ADEOS-II ハーネス熱サイクル検証

Validation on Thermal Cycle Degradation of ADEOS-II Power Supply Harness

石澤 淳一郎[1)], 馬場 尚子[1)], マイケル・ニーシュ[1)], 南 伸太朗[1)], 今川 吉郎[1)]
Junichiro Ishizawa, Naoko Baba, Michael J. Neish, Shintaro Minami, Kichiro Imagawa

黒崎 忠明[2)], 前島 弘則[2)], 小島 寧[2)]
Tadaaki Kurosaki, Hironori Maejima, Yasushi Kojima

*1 宇宙航空研究開発機構 総合技術研究本部 マテリアル・機構技術グループ
*2 宇宙航空研究開発機構 宇宙利用推進本部

Abstract

On October 25, 2004 ADEOS-II (Advanced Earth Observing Satellite-II; Midori-2) ceased supplying observational data owing to a catastrophic power failure. FTA (Fault Tree Analysis) suggested that a rupture or short circuit of the power harness between the PDL (Solar Array Paddle Subsystem) and the electric power subsystem was the most likely cause.

Material tests were conducted on the harness to elucidate the failure mechanism. High-temperature thermal cycling was seen to lead to anomalous expansion and contraction of the harness cable insulators. This phenomenon resulted in abrasion and fatigue of these materials.

1．はじめに

2003 年 10 月に発生したみどり II(ADEOS-II)太陽電池パドル発生電力低下の原因究明において，FTA(故障の木解析)の結果，太陽電池パドルの電力ライン，及び太陽電池パドルハーネスが可能性のある故障部位として推定された．このうち，最も可能性の高い事象と考えられるパドルハーネス束の開放・短絡ケースにつき，故障シナリオの成立性を評価するため電線被覆材料の劣化解析を行った結果を報告する．

なお，同材料について実施した隣接ハーネスへの波及評価（高温オフガス試験）及びデブリまたはメテオロイドの衝突による損傷評価結果については，参考文献 1)を参照されたい．

2．評価解析の概要

2．1 運用異常発生時の観察事象

10 月 24 日 16 時 13 分頃から約 3 分間で発生電力が約6kWから約1kWへ低下した．その後も，日照中は約 1kW 程度の電力が発生していた．

2．2 太陽電池パドルハーネス概要

ハーネスの概要を表 1 に示す．電力の低下量より，推定故障部位は大電力ハーネス束と推定された．ハーネスは 106 本の電線を多層断熱材(MLI)で覆い，束線した構成である．

表 1 ADEOS-II ハーネスの概要

ハーネス（大）	ハーネス（小）
電線総数 106 本 電力線 104 本（52 回路） 信号線 2 本	電線総数 90 本 電力線 24 本（12 回路） 信号線 60 本
多層断熱材 ポリエステルフィルム（厚み２種） ポリエステルネット ポリイミドフィルム	

このハーネス部で使用されている電線は，レイケム 55 AWG 22 番線(公称外径 1.09mm)であり，図 1 のようにヨリ線状の銀メッキ銅線と，肉厚 0.15mm の電子線架橋 ETFE(四フッ化エチレン・エチレン共重合樹脂)被覆材とで構成されている．

宇宙機用の電線には，耐熱性等の要求から，被覆材にポリイミド系やフッ素系高分子材料を使用することが多い．ETFEは代表的なフッ素系高分子材料であるPTFE(ポリ四フッ化エチレン；代表的商品名テフロン)と比較し，

This document is provided by JAXA.

融点や耐アーク性に劣るが，成形性が良く押出・射出成形が可能なため，諸特性のバランスがよい電線被覆材として広く使用されている．さらに放射線照射(専ら電子線が使用される)や架橋剤利用によって架橋を進ませることにより，融点を超える温度域でも溶け出さず，ゴムのように形状を保つことができる．これにより，高温での機械的特性が改善される．

レイケム電線の場合は，押出成形により芯線に被覆が施された後，電子線架橋を行っている．

ADEOS-IIの運用異常調査により，ハーネス温度は熱サイクルの中で最高230℃(±解析誤差10～15℃)まで到達したことが分かっている [2]．この温度は，レイケム55電線の連続使用可能温度である200℃を超えており，DSC(示差走査熱量測定装置)で測定した結晶融点(約236℃)近傍であった．

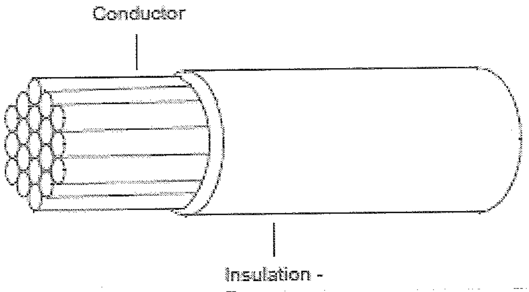


図1 レイケム55電線(Single wall)の構造
(レイケム社のウェブサイトから引用)

2．3　想定された故障シナリオ

ハーネス束が破断に至るまでのシナリオは，FTA等に基づき以下のように想定された．

[異常発生以前の事象]

① MLIの帯電：日陰中，またはオーロラ帯通過時に，接地されていないMLIが帯電する．

② ハーネスの損傷：打上げから運用異常発生までの何処かの時点で，被覆に損傷が発生した．

③ MLIとハーネス間のトリガ放電／損傷ハーネス間の単発放電：帯電したMLIとハーネス間にトリガ放電が発生する．また，損傷ハーネス間に単発的な放電が発生する．

[異常発生時の事象]

④ ハーネス間の持続放電：一組の損傷ハーネス間で単発放電から持続放電に発展する．

⑤ 隣接ハーネスへの波及：一組の損傷ハーネスが，持続放電に伴う発熱により熱損傷し，開放又は短絡に至る．また，熱損傷に伴う発熱により隣接ハーネスに波及し，熱損傷が大電力ハーネス束全体に波及する．

各段階での事象は地上試験により検証された．本報では，事象②の被覆損傷の検証結果について報告する．

3．成果の概要

3．1　電線被覆材の損傷評価

同種の電線が国内外の宇宙機で多くの使用実績を有することから，軌道上における電線被覆材の主たる劣化要因として，ADEOS-IIで特徴的な環境であった，結晶融点近傍まで達する高温状態(熱サイクル)に着目した．なお，ADEOS-IIの運用中は，104本の電力線を束線していることにより，熱サイクルによる電線同士の固着や摩擦が加わる状態となる．

そこで，以下に示す高温に着目した (a) ～ (c) の環境試験，さらに今後の宇宙機の設計指針となるデータ取得を目的とした安全使用可能温度の評価を実施した。各環境試験後の試料に対しては，CCDカメラ及びレーザ顕微鏡を用いた表面観察，XPS(X線光電子分光分析)による組成及び化学結合状態分析，並びに熱サイクル負荷を行った際のき裂発生評価を含む材料劣化評価を行った．

(a) 熱真空曝露試験

10cm長のレイケム55電線に対し，温度250℃，真空下(1kPaより高真空)にて，850時間の熱真空曝露試験を実施した．

熱真空曝露後試料の被覆材では，表面が褐色に変色した他，曝露前試料では観察されなかった直径約 1.7μm のボイドが筋状に配列している様子が観察された．XPSによる元素分析の結果を表 2に示す．

元素分析は表面(最表面から数nm深さ以内)及び内部(最表面から数μm深さ以内；最表面を含まず)について実施した．その結果，熱真空曝露による組成変化は極表面に限られ，炭素が減少し，フッ素が増加することが分かった．なお，曝露前の試料においても，材料表面から酸素が多く検出されている．架橋ETFE被覆材では，押出成形時の高温によって表面に酸化層が形成され，この酸化層が熱分解して腐食性のHF(フッ化水素)を放出することが分かっている．今回の試験でも，熱真空環境曝露により，成形時の酸化層の熱分解が進み，変色，組成変化等

This document is provided by JAXA.

が起きたものと判断できる.

さらに，試験後の被覆材に対しASTM E595に準拠して実施したアウトガス測定試験結果を表 3に示す．放出ガス量を示す TML(質量損失量比)と放出ガス中の水分量を示すWVR(再吸水量比)の差が、熱真空試験前後で変化が無いことから、有機ガス成分の放出量は、熱真空曝露後でも減少しないことが言える。一般的に熱真空環境に曝露された材料は、低分子有機成分がガスとして放出し、その後のアウトガス量が低減されるが、今回の試験では、結晶融点を超える熱真空環境に曝されたことにより，材料の低分子量化(熱分解）が進み，アウトガスが発生しやすくなったと考えられる．ETFEの結晶融点に近い温度で運用された場合，そのアウトガス量は増加する可能性があり，ADEOS-IIの不具合原因とされる放電を起こすのに必要な真空度の低下は十分に起こり得る.

(b) 電子線照射試験

高分子材料に対する軌道上の主な劣化要素として，放射線(電子線)，紫外線，原子状酸素があるが，最も高温となった電線設置箇所はMLIに遮蔽されているため，紫外線や原子状酸素の影響は受けにくい．そこで，高温及び電子線照射の効果に着目した電子線照射試験を実施した．電子線による被覆材劣化の評価は，熱サイクル負荷での傷の発生で確認することとし，試料形状は熱応力の影響を模擬できる渦巻き状とした．試料の最外周の曲率は，ADEOS-II搭載状態で最も厳しい曲率とした.

表 4の条件1～4に示す電子線照射を行った試料に対し，-65～200℃の熱サイクル試験を77回実施した．その結果，電子線照射量が最大，かつ照射温度が最高である条件4の試料において，図 2に示す輪切り状のき裂が3箇所で観察され，被覆材の脆化(伸びの低下)が生じることが明らかとなった．一般的に，電子線照射による高分子材料への影響は，架橋及び材料を劣化させる分子鎖切断の競合であるが，それら放射線の効果は高温ほど促進される.

表2　XPS元素分析結果（at%)

元素	未曝露		熱真空曝露後	
	表面	内部	表面	内部
C	72.07	83.12	45.18	83.87
Cl	0.37	-	-	-
Cu	-	-	0.05	0.11
F	17.65	15.71	40.12	14.84
N	0.97	0.91	0.48	0.81
Na	0.62	-	-	-
O	6.87	-	8.2	-
Sb	-	0.26	-	0.28
Si	1.16	-	5.95	-
Sn	-	-	0.02	-
Zn	0.29	-	-	0.09

表3 レイケム55電線被覆材のアウトガス特性

	未曝露	熱真空曝露後
TML(%)	0.098	0.164
CVCM(%)	0.002	0.014
WVR(%)	0.025	0.095

TML: 質量損失比 (Total Mass Loss)
CVCM: 再凝縮物質量比 (Collected Volatile Condensable Materials)
WVR: 再吸水量比 (Water Vapor Regained)

表4　電子線照射試験条件

条件	1	2	3	4	5	6	7	8
電子線照射量に相当する ADEOS-II　曝露期間（月)	10	30	100	1000	3	10	30	100
電子線照射量 (e/cm^2)	3×10^{13}	9×10^{13}	3×10^{14}	3×10^{15}	9×10^{12}	3×10^{13}	9×10^{13}	3×10^{14}
電子線のエネルギ (keV)	120	120	120	500	120	120	120	120
吸収線量 (kGy)	14.3	42.9	143.0	1430.0	4.29	14.3	42.9	143.0
照射中温度 (℃)	RT,100	RT,100	RT,100	230	230	230	230	230

そこで，同様の渦巻き状試料に対する追加の電子線照射試験を，条件4と同じ照射温度となる表 4の条件5～8で行った．さらに，電子線照射と熱真空曝露による相乗的な材料劣化評価のため，電子線照射→熱真空曝露，熱真空曝露→電子線照射と順番を変えた試料を作成した．熱真空曝露条件は，レイケム55電線の寿命（伸び50%低下）のカタログ値200℃，1万時間に対する加速試験の条件として、表 5（条件B～Dが寿命相当）のとおり設定した．なお，軌道上の最悪条件は，同様のアレニウス則で換算すると260℃では167時間となり，表 5の条件より厳しいものとなっている．他の特性劣化の可能性があるが，別途実施された引張試験結果では，260℃の温度条

This document is provided by JAXA.

件では，15 時間，167 時間の曝し時間による伸びの変化は小さいことが分かっている．

電子線照射及び熱真空曝露を行った渦巻き試料に対しては，0～130℃及び 115～255℃の 2 条件の熱サイクル試験を実施した．0～130℃では ADEOS-II が受けた 4000 サイクルを超える 6000 サイクル，115～255℃では 750 サイクル（試験装置の制約のため，サイクル数を多くできなかった）の負荷後も，き裂の発生は見られなかった．一方で，次項に述べる束線電線での放電が確認されたことから，束線状態特有の材料損傷要因があるものと考えられる．

(c) 束線試料の損傷評価

別試験 [2]により，熱サイクル後に放電が確認された束線試料には，放電痕(熱による被覆材の黒色化)を伴う芯線まで到達した傷が確認された．

これは，放電現象を起こし得る程の傷が発生し放電に至ったか，被覆材の絶縁特性の劣化により放電が発生し，その際に被覆材に傷が生じたかのいずれかの事象が発生していたと考えられる．被覆材劣化と放電の関係については、より詳細な評価が必要であるが，これまでに実施された試験では，軌道上での運用期間に相当する熱負荷後も，電線被覆材は十分な絶縁特性を有するという結果が得られている．そのため，被覆材に放電を起こし得る傷が発生したと仮定し，かつトリー等の放電の痕跡の有無に注意しながら，被覆材の分解観察を行った．

観察の結果，大きく開口した破面は滑らかであり延性破壊の様子はなかった．また，図 3 の(a)（真空中 100～250℃，約 5, 000 サイクル負荷）は斜め方向に，(b)（260℃，167 時間の熱真空曝露後，大気中 0～130℃，約 2, 400 サイクル負荷）は電線の長さ方向に傷が進展している．特に(b)の傷は 3mm と長く，かつ幅広く開口している。この発生に必要な大きな熱歪みが熱サイクル試験で起きるとは考えにくく，一般的な高分子材料の破壊形態からは説明できない．そこで，この破壊形態について，本被覆材の材料に特有なものとして考察する．

まず平滑な破面であるが，これは，ゴムが引張破壊した際の破面と類似している．ゴムの弾性的な性質は架橋構造に起因しているが，電子線架橋された ETFE 被覆材も結晶融点近傍以上の温度で架橋が支配的な構造となり，ゴムと同様な機械的特性をもつものと考えられる．以上から，今回見られた傷は，結晶融点近傍以上の温度で発生したものと推察される．

さらに，電子線架橋した高分子材料では，結晶融点を超える際に成形前の形状に戻ろうとする形状回復現象が生じる．高分子材料への電子線架橋の最も大きな用途は熱収縮チューブであるが，これは，成形時に延伸を加えて冷却し，その後結晶融点以上に加熱することにより元の形状に戻る性質を利用している．今回の電線被覆材では，長手方向に押出加工がされているため，結晶融点を超えると長手方向には収縮，円周方向には引張の力が発生し，長手方向若しくは斜め方向にき裂が進展しやすくなる．また，高分子材料では，延伸方向に垂直な方向に脆くなりやすい．この初期評価試験として，熱真空曝露後の試料に対し、半田ごてによる被覆材局所加熱試験を行ったところ，図 4 に示すような，電線の長手方向若しくは斜め方向に進展する平滑で開口の大きな傷の発生が確認された．

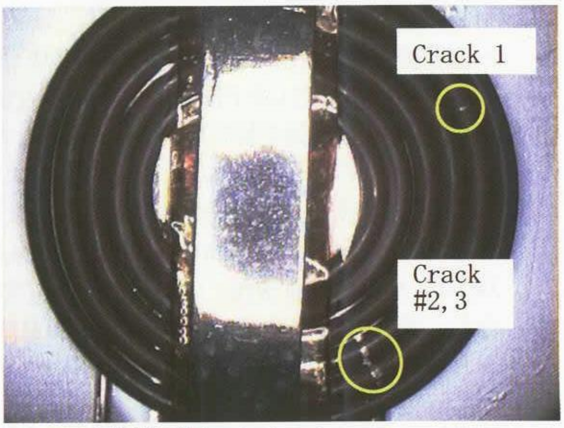
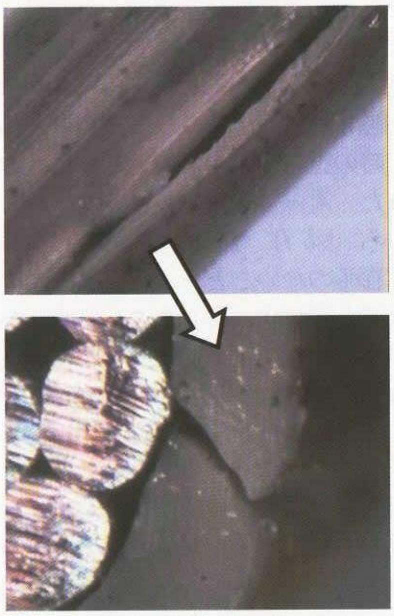


図 2　電線被覆材のクラック
（電子線照射及び熱サイクル後に発生）

表 5　熱真空曝露条件

条件	A	B	C	D
温度（℃）	260	260	280	300
時間（時間）	15	41	7	1

(a)



(b)

図 3　ハーネス束において発生した電線被覆材クラック

This document is provided by JAXA.

これら事象の確認のため，電線被覆材について，長手方向及び円周方向での熱膨張率測定試験及び円周方向の引張試験を実施した．

電線被覆材の熱膨張特性について，TMA（熱機械分析装置）を用いて測定した円周方向での結果を図 5，6 に，DMA（動的粘弾性測定装置）を用いて測定した長さ方向での結果を図 7 にそれぞれ示す．各試験条件は表 6 のとおりである．円周方向の熱膨張特性評価には十分な試験片サイズを確保できないため， AWG 22 番線より径の太い AWG 16 番線（二重被覆）の外側の被覆材を用いている．なお，長さ方向の熱膨張率測定には，ADEOS-II 軌道 10 ヶ月相当のガンマ線曝露後の試料を用いている．

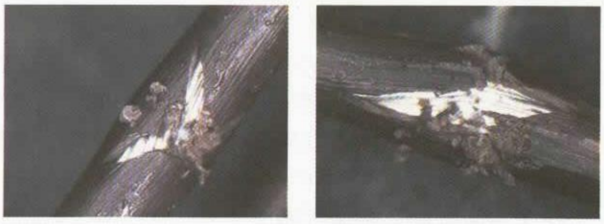


図 4 半田ごてによる被覆材加熱試験で発生したクラック

表 6　熱膨張特性評価試験条件

	電線被覆材の測定方向	試料	装置	温度範囲（℃）	昇降温速度（℃/min）	試料形状	その他の測定条件	雰囲気
TMA	円周方向	未曝露／245℃、167 時間曝露	理学電機工業（株）製 微小定荷重熱膨張計	25 ～ 300	2	15mm 幅，10mm 長の切片を幅方向に巻いて円筒状にしたもの	荷重：0.5g（圧縮）	窒素ガス流
DMA	長手方向	ガンマ線 ADEOS-II 軌道 10 ヶ月相当照射	ｾｲｺｰｲﾝｽﾂﾙ（株）製 DMS6100	40 ～ 300	2	試料長 20mm の短冊状	測定周波数：1Hz 動的歪み：10 μm	窒素ガス流

図 5 に示すとおり，電線被覆材の円周方向は，結晶融点近傍の 240℃付近において急激に膨張し，300℃では初期形状に対し，7%の膨張率となった．その後，25℃まで試料を降温させたところ，初期値に対し 5%程度の収縮を生じ，その後の再昇温，再降温においても同様の結果を示したことから，本試料の熱膨張は 11～12%程度であることが言える．なお，予め 245℃, 167 時間熱真空曝露した試料について同様の測定を行ったところ，300℃において，初期値に対し約 11%の熱膨張が見られた（図6）．これらの大きな熱膨張は，結晶融点以上に加熱されることにより，被覆材内部に残っていた電線被覆加工時の歪みや配向が解放されたものと考えられる．

また，電線被覆材の長さ方向に対し行った DMA 測定結果から（図 7），1 回目の昇温過程において 150℃まではほとんど膨張のないこと，また，昇温過程にも係らず 250℃近傍で急激な熱収縮が生じることが明らかとなった．連続的な膨張が発生する中で，相反する収縮が生じるため，ADEOS-2 の電線被覆材は，局所的に大きな負荷がかかった可能性がある．特に，隣接する電線被覆材間で，膨張・収縮による磨耗が発生する可能性が高い．

以上の熱膨張特性評価結果から，室温から 300℃までの温度範囲において，本電線被覆材の円周方向に約 11 %の膨張が発生することが分かった．この熱膨張量が，電線被覆材の損

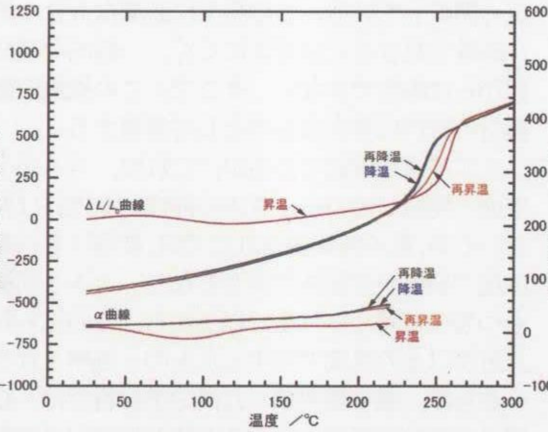


図 5　電線被覆材円周方向の熱膨張特性（未曝露品）

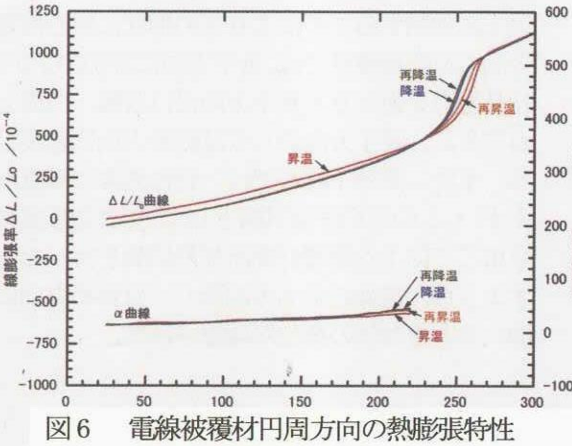


図 6　電線被覆材円周方向の熱膨張特性（高温曝露品）

This document is provided by JAXA.

傷を引起す可能性評価を目的として，電線被覆材の歪み量を引張試験により測定した．試験はTMAによる熱膨張測定試験で用いたものと同様のAWG 16番線の外側の被覆材を試料とし，大きな熱膨張を示した円周方向に対し，表7の条件で実施した．

引張試験で得られた結果の代表例を図8に示す．

高温曝露品では，熱劣化が原因と考えられる歪みの減少（脆化）が見られた．また，試験時の温度環境では，高温状態において，最大応力，歪みとも大きく減少した．

最も歪みが小さかった，高温曝露品，高温状態での引張試験結果では，温度変化により発生する約11%の歪み量は，電線被覆材の弾性領域（10%歪み）を超えていた（図9）．

なお，束線電線の傷発生箇所には，隣接電線と接触した状態で熱サイクルが負荷されたことによるものと思われる磨耗痕(窪み)が見られた．さらに，230℃において隣接する電線被覆材が固着することが別の試験[2)]で確認されていることから，電線被覆材同士の接触箇所は，熱サイクル負荷時に応力の束縛点として働く他，被覆材の肉厚減少や傷発生の原因となる磨耗を起こし得る．

以上を総合して考えると，電線被覆材同士の接触箇所において，被覆材の磨耗，肉厚減少が発生，さらに熱サイクル負荷時に材料の膨張，収縮に伴う繰返し応力と形状回復により生じる応力が負荷されることで，傷が発生，進展するものと考えられる．加えて，軌道上の熱真空，電子線等による材料の脆化が生じ，熱サイクルによるき裂発生をより容易にしていた可能性が高い．

(d) 使用可能温度の評価

今後の宇宙機の設計指針となるデータ取得を目的とし，本電線被覆材の使用可能温度の評価を実施した．

電線被覆材長さ方向のDMA測定結果（図6）から，ほとんど膨張が見られなかった150℃を使用可能温度と仮定し，同様の電線被覆材長さ方向（AWG 22番線，ガンマ線照射無し）のDMAによる熱膨張特性評価試験を実施した．

得られた結果を図10に示す．2サイクル目以降に加工時の歪み解放の様子が見られるものの，150℃における膨張の変化はない．

常温から150℃までの熱サイクル負荷で特異な熱膨張収縮は発生しないことから，150℃は熱サイクル環境に対する安全な使用可能温度であると判断できる．

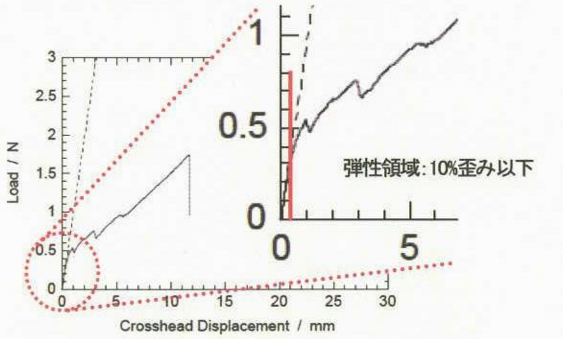


図9　電線被覆材円周方向の弾性領域

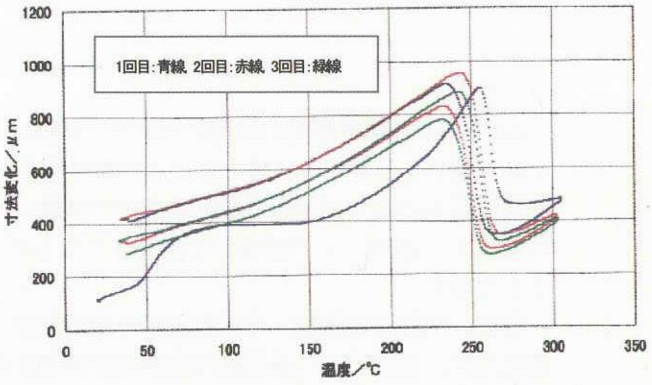


図7　電線被覆材長さ方向の熱膨張特性

表7　引張試験条件

試料形状	試料前処理	試験温度
幅約1mmの短冊状 標点間距離6mm	・未曝露 ・245℃、169時間 熱真空曝露	・23℃ ・260℃ （大気中）

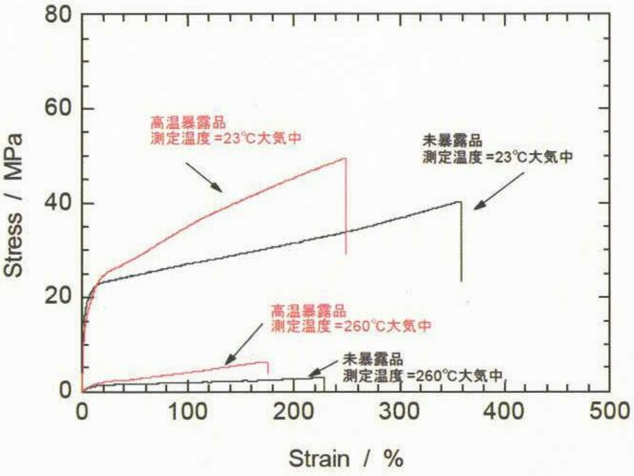


図8　電線被覆材円周方向の引張試験結果

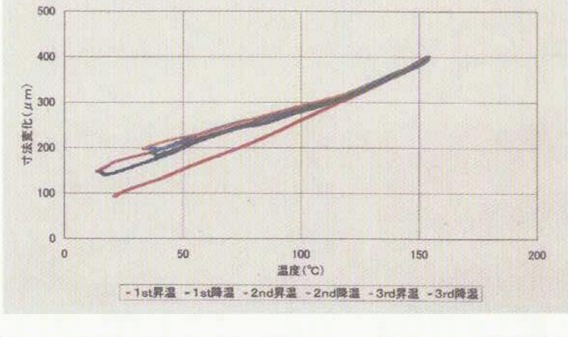


図10　電線長さ方向に対する150℃までの熱膨張特性評価結果

This document is provided by JAXA.

4．まとめ

ADEOS-II 電線被覆材の損傷について、試験による検証を実施した．電子線照射試験では，軌道上環境レベルを大幅に超える条件のみ，熱サイクル試験中に傷が発生した．他の熱サイクル試験では，束線状態では被覆材に傷が生じるものの，渦巻き(単線)状態での試験では傷の発生はなく， 束線状態，かつ結晶融点付近までの熱サイクル環境が，ADEOS-II の被覆材を損傷させたものと仮定し，熱膨張特性評価試験及び引張試験によって検証することができた．

なお，同種の電線は，今後打上げ予定の衛星にも使用される見込みであり，今回評価を行った安全使用可能温度に加え，総合的かつ長期的な耐環境性評価を継続して，データを蓄積し，プロジェクトの着実な推進に貢献していきたい．

本評価試験の実施にあたり(株)エイ・イー・エス及び(株)東レリサーチセンターの皆さんのご尽力を頂いた．記して感謝する．

参考文献

1) 石澤 淳一郎、馬場 尚子、マイケル・ニーシュ、南 伸太朗、今川 吉郎、黒崎 忠明、前島 弘則、小島 寧：みどり II (ADEOS-II) 運用異常に対する材料の劣化評価解析，平成 15 年度 宇宙航空研究開発機構 総合技術研究本部 宇宙領域 研究成果報告書，(2004)，pp.4-5～4-10．

2) 高橋真人，川北史朗：ADEOS-II 運用異常原因究明概要，宇宙環境シンポジウム，(2005)．

This document is provided by JAXA.