



Title	Whisker growth characteristics and suppression in orbit
Author(s)	市丸, 慎一郎
Citation	大阪大学, 2026, 博士論文
Version Type	
URL	https://hdl.handle.net/11094/105448
rights	
Note	やむを得ない事由があると学位審査研究科が承認したため、全文に代えてその内容の要約を公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、大阪大学の博士論文についてをご参照ください。

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

論文内容の要旨

氏 名 （市丸 慎一郎）

論文題名

Whisker growth characteristics and suppression in orbit
(軌道上におけるウィスカ成長特性とウィスカ抑制)

論文内容の要旨

大型の人工衛星や探査機には非常に多くの部品が使用されており、これらの部品は過酷な宇宙環境下においても、長期間安定的に動作することが求められている。そのため、これら宇宙用部品の開発コスト・開発期間は膨大となっている。また宇宙用部品は開発期間を長期間要することから、最新の民生部品に対して数世代遅れの技術となっている。一方、民生部品においては、原子力・自動車等に、高機能・高性能かつ高信頼性の部品が使用されており、昨今、人工衛星・探査機にこれら民生部品の利用（宇宙転用）の要望が高まっている。しかし、EUのRoHS指令により鉛の使用が制限されており、民生部品の多くは鉛入り部品ではなく、鉛フリー部品が使用されている。一方、宇宙用途においては、現在、RoHS指令の適用除外となっており、その多くは鉛入り部品が使用されている。鉛フリー部品を宇宙用途に使用するにあたって、鉛フリー部品の課題となっているSnウィスカの問題を解決する必要がある。本研究では、衛星・探査機にSn系めっき鉛フリー部品を利用することを目的に、軌道上でのウィスカ成長特性の解明、及びコンフォーマルコーティングを用いたウィスカ抑制効果の確認を行った。本論文は以下の6章で構成される。

第1章では、緒論として研究背景及び研究目的について述べている。

第2章では、実験方法について述べている。本研究は国際宇宙ステーション（ISS）のきぼうの船外プラットフォームの軌道上曝露装置 ExHAMを用いて行った。実験試料として鉛フリー部品及び純Snめっきされた試験片を準備し、これらをExHAMに搭載し、最大4年間、軌道上曝露実験を行った。また軌道上曝露実験と比較するため、最大3年間の地上対照実験（熱サイクル試験）も行った。

第3章では、軌道上におけるSnウィスカの発生・成長メカニズムについて言及した。軌道上においてSnウィスカは細く長くまっすぐ成長した。また、Snウィスカ表面に微細な何重ものStriation ring(節)が確認された。この節は熱サイクルに起因して発生するウィスカに確認されることが分かっており、軌道上においてSnウィスカは熱サイクルに起因して発生することが明らかとなった。地上大気下では、Snウィスカは太く短く曲がって成長したが、地上真空下では細く長くまっすぐ成長し、軌道上と地上真空下で同一のSnウィスカ成長特性を示すことが確認された。これらの結果より、軌道上において、熱サイクルと真空（酸素の有無）環境がSnウィスカの成長と形状に大きな影響を及ぼすと結論された。

第4章では、軌道上におけるPbウィスカの発生・成長メカニズムについて言及した。純Snめっきされた鉛フリー部品（チップコンデンサ）は共晶Sn-Pbはんだで実装された。共晶Sn-Pbはんだがリフロー時にチップコンデンサ電極上面まで塗れ上がったことにより、電極上面表面部にPbの領域が存在し、軌道上曝露後、このPb領域よりPbウィスカが発生した。軌道上で発生したPbウィスカは細くまっすぐ成長していた。またウィスカ表面に節が確認されたことから、軌道上においてPbウィスカは熱サイクルに起因して発生することが明らかとなった。地上大気下で発生したPbウィスカは太く短く曲がって成長しており、Snウィスカと同様、軌道上におけるPbウィスカの発生・成長に熱サイクルと真空（酸素の有無）環境が影響を及ぼすと結論された。

第5章では、軌道上における、コンフォーマルコーティングによるウィスカ抑制効果について言及した。コンフォーマルコーティングとしてパリレンコーティングおよびポリウレタンコーティングを使用した。未コート試料では多数の細く長くまっすぐなウィスカが確認されたが、コーティングした試料では、ウィスカによる貫通は確認されなかった。またコーティング下でSnめっき表面からウィスカの発生も確認されなかった。軌道上と地上大気下でコンフォーマルコーティングによるウィスカ抑制効果に差異は見られず、またコンフォーマルコーティングの顕著な劣化も確認されなかった。これらの結果より、コンフォーマルコーティングすることにより、鉛フリー部品をISS軌道において、当該期間、衛星・探査機に使用できると結論された。

第6章では、各章で得られた結果を総括し、今後の課題について述べた。

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 (市丸 慎一郎)			
論文審査担当者	(職)	氏 名	
	主 査	教授	西川 宏
	副 査	教授	福本 信次
	副 査	教授	伊藤 和博

論文審査の結果の要旨

本研究では、衛星・探査機における Sn 系めっき鉛フリー部品の適用性を確認するべく、軌道上における Sn ウィスカ成長特性及びウィスカ抑制について検証している。実験は国際宇宙ステーション (ISS) の「きぼう」船外プラットフォームの軌道上曝露装置 ExHAM を用いて行われている。本論文は以下の 6 章で構成される。

第 1 章では、緒論として研究背景及び研究目的について述べている。

第 2 章では、実験方法について述べている。実験試料として鉛フリー部品及び純 Sn めっきされた試験片を準備し、これらを ExHAM に搭載し、最大 4 年間、軌道上曝露実験を行っている。また軌道上曝露実験と比較するため、最大 3 年間の地上対照実験（熱サイクル試験）も行っている。

第 3 章では、軌道上における Sn ウィスカの発生・成長メカニズムについて言及している。軌道上において、Sn ウィスカは細く、長く、真っ直ぐ成長している。また軌道上で成長した Sn ウィスカには、ウィスカ側面に微細な縞状のリング (Striation ring) が確認されている。これはウィスカが熱サイクル起因で発生していることを示す特徴であり、軌道上において Sn ウィスカは熱サイクルにより発生していることが確認されている。また、軌道上と地上大気環境下で成長した Sn ウィスカの形状は異なっているが、軌道上と地上真空環境下で成長した Sn ウィスカの形状の同等性が確認されている。これらの結果から軌道上において、熱サイクルと真空（無酸素）が Sn ウィスカ成長と形状に大きく影響していることが示されており、軌道上における Sn ウィスカ成長メカニズムが解明されている。

第 4 章では、軌道上における Pb ウィスカの発生・成長メカニズムについて言及されている。純 Sn めっきされた鉛フリー部品（チップコンデンサ）が共晶 Sn-Pb はんだで実装されており、軌道上曝露後、チップコンデンサの電極上に Pb ウィスカが観察されている。Pb ウィスカは Sn ウィスカと同様、細く、まっすぐな形状をしており、また Pb ウィスカ表面に Striation ring も確認されている。これらは Sn ウィスカと同様の成長特性を示しており、熱サイクルと真空（無酸素）が Pb ウィスカ成長と形状に大きく影響していることが示されている。

第 5 章では、軌道上における、コンフォーマルコーティングによるウィスカ抑制効果について言及されている。未コートでは軌道上で多数の細く長くまっすぐなウィスカが成長しているが、コーティングされた試料ではウィスカがコーティングを貫通せず、またコーティング下において Sn めっきからウィスカが発生しておらず、コンフォーマルコーティングにより鉛フリー部品の ISS 軌道において、当該期間、衛星・探査機に使用することができることが示されている。

これらの結果は過去に類を見ない成果であるとともに、非常に貴重な知見であり、衛星・探査機への鉛フリー部品使用に向けて多大な貢献をしているものである。

よって、本論文は博士論文として価値あるものと認める。