-1	ワイヤボンディング部品の構造
送 2-2	フリップチップ部品の構造

- 表 3-1 ワイヤボンディング部品 10 品種の構造一覧
- 表 3-2 フリップチップ部品 10 品種の構造一覧
- 図 4.1 試験フロー

表 5.1-1	HAST 試験の検証結果(ワイヤボンディング部品)
表 5.1-2	HAST 試験の検証結果(フリップチップ部品)
図 5.1-1	識別 No.10 の接合断面(初期状態、HAST 試験後)
図 5.1-2	識別 No.16 の接合断面(初期状態、HAST 試験後)
図 5.1-3	識別 No.43 の接合断面(初期状態、HAST 試験後)
図 5.1-4	識別 No.38 の接合断面(初期状態、HAST 試験後)
図 5.1-5	初期断面比較(識別 No.10、識別 No.16)
図 5.1-6	識別 No.10 の接合断面(初期状態、HAST 試験後)
図 5.1-7	識別 No.16 の接合断面(初期状態、HAST 試験後)
図 5.1-8	識別 No.45 の接合断面(初期状態、HAST 試験後)
図 5.1-9	識別 No.16 の接合断面(初期状態、HAST 試験後)
図 5.1-10	識別 No.55 の接合断面(初期状態、HAST 試験後)
図 5.1-11	識別 No.16 の接合断面(初期状態、HAST 試験後)
図 5.1-12	識別 No.39 の接合断面(初期状態、HAST 試験後)
表 5.2-1	熱サイクル試験の検証結果(ワイヤボンディング部品)
表 5.2-2	熱サイクル試験の検証結果(フリップチップ部品)
⊠ 5.2-1	識別 No.16 の接合断面(HAST 試験後、熱サイクル試験後)
⊠ 5.2-2	識別 No.39 の接合断面(HAST 試験後、熱サイクル試験後)
表 5.3-1	機械的環境試験の検証結果(ワイヤボンディング部品)
表 5.3-2	機械的環境試験の検証結果(フリップチップ部品)
⊠ 5.3-1	識別 No.39 の接合断面(HAST 試験後、機械的環境試験後)
表 5.3-3	フリップチップ部品の構造一覧
図 5.3-2	振動・衝撃試験による応力
図 5.3-3	バンプピッチ(チップクラックあり、なし)
図 5.3-4	ワイヤボンディングおよびフリップチップ部品の構造
図 5.3-5	観察断面(初期品)※識別 No.38
図 5.3-6	観察断面(機械的環境試験後)※識別 No.38
図 5.3-7	識別 No.16 の接合断面(HAST 試験後、機械的環境試験後)
図 5.3-8	識別 No.44 の接合断面(HAST 試験後、機械的環境試験後)
表 6.1-1	イオンクロマトグラフィー結果
⊠ 6.1-1	HAST試験後の接合断面
表 6.1-2	腐食度合いとハロゲン含有量の関連性
図 6.2-1	断面研磨前の C-SAM 結果
図 6.2-2	断面研磨後の C-SAM 結果
図 6.2-3	識別 No.33 チップ配線層断面
図 6.2-4	チップ内構造

1 はじめに

低コスト化や高性能化に対応するため、宇宙用部品とは異なる構造の地上用半導体部品 の適用を検討する機会が増えることが見込まれる。そこで、JERG-0-052A を参考にした 実証を行い、技術データの蓄積を行った。本評価では、地上用半導体部品の構造の中でも 半導体チップとサブストレートの接合に着目し、想定したリスクに対する検証を行っ た。本書ではその検証事例を紹介する。

2 本評価の対象部品と想定した地上用半導体部品を宇宙適用する上でのリスク

2.1 本評価の対象部品

本評価は地上用半導体部品のワイヤボンディング部品、フリップチップ部品を対象とし て実施した。各部品の構造を以下に示す。

<ワイヤボンディング部品>

ワイヤボンディング部品とは、サブストレートに実装されたチップのパッドにワイヤ をボンディングし、ボンディングワイヤおよびチップ全体をモールド樹脂埋めした構造 の部品である。図 2-1 にワイヤボンディング部品の構造を示す。



図 2-1 ワイヤボンディング部品の構造

<フリップチップ部品>

フリップチップ部品とは、チップを反転(フリップ)してサブストレートにチップを 実装し、チップとサブストレート間にアンダーフィル材を注入、さらにチップ全体を樹 脂埋めした構造の部品である。図 2-2 にフリップチップ部品の構造を示す。



図 2-2 フリップチップ部品の構造

2.2 本評価で想定したリスク

<腐食>

- 事象:部品内部(主にモールド樹脂中)に吸湿された水分が接合部に侵入することで 金属間化合物層を腐食させ、その腐食の進行によって接合が断たれること。 要因:時間経過による吸湿と高温(部品の保管環境等)
- <金属間化合物の成長>
 - 事象:高温環境で脆い金属間化合物層が成長すること。
 - 要因:宇宙環境における高温

<カーケンタルボイドの生成>

事象:高温環境による化合物層の成長によってボイドが発生し、接合が断たれること。 要因:宇宙環境における高温

- <クラック>
 - 事象:急激な温度変化による熱応力や、振動・衝撃による機械的応力によって接合部の 化合物層に亀裂が入り接合が断たれること。
 - 要因:宇宙環境における温度変化、ロケット発射時の振動・衝撃

3 地上用半導体部品の接合部構造調査

本検証には地上用半導体部品からワイヤボンディング部品 10 品種、フリップチップ部品 10 品種を使用した。ワイヤボンディング部品は Au ワイヤの 5 品種、Cu ワイヤの 5 品種を 選定している。それぞれのワイヤの選定基準は以下の通り。また、表 3・1 にワイヤボンディ ング部品の 10 品種の構造一覧を示す。

・Au ワイヤ 5 品種:ワイヤ径 15um~30um まで、

ボンド幅 30um~65um の範囲で選定

・Cu ワイヤ5品種:ワイヤ径15um~25umまで、

ボンド幅 30um~80um の範囲で選定

識別 No	①接合 構造	②ワイヤ 材料	③電極 パット材料	ワイヤ 接合幅 [μm]	動作温度 [℃] (カタログ値)	モイスチャー レベル (カタログ値)	断面構造
3	Au-Au 接合	Au	Au めっき 下地:W	60	-40 ~ +85	_	
10	Au-Al 接合	Au (Pd 添加)	Al めっき 下地:Ti	54	-40~+85	3	
16	Au-Al 接合	Au	Al めっき 下地:Ti	31	0~+85	3	
25	Au−Al 接合	Au	Al めっき 下地:Ti/Ta/Cu	37	-40~+105	-	
28	Au-Al 接合	Au (Pd 添加)	Al めっき 下地:Ti/Ta	35	0~+85	_	

表 3-1 ワイヤボンディング部品 10 品種の構造一覧

識別 No	①接合 構造	②ワイヤ 材料	③電極 パット材料	ワイヤ 接合幅 [μm]	動作温度 [℃] (カタログ値)	モイスチャー レヘ [・] ル (カタログ値)	断面構造
9	Cu-Al 接合	Cu	Al めっき 下地:Ti	45	-40~+125	_	
11	Cu-Al 接合	Cu Pd⊐—ト	Al めっき 下地:Ti	31	-40~+85	_	
12	Cu-Al 接合	Cu Pd⊐—ト	Al めっき 下地:Ta/Cu	26	-40~+85	_	
15	Cu-Al 接合	Cu 酸化膜	Al めっき 下地:W	44	-40~+85	_	
29	Cu-Al 接合	Cu	Al めっき 下地:Ti	43	-40~+125	_	

表 3-1 ワイヤボンディング部品 10 品種の構造一覧(続き)

フリップチップ部品は高温はんだ接続、UBM(UnderBumpMetal)+はんだ接続、Au バン プ+はんだ接続、Cu バンプ+はんだ接続、Cu ピラーの計5種の実装工法の部品 10品種を選 定している。表 3-2 にフリップチップ部品 10 品種の構造一覧を示す。

$\rm JERG\text{-}0\text{-}052\text{-}TM001$

	(5)	(2)	③ バン	④電極ノ	ペッド材料	⑤ アンダー	動作温度	モイスチャー	
識別 No	〕 実装 方式	パ ^ン プ 材	プ 径 [µm]	チップ Al パット 上	基板	フィル材 (フィ ラー)	[℃] (カタログ値)	レヘール (カタログ値)	断面構造
33	はんだ 接続	高温 はんだ	125	Ti、Ni+V Sn 系 めっき	Au めっき 下地:Ni 母材:Cu	シリカ	0~+100	_	
43	はんだ 接続	高温 はんだ	130	Ti、Ni+V Sn 系 めっき	Au めっき 下地 : Ni 母材 : Cu	シリカ	0~+100	_	
39	UBM +はんだ 接続	鉛フ リー はんだ	128	W+Ti、 Cu、Ni Sn 系 めっき	母材 : Cu	シリカ	-40~+85	4	0.00
44	UBM +はんだ 接続	鉛フ リー はんだ	118	W+Ti、 Cu、Ni Sn 系 めっき	母材 : Cu	シリカ	-40~+85	_	
55	UBM +はんだ 接続	鉛フ リー はんだ	106	W+Ti、 Cu、Ni Sn 系 めっき	母材:Cu	シリカ	-40~+125	_	
59	UBM +はんだ 接続	鉛フ リー はんだ	117	W+Ti、 Cu、Ni Sn 系 めっき	母材 : Cu	シリカ	-40~+85	_	
38	Cu ポスト +はんだ 接続	共晶 はんだ	118	W Cu ポスト	母材 : Cu	シリカ	0~+90	_	
45	Cu ポスト +はんだ 接続	共晶 はんだ	112	W Cu ポスト	母材 : Cu	アルミナ	0~+90	_	

表 3-2 フリップチップ部品 10 品種の構造一覧

識別 No	① 実装 方式	② パンプ 材	③ バンプ 径 [μm]	④電極/ チップ Al パット 上	パッド材料 基板	⑤ アンダー フィル材 (フィラー)	動作温度 [℃] (カタログ値)	モイスチャー レヘ゛ル (カタログ値)	断面構造
40	Cu ピラー +はんだ 接続	鉛フ リー はんだ	42	W Cu ピラー	Cu ポスト	シリカ	0~+90	_	
60	Au バンプ +はんだ 接続	鉛フ リー はんだ	70	Au バンプ	Cu ポスト	シリカ	-40~+105	_	

表 3-2 フリップチップ部品 10 品種の構造一覧(続き)

4 検証方法

想定したリスクについての検証を行うため以下の試験を実施した。

<前処理試験>

・部品ベーキング

条件:125℃、24H

・HAST 試験
 試験方法及び条件:JESD22-A110(130℃/85%、96H) ※バイアス印可なし

<熱環境試験>

・熱サイクル試験

条件: MIL-STD-883 Test Method 1010(-55℃/+125℃、1000cyc) ※100cyc,500cyc,750cyc,1000cyc でサンプル抜取りを行う。

<機械的環境試験>

振動試験

試験方法及び条件: MIL-STD-883 Test Method 2007 (20G、20~2000Hz、3 軸)

· 衝撃試験

試験方法及び条件: MIL-STD-883 Test Method 2002 (1500G、0.5ms、6 方向)

 ・複合試験(振動試験+衝撃試験)
 試験方法及び条件:振動試験、衝撃試験と同じ

<断面観察>

下記試験後のサンプルに対して切削式研磨による断面製作、SEM 観察および EDX による 材料分析を行った。

- ・HAST 試験後
- ・熱サイクル試験 100cyc 後
- 熱サイクル試験 500cyc 後
- ・熱サイクル試験 750cyc 後
- ・熱サイクル試験 1000cyc 後
- ・振動試験後
- ・衝撃試験後
- · 複合試験後(振動試験+衝撃試験)

試験フローを図 4.1 に示す。



図 4.1 試験フロー

5. 検証結果

各試験後の断面観察によって得られた検証結果および確認されたリスクを以下に示す。

5. 1 HAST 試験の検証結果

HAST 試験の検証結果を表 5.1-1,5.1-2 に示す。

識別	144.54		劣化モード					
No.	構造	ワイヤ材料	腐食	金属間化合物 の成長	カーケンタル ボイド生成	クラック		
3	Au−Au接合	Au		_		—		
10		Au (Pd)	0	0		—		
16		Au	0	0		-		
25		Au	0	0	_			
28		Au (Pd)	0	0	_			
9		Cu	-	0	—			
11	Cu-Al接合	Cu (Pd)	-	0	—	Ι		
12		Cu (Pd)	-	0	—	Ι		
15		Cu(酸化膜)	_	0	_	_		
29		Cu	_	0	_	_		

表 5.1-1 HAST 試験の検証結果(ワイヤボンディング部品)

※O:あり、-:なし

表 5.1-2 HAST 試験の検証結果(フリップチップ部品)

識別	144.54	»	劣化モード					
No.	構造	パンプ材	腐食	金属間化合物 の成長	カーケンタル ボイド生成	クラック		
33	けんだ妹結	高温はんだ	0	0				
43	はんた女称	高温はんだ	0	0	_			
39		鉛フリーはんだ		0		0		
44	- UBM+はんだ接続	鉛フリーはんだ		0		0		
55		鉛フリーはんだ		0				
59		鉛フリーはんだ		0		0		
38	- ^u ポフト + /ナノ お 体結	共晶はんだ	0	0				
45	- しいハスト+はんに接続	共晶はんだ		0				
40	Cuピラー+はんだ接続	鉛フリーはんだ		0				
60	Auバンプ+はんだ接続	鉛フリーはんだ	_	0	_	_		

5.1.1 腐食

ワイヤボンディング部品で腐食が確認されたのは Au ワイヤ-Al パッド接合の 4 サンプ ルであった。この 4 サンプルの内、最も腐食が顕著であったのは識別 No.10 であった。 他 3 サンプルも腐食はしていたが軽微であり、腐食の度合いに差があった。図 5.1-1,5.1-2 に代表 2 サンプルの初期状態と HAST 試験後の接合断面の SEM-EDX 分析結果を示 す。



図 5.1-1 識別 No.10 の接合断面 SEM-EDX 分析結果※左図:初期状態、右図: HAST 試験後



図 5.1-2 識別 No.16 の接合断面 SEM-EDX 分析結果 ※左図:初期状態、右図: HAST 試験後

本検証で確認された腐食の進行度合いの差は、部品の構造や接合状態によっては不具 合のリスクとなり得る。地上用部品を宇宙適用するのに際しては腐食リスクについて問 題ないかを評価することが望ましいと考える。 フリップチップ部品では、はんだ接続の2サンプル、Cuポスト+はんだ接続の1サ ンプルに腐食が見られた。いずれもごく僅かな腐食のみであった。図5.1-3,5.1-4に代表 2サンプル初期状態と HAST 試験後の接合断面の SEM 分析結果を示す。



図 5.1-3 識別 No.43の接合断面 SEM 分析結果 ※左図:初期状態、右図:HAST 試験後



図 5.1-4 識別 No.38 の接合断面 SEM 分析結果 ※左図:初期状態、右図:HAST 試験後

<腐食の要因考察>

ワイヤボンディング部品に見られた顕著な腐食について腐食に関するリスク抑制のため要因分析を行った。腐食が顕著であった識別 No.10 と軽微な腐食であった識別 No.16 の初期断面を比較すると、識別 No.10 の方が初期の接合状態が悪く、ボイドが多いことが分かる。図 5.1-5 に識別 No.10 と 16 の初期断面を示す。



図 5.1-5 初期断面比較 ※左図:識別 No.10、右図:識別 No.16

ボイドのような隙間が接合部に存在すると、そこに HAST 試験によってモールド樹脂 に吸湿された水分が侵入し、腐食進行が促進されることが考えられる。

また、識別 No.10 で使用される Au ワイヤには Pd が添加されている。同様に Pd が添加されている識別 No.28 では顕著な腐食は確認されなかったが、ワイヤの添加元素が腐食に影響を及ぼしている可能性は排除できないため要因として挙げることとした。

次に、HAST 試験で見られた腐食のメカニズムについて分析した。腐食部には酸素が 確認されており、HAST 試験による水分で水酸化化合物が生成され腐食したと考えられ る。水分を伴う代表的な腐食現象に「ミクロセル腐食」がある。このミクロセル腐食は 異金属が接触した際に発生する起電力により、電荷を失った金属がイオンとして溶液に 溶け出し、金属自体が腐食する現象である。また、ハロゲン化合物がモールド樹脂等に 存在しているとミクロセル腐食による腐食進行が促進される効果がある。

以上のことから腐食進行を促進する要因としては、以下の3点が挙げられる。

- 初期の接合状態
- Au ワイヤの添加元素
- ③ ハロゲン化合物の存在

「初期の接合状態」は実際に接合状態の悪い識別 No.10 が最も顕著な腐食になったことが本検証で分かっている。「Au ワイヤの添加元素」は、識別 No.10 と同様 Au ワイヤ に Pd が添加される識別 No.28 では腐食が顕著になっていないことから腐食促進の要因 であるがその効果は小さいと考えられる。「ハロゲン化合物の存在」については、腐食の

メカニズムから腐食進行を促進する要因であると思われるが、本検証ではハロゲン化合物の有無を確認できていないため、調査を行った。その結果を 6.1.2 項に示す。

5.1.2 金属間化合物の成長

金属間化合物の成長は同金属の接合である識別 No.3(Au-Au 接合)以外の 19 品種 に見られた。ワイヤボンディング部品は化合物層が均等に成長しており、フリップ チップ部品は化合物層が山なりに成長している様子が見られた。図 5.1-6~8 に初期 品および HAST 試験後の接合断面を示す。



図 5.1-6 識別 No.10 の接合断面 ※右図:初期状態、左図: HAST 試験後



図 5.1-7 識別 No.16 の接合断面 ※右図:初期状態、左図: HAST 試験後



図 5.1-8 識別 No.45 の接合断面 ※右図:初期状態、左図: HAST 試験後

接合部の金属間化合物は熱膨張や機械的な応力によってクラックが発生する恐れがあ

る。このリスクについては熱環境試験および機械的環境試験にて述べる。

5.1.3 カーケンタルボイドの生成

HAST 試験後、ワイヤボンディング部品およびフリップチップ部品にボイドが確認された。カーケンタルボイドは金属間化合物の成長によって発生するが、金属間化合物が成長していない初期からボイドは点在しているため、HAST 試験によるボイドではないと考える。一般的にカーケンタルボイドが生成されるほどの金属拡散は150℃以上で起こるため、カーケンタル効果(金属の拡散速度の違いで起こる現象)によるカーケンタルボイドは発生していないと思われる。図 5.1-9~10 に初期品および HAST 試験後の接合断面を示す。



図 5.1-9 識別 No.16 の接合断面 ※右図:初期状態、左図: HAST 試験後



図 5.1-10 識別 No.55 の接合断面 ※右図:初期状態、左図: HAST 試験後

5.1.4 クラック

HAST 試験後のクラックはワイヤボンディング部品にはなく、フリップチップ部品の 3 品種に見られた。HAST 試験で金属間化合物が成長していることは確認できているた め、その化合物層が試験温度による熱膨張で亀裂が入ったと考えられる。ただし、確認 されたクラックはどれも微小なものであり、信頼性に影響を及ぼすものではない。図 5.1-11~12 に初期品および HAST 試験後の接合断面を示す。



図 5.1-11 識別 No.16 の接合断面 ※右図:初期状態、左図: HAST 試験後



図 5.1-12 識別 No.39 の接合断面 ※右図:初期状態、左図: HAST 試験後

5.2 熱サイクル試験の検証結果

熱サイクル試験の検証結果を表 5.2-1~2 に示す。

識別	144 544		劣化モード		
No.	構造	ワイヤ材料	HAST後 クラック	熱サイクル後 クラック	
3	Au−Au接合	Au	—	—	
10		Au (Pd)	_	—	
16		Au	_	-	
25		Au	_	—	
28		Au (Pd)	—	-	
9		Cu	_	-	
11		Cu (Pd)	_	-	
12	Cu-AI接合	Cu (Pd)	_	-	
15		Cu(酸化膜)	_	_	
29		Cu	_	_	

表 5.2-1 熱サイクル試験の検証結果(ワイヤボンディング部品)

※O:あり、-:なし

識別	144.544	». — ° I I	劣化モード			
No.	構造	ハンフ材	HAST後 クラック	熱サイクル後 クラック		
33	けんだ法法	高温はんだ	_	0		
43	あるがする	高温はんだ	—	0		
39		鉛フリーはんだ	0	0		
44	UBM+はんだ接続	鉛フリーはんだ	0	0		
55		鉛フリーはんだ	-	0		
59		鉛フリーはんだ	0	0		
38	のポットルナイだ体結	共晶はんだ		0		
45		共晶はんだ	_	0		
40	Cuピラー+はんだ接続	鉛フリーはんだ	—	—		
60	Auバンプ+はんだ接続	鉛フリーはんだ	_	_		
-				※〇:あり、一:なし		

表 5.2-2 熱サイクル試験の検証結果(フリップチップ部品)

5.2.1 クラック

熱サイクル試験後のクラックは、ワイヤボンディング部品に発生はなく、フリップ チップ部品には8品種で見られた。クラックはHAST 試験後から確認できており、程度 は熱サイクル試験も同等であるため、HAST 試験で発生したクラックがそのまま確認さ れていると考えられる。確認されたクラックは軽微なものであり信頼性に影響はないと 考える。図5.2-1~2 に HAST 試験および熱サイクル試験後の接合断面を示す。



図 5.2-1 識別 No.16 の接合断面 ※右図:HAST 試験後、左図:熱サイクル試験後



図 5.2-2 識別 No.39 の接合断面 ※右図: HAST 試験後、左図:熱サイクル試験後

以上の結果より、熱サイクル試験での検証では地上用半導体部品に対するリスクは確認されなかった。

5.3 機械的環境試験の検証結果

機械的環境試験の検証結果を表 5.3-1~2 に示す。

識別	144 144		劣化モード		
No.	構造	リイヤ材料	クラック (チップ内部)	クラック (ボール内部)	
3	Au−Au接合	Au	_	_	
10		Au (Pd)	-	—	
16		Au —		—	
25	AU-A1按合	Au	-	_	
28		Au (Pd)	-	_	
9		Cu	-	—	
11		Cu (Pd)	-	—	
12	Cu−AI接合	Cu (Pd)	-	_	
15		Cu(酸化膜)		_	
29		Cu	_	_	

表 5.3-1 機械的環境試験の検証結果(ワイヤボンディング部品)

※O:あり、-:なし

表 5.3-2 機械的環境試験の検証結果(フリップチップ部品)

1# \#	· · · · · · · · · · · ·	劣化モード			
備這	ハシノ材	クラック (チップ内部)	クラック (ボール内部)		
けくだ体結	高温はんだ	0	_		
はんたけ	高温はんだ	0	_		
	鉛フリーはんだ	0	-		
UBM+はんだ接続	鉛フリーはんだ	0	0		
	鉛フリーはんだ	0	_		
	鉛フリーはんだ	0	0		
のポフトょけんだ法法	井晶はんだ		_		
60小ストーはのに接続	共晶はんだ	0	_		
Cuピラー+はんだ接続	鉛フリーはんだ	_	_		
Auバンプ+はんだ接続	鉛フリーはんだ	_	_		
	構造 はんだ接続 UBM+はんだ接続 Cuポスト+はんだ接続 Cuピラー+はんだ接続 Auバンプ+はんだ接続	構造バンプ材はんだ接続高温はんだはんだ接続高温はんだ山野米はんだ接続鉛フリーはんだロサーはんだ接続鉛フリーはんだこロポスト+はんだ接続共晶はんだたロピラー+はんだ接続鉛フリーはんだムバンプ+はんだ接続鉛フリーはんだ	構造 バンプ材 グラック (チップ内部) はんだ接続 高温はんだ 〇 はんだ接続 高温はんだ 〇 週BM+はんだ接続 鉛フリーはんだ 〇 鉛フリーはんだ 〇 1 近日 山水ンプキはんだ接続 山バンプキはんだ接続 1		

※O:あり、-:なし

5.3.1 チップ内部のクラック

機械的環境試験後、フリップチップ部品8品種のチップ内部にクラックが確認された。ワイヤボンディング部品にはチップ内部のクラックは見られなかった。図5.3-1に HAST 試験および機械的環境試験後の接合断面を示す。



図 5.3-1 識別 No.39 の接合断面 ※右図:HAST 試験後、左図:機械的環境試験後

本検証で確認されたチップ内部のクラックは、部品不具合のリスクとなり得るため、 地上用部品の宇宙適用に際しては問題がないことを評価することが望ましいと考える。 <チップの内部クラック要因の考察>

チップ内部の配線層に見られたクラックについての要因分析にあたり、まず部品の構造に着目した。表 5.3-3 にフリップチップ部品の構造一覧を示す。

識別 No.	チッフ゜クラック	バンプ 配置	バンプ径 [μm]	ハ`ンフ゜ ピッ チ [μm]	チップ厚 [μm]	チッフ [°] 配線層厚 [μm]
33	あり	フルク゛リット゛	125	150	688	7.5
43	あり	フルク゛リット゛	130	200	688	8.5
39	あり	フルク゛リット゛	128	170	790	5.0
44	あり	フルク゛リット゛	118	160	750	10.0
55	あり	フルク゛リット゛	106	270	173	8.5
59	あり	フルク゛リット゛	117	190	142	9.0
38	あり	フルク゛リット゛	118	180	625	8.5
45	あり	ペリフェラル	112	170	256	6.0
40	なし	ペリフェラル	42	80	95	2.5
60	なし	ペリフェラル	70	50	94	2.5

表 5.3-3 フリップチップ部品の構造一覧

フリップチップ部品構造の各項目についてチップクラックの要因となり得るかを分析した。

バンプ配置

チップクラックが発生していないバンプ配置は「ペリフェラル」であるが、同じバン プ配置である識別 No.45 でチップクラックが発生しているため、要因ではないと考え る。

バンプ径

チップクラックが発生していない2品種は、チップクラックが発生した8品種と比較 するとバンプ径が小さいため、要因と関係があると考える。

バンプピッチ

バンプ径と同様にチップクラックが発生していない2品種が他と比べ小さいため、要因と関係があると考える。

<u>チップ厚</u>

チップ厚が薄くなるほど強度が落ちると考えられるが、チップクラックが発生しな かった2品種が最もチップ厚が薄かったため、要因ではないと考える。

<u>チップ配線層厚</u>

チップ厚と同様に、チップクラックが発生しなかった2品種が最も薄かったため、要 因ではないと考える。

以上のことから、部品構造においては「バンプ径」と「バンプピッチ」にチップク ラックが発生した要因があると考える。

次に、振動・衝撃試験によってかかる応力がどのようにチップに伝わるのかを考察し



た。図 5.3-2 に振動・衝撃試験による応力を示す。

図 5.3-2 振動・衝撃試験による応力

フリップチップに応力が加わる際、はんだ接続される部分ははんだボールが支柱とな り応力が吸収されるが、はんだ接続されていない部分は支えがないため応力が集中す る。この応力集中によってチップ配線層にクラックが発生したと考える。チップクラッ クが発生しなかった2品種はバンプピッチが狭く密集していたためチップの支柱が多 く、強度が強かったと考えられる。図5.3-3にチップクラックなしの部品およびチップ クラックありの部品のバンプピッチを示す。



図 5.3-3 バンプピッチ ※左図:チップクラックなし(No.60)、右図:チップクラックあり(No.33)

今回確認されたチップクラックはフリップチップ部品にのみ発生しており、ワイヤボ ンディング部品には発生していなかった。ワイヤボンディング部品は基板とチップが全 面接着されており、振動・衝撃による応力が加えられてもその応力はチップ全面に分散 されるためチップクラックが発生しなかったと考えられる。図 5.3-4 にワイヤボンディ ングおよびフリップチップ部品の構造を示す。



図 5.3-4 ワイヤボンディングおよびフリップチップ部品の構造

また、チップクラックは断面観察時に確認されたものであるため断面研磨による影響 も考えられる。図 5.3-5~6 に初期品と機械的環境試験後の観察断面を示す。



図 5.3-5 観察断面(初期品) ※識別 No.38



図 5.3-6 観察断面(機械的環境試験後)※識別 No.38

試験を行っていない初期品からチップ配線層のクラックが確認できているため、<u>断面</u> 研磨がチップクラックの要因のひとつであると考えた。また、初期品と機械的環境試験 後の断面を比較すると、機械的環境試験後の方がチップクラックの程度が大きいことが 分かる。前述したように機械的環境試験でチップ配線層に応力が集中されることが考え られるため、この<u>応力集中によってチップ層間絶縁層である Low-k 材の密着性が低下</u> し、そこに断面研磨の影響が加わることでチップクラックの程度が大きくなったと考え られる。

以上のことからチップ内部のクラック要因としては、以下が考えられる。

① 半導体チップの配線層に応力集中して破壊

- ② 半導体チップの配線層の Low-k 材の密着性低下
- ③部品断面加工時の研磨におけるクラックの作り込み

要因①③については切り分けのため、断面研磨前の部品のクラック有無について調査 を行なった。

5.3.2 ボール内部のクラック

機械的環境試験後、フリップチップ部品2品種のはんだボール化合物層にクラックが 見られた。ワイヤボンディング部品にはクラックは見られなかった。クラックの程度は どれも微小なものであり、接合部信頼性に影響はないと考える。図5.3-7~8に HAST 試験後および機械的環境試験後の接合断面を示す。



図 5.3-7 識別 No.16 の接合断面 ※右図:HAST 試験後、左図:機械的環境試験後



図 5.3-8 識別 No.44 の接合断面 ※右図: HAST 試験後、左図:機械的環境試験後

6 確認されたリスクの調査

5項で確認されたリスクに対して以下の調査を実施した。

6.1 イオンクロマトグラフィーによるハロゲン含有率の調査

6.1.1 イオンクロマトグラフィー概要

HAST 試験で確認された腐食度合いの差は、「初期の接合状態」および「ハロゲン化合物の存在」が要因である可能性が高いと考える。本項では「ハロゲン化合物の存在」について、イオンクロマトグラフィーと呼ばれる手法にて調査を実施した。以下に試験の概要を示す。

<分析原理>

イオンクロマトグラフィーは分析前に試料に前処理を行う必要がある。前処理には 「抽出法」と「燃焼法」の手法がある。各手法の分析原理を以下に示す。

- 抽出法:試料を入れた水溶液(超純水)を加熱(80℃で1H放置)することで、試 料内に存在するハロゲンイオンを抽出させ、水溶液中の成分をイオンクロ マトグラフと呼ばれる分析装置にて定量分析する手法。
- 燃焼法:試料を燃焼ガスにて燃焼させ、発生したガスを吸収液に捕集し、その吸収 液に捕集された各種ハロゲンをイオンクロマトグラフにて定量分析する手 法。※モールド樹脂以外(基板やはんだ等)は、研磨にて除去している。

<分析元素>

以下のハロゲン3元素に分析対象とした。 塩素(Cl)、臭素(Br)、ヨウ素(I)

<対象サンプル>

HAST 試験後のサンプルを対象として調査を実施した。抽出法と燃焼法は同じサン プルを使用した。

- ・識別 No.10 (ワイヤボンディング部品):4EA
- ・識別 No.16 (ワイヤボンディング部品):4EA
- ・識別 No.25 (ワイヤボンディング部品):4EA
- ・識別 No.28 (ワイヤボンディング部品):4EA

6.1.2 イオンクロマトグラフィー結果および考察

腐食の度合いに差が生じた要因と考えている「ハロゲン化合物の存在」についてイオ ンクロマトグラフィーにて調査を行った。結果を表 6.1-1 に示す。

	試料名	識別No.		ハロゲンイオン		ハロゲン化合物			
前処理			Cl⁻ (µg/cm²)	Br [−] (µg/cm²)	I^- (μ g/cm ²)	Cl (wt%)	Br (wt%)	I (wt%)	
	IC パッケージ	10	<0.02	<0.02	<0.02	-	-	-	
抽山注		16	<0.02	<0.02	<0.02	-	-	-	
抽山法		25	0.06	<0.02	<0.02	-	-	-	
		28	0.05	<0.02	<0.02	-	-	-	
	モールド 樹脂	10	-	-	-	0.004	<0.001	<0.001	
燃焼法		16	-	-	-	0.007	0.58	<0.001	
		25	-	-	-	0.004	0.002	<0.001	
		28	-	-	-	0.003	0.001	<0.001	

表 6.1-1 イオンクロマトグラフィー結果

抽出法で検出されたのは、識別 No.25 と 28 の塩化物イオンのみであり、それ以外は 検出限界以下であった。燃焼法では塩素は4品種すべて、臭素は識別 No.16,25,28 の 3 品種で検出された。ヨウ素については4品種全て検出限界以下であった。

図 6.1-1 に識別 No.10,16,25,28 の HAST 試験後の接合断面を示す。



図 6.1-1 HAST 試験後の接合断面

図 6.1-1 を見ると識別 No.10 の腐食が最も顕著であり、他 3 品種の腐食は軽微である ことが分かる。この腐食の度合いとイオンクロマトグラフィーによって得られたハロゲ ン含有量の関連性を分析した。表 6.1-2 に腐食度合いとハロゲン含有量の関連性を示 す。

部別りる	ハロゲンイオン			1	いロゲン化合	含有量	腐食	
i眼力JINO.	Cl⁻	Br⁻	I	CI	Br	Ι	順位	度合い
16	—		—	O	O	—	1	小
25	0	_	_	0	0	_	2	小
28	0	_	_	0	0	—	3	小
10	_	_	_	0	_	_	4	大

表 6.1-2 腐食度合いとハロゲン含有量の関連性

※◎:含有量多、O:含有量少、一:検出限界以下

表 6.1-2 に示す通り、ハロゲン含有量が最も多い識別 No.16 は腐食度合いが小さく、 腐食度合いがもっとも顕著だった識別 No.10 はハロゲン含有量が少ないといった結果が 得られた。以上の結果から本サンプルにおいては腐食の度合いとハロゲン含有量に関連 性はなく、ハロゲン化合物が腐食に与える影響は少ないと考える。

腐食の度合いに差が生じたのは「ハロゲン化合物の存在」と「初期の接合状態」が要因として大きいと考えていたが、本調査でハロゲン化合物が腐食に与える影響は少ない ことが分かったため、地上用部品の宇宙適用において腐食のリスクを検証する際には、 「初期の接合状態」に注意することが推奨される。

6. 2 C-SAM によるチップクラックの要因調査

6.2.1 C-SAM 概要

機械的環境試験後に確認されたフリップチップ部品のチップクラックについて、チッ プクラックが試験起因か断面研磨起因かの切り分けを行うため、C-SAM による調査を実 施した。以下に試験の概要を示す。

<分析原理>

C-SAM(超音波探傷)は、試料に超音波を伝搬させ反射して戻ってくる時間やエ コー強さを測定することで部品内部の傷や空洞を分析する手法。

<対象サンプル>

機械的環境試験後のサンプルを対象として調査を実施した。試験起因か断面研磨起 因かを切り分けるため、断面研磨前後のサンプルを使用した。

断面研磨前

- ・識別 No.33 (フリップチップ部品):1EA
- ・識別 No.43 (フリップチップ部品):1EA
- ・識別 No.39 (フリップチップ部品):1EA
- ・識別 No.44 (フリップチップ部品):1EA
- ・識別 No.55 (フリップチップ部品):1EA
- ・識別 No.59 (フリップチップ部品):1EA
- ・識別 No.38 (フリップチップ部品):1EA
- ・識別 No.45 (フリップチップ部品):1EA

断面研磨後

- ・識別 No.33 (フリップチップ部品):1EA
- ・識別 No.43 (フリップチップ部品):1EA
- ・識別 No.39 (フリップチップ部品):1EA
- ・識別 No.38 (フリップチップ部品):1EA

6. 2. 2 C-SAM の結果および考察

機械的環境試験にて発生したフリップチップ部品のチップクラックについて、事象が 試験起因なのか断面研磨起因なのかを切り分けるため、C-SAM による調査を行った。図 6.2-1~2 に断面研磨前後の C-SAM 結果を示す。

$\rm JERG\text{-}0\text{-}052\text{-}TM001$







図 6.2-2 断面研磨後の C-SAM 結果

図 6.2-1~2 を見ると、チップクラックは断面研磨後にのみ確認されているため、事象 は断面研磨起因であると切り分けることができた。また、断面研磨後の C-SAM 結果に 見られた剥離は軽微なものと広範囲なものの 2 パターンがあった。剥離が軽微であった のは、識別 No.33 と 43 である。識別 No.33 は C-SAM の結果から剥離は確認されな かったためチップ端部でのみ剥離していると思われる。(C-SAM にて照射する超音波は チップ側面にも入射されるため、その側面で超音波が散乱および分散されることでチッ プ側面付近が死角となる。)図 6.2-3 に剥離が確認された識別 No.33 のチップ配線層断面 を示す。



図 6.2-3 識別 No.33 のチップ配線層断面

また、剥離が広範囲であったのは識別 No.38,39 である。この2品種は断面製作位置 から部品中央に向けて広範囲に剥離が発生していることが確認できる。剥離の程度に差 が生じた要因はチップ内の構造にあると考える。図 6.2-4 に識別 No.33,43,38,39 のチッ プ内構造を示す。



図 6.2-4 チップ内構造

図 6.2-4 を見ると、剥離が軽微であった識別 No.33,43 はチップ配線層の各層が厚く、 チップの強度が強いと考えられる。対して剥離が広範囲であった識別 No.38,39 は各層が 薄く多層であるためチップの強度が弱いと考えられる。以上のことから、剥離の程度に 差が生じたのはチップ内の構造によって強度に違いがあったからだと考える。

本調査によって機械的環境試験によるチップクラックの発生起因は試験ではなく、断 面研磨にあることが分かった。よって地上用半導体部品に対する機械的環境試験による チップクラックのリスクはないと考える。