

みどり II (ADEOS-II) 運用異常に対する材料の劣化評価解析

Evaluation and Analysis of Material Degradation for ADEOS-II Failure Cause Investigation

マテリアル・機構技術グループ

(Mechanical and Materials Engineering Group)

石澤 淳一郎、馬場 尚子、マイケル・ニーシュ、南 伸太郎、今川 吉郎

Junichiro Ishizawa, Naoko Baba, Michael J. Neish, Shintaro Minami, Kichiro Imagawa

宇宙利用推進本部 ADEOS-II プロジェクトチーム

(Office of Space Applications ADEOS-II Project Team)

黒崎 忠明、前島 弘則、小島 寧

Tadaaki Kurosaki, Hironori Maejima, Yasushi Kojima

Abstract

ADEOS-II(Advanced Earth Observing Satellite-II) stopped supplying observation data due to reduction of electric power supply. FTA (Fault Tree Analysis) suggested that breakage or short circuit of the power supply harness between PDL (Solar Array Paddle Subsystem) and the electric power subsystem was the most possible cause. Each phase of the failure scenario was evaluated with tests and analyses. This paper reports evaluation of material degradation for the failure case verification.

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。

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。異常発生時、衛星の姿勢変動及び軌道変化が観察された。テレメトリデータ等の解析により、このとき作用した力積の起点は、太陽電池パドルブーム部を横切る面上に存在していることが確認された。

Table 1 Power supply harness configuration

Harness (Large)	Harness (Small)
<u>Cable Total 106</u>	<u>Cable Total 90</u>
Power line 104(52Circuit)	Power line 24(12Circuit)
Signal line 2	Signal line 60
MLI(Multi Layered Insulator)	
Polyester film(Thick, Thin)	
Polyester net	
Polyimide film	

2. 2 太陽電池パドルハーネス概要

ハーネスの概要を Table 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。

このハーネス部で使用されている電線は、レイケム55 AWG22 番線(公称外径1.09mm)であり、Figure 1 のように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、融点や耐アーク性に劣るが、成形性が良く押出・射出成形が可能のため、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。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。

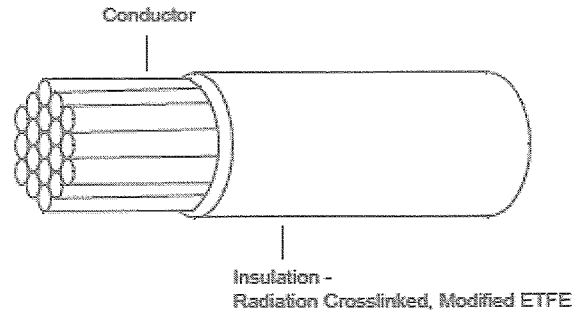


Figure 1 Structure of Raychem #55 (Single wall) wire

(From Raychem Corporation website)

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。当グループでは、事象②の被覆損傷、及び事象⑤に伴う姿勢変動・軌道変化の成立性を検証する試験を実施した。

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、また、直接電線被覆材を損傷させる(d)デブリ衝突による損傷評価を実施した。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Table 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 Table 3 に

示す。放出ガス量を示す TML(質量損失)で比較すると、熱真空曝露試験後の被覆材の方がアウトガス量が多いことが分かる。これは、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MLII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、温度サイクル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。

Table 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、Figure 2に示す輪切り状のき裂が3箇所観察され、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。

Table 4 Conditions of electron beam irradiation

Condition	1	2	3	4	5	6	7	8
Equivalent time in ADEOS-II orbit for electron beam fluence [month]	10	30	100	1000	3	10	30	100
Electron beam fluence [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}
Energy of electron beam [keV]	120	120	120	500	120	120	120	120
Absorbed dose [kGy]	14.3	42.9	143.0	1430.0	4.29	14.3	42.9	143.0
Temperature during irradiation [°C]	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 Table 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atalog値200℃、1万時間に対し、加速試験条件の一般的な導出方法であるアレニウス則(電線被覆で適用されることの多い指数:2.5を適用)を利用して、Table 5(条件B~Dが寿命相当)のように算出した。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、Table 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はあるが、別途実施された引張試験結果では、260℃の温度条件では、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状試料に対しては、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

Table 2 XPS elemental analysis result [at%]

Element	Virgin		Thermal vacuum	
	Surface	Inside	Surface	Inside
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

Table 3 Outgassing data of ETFE jacket

	Virgin	Thermal vacuum
TML[%]	0.098	0.164
CVCM[%]	0.002	0.014
WVR[%]	0.025	0.095

TML: Total Mass Loss
CVCM: Collected Volatile Condensable Materials
WVR: Water Vapor Regained

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、被覆材の絶縁特性等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より詳細な評価が重要であるが、これまでに実施された試験では、軌道上の運用期間に相当した熱劣化後も、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、Figure 3の(a)は斜め方向に、(b)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おり、そ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。そのため、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り、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、長さ方向に押出加工がされているため、結晶融点近傍を超えると長さ方向は収縮、円周方向は引張の力が発生し、長さ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。これらの確認のため、今後円周方向での引張試験を行う予定である。

熱膨張による影響が含まれる可能性があるが、半田ごてによる被覆材加熱試験においても、Figure 4に示すような、電線の長さ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。

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で確認されていることから、電線被

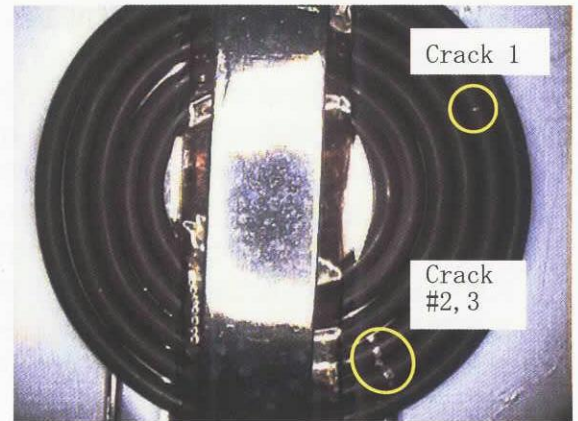


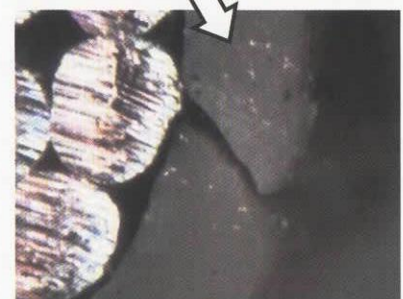
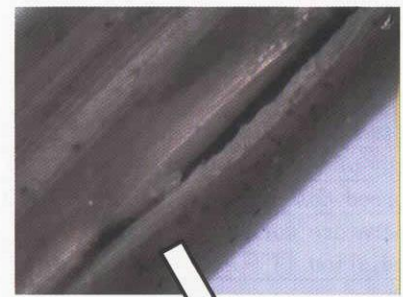
Figure 2 Cracks appeared in electron beam irradiated cable

Table 5 Thermal vacuum conditions

Condition	A	B	C	D
Temperature [°C]	260	260	280	300
Time [Hour]	15	41	7	1



(a)



(b)

Figure 3 Cracks appeared in tie-up cable

覆材同士の接触箇所は、固着することにより熱サイクル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し得る。

以上を総合して考えると、電線被覆材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) デブリ、又はメテオロイドの衝突による損傷評価

衛星に対し四方向より衝突するデブリ及びメテオロイドの密度を解析により求め、環境計測技術グループと連携して、ハーネス損傷の可能性を検討した。ブームハーネスを直撃する方向(太陽電池パドルに対して $\pm 90^\circ$)の粒径別密度をTable 6に示す。解析結果より、粒径1mm以上のデブリ・メテオロイドの密度は小さく、衝突する可能性が極めて低いことがわかる。

Table 6 Space debris and micrometeoroid impact flux [$/\text{m}^2/\text{year}$]

Diameter	Inclination of +90 degrees from the solar array paddles			Inclination of -90 degrees from the solar array paddles		
	Debris	Meteoroid	Total	Debris	Meteoroid	Total
$>1 \mu\text{m}$	2,263	1,001	3,264	1,739	938	2,677
$>0.01 \text{mm}$	952	216	1,168	572	217	789
$>0.1 \text{mm}$	9.04	3.62	12.66	8.8	3.63	12.43
$>1 \text{mm}$	1.849×10^{-2}	4.78×10^{-3}	2.327×10^{-2}	1.715×10^{-2}	3.886×10^{-3}	2.104×10^{-2}
$>1 \text{cm}$	4.481×10^{-5}	5.72×10^{-6}	5.053×10^{-5}	4.067×10^{-5}	4.567×10^{-6}	4.524×10^{-5}
$>10 \text{cm}$	2.27×10^{-6}	5.717×10^{-6}	7.987×10^{-6}	2.082×10^{-6}	4.567×10^{-6}	6.649×10^{-6}

微小粒子の高速衝突試験を実施したところ、MLIを貫通してハーネスを損傷した粒径は $400 \mu\text{m}$ から $500 \mu\text{m}$ 程度であった。試験結果より、ハーネスに損傷を与え得るが、ハーネス全体の破断には至らない衝突物体の粒径は $100 \mu\text{m}$ から 1mm の範囲内、かつ中央付近に分布することが判った。該当する粒径の粒子が大電力ハーネスに衝突する確率(解析値)をTable 7に示す。衝突角度・位置等による変動を考慮して粒径 $300 \mu\text{m} \sim 800 \mu\text{m}$ の領域をみると、1年間に粒子が衝突する確率は6.7%であり、ADEOS-II電線被覆に傷を発生させた可能性も排除できない。

3.2 隣接ハーネスへの波及(傍証)

異常発生時に観測された姿勢変動及び軌道変化を、事象⑤に伴う電線被覆からの発生ガス噴出によるものと仮定し、被覆材高温加熱時の発生ガス量及び組成確認試験を実施した。高温炉に被覆材を設置し、酸化を防ぐためHe雰囲気中で加熱した後、炉内ガスをサンプリングした。発生ガスの分析は、有機成分にガスクロマトグラフ及びガスクロマトグラフ質量計を、HFに検知管を夫々使用して行った。試験結果をTable 8に示す。

加熱温度が 500°C 以下のケースでは、加熱後のサンプルは原形を留めていたが、 600°C 以上のケースでは灰状となった。重量減少率は 400°C から 500°C の間で急激に上昇し、 800°C では99%以上が気体となって放出された。 400°C のケースを除き、発生ガスの主成分はHFであった。

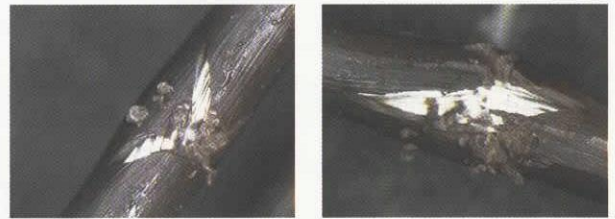
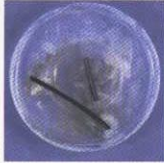





Figure 4 Cracks appeared in soldering iron test

Table 7 Probability of impact on the harness

Particle diameter [μm]	Flux [$\text{m}^{-2} \text{yr}^{-1}$]	Probability of impact in one year
100	11.5	42.3%
200	2.33	10.6%
300	0.61	2.90%
400	0.32	1.52%
500	0.20	0.98%
600	0.13	0.64%
700	$8.23\text{E-}02$	0.39%
800	$5.87\text{E-}02$	0.28%
900	$3.37\text{E-}02$	0.16%
1000	$2.16\text{E-}02$	0.10%

Table 8 High temperature offgassing test summary

Sample temperature	°C	400	500	600	800
Sample mass (Pre-test)	mg	25.111	25.188	25.085	25.757
Mass loss	%	17.94	79.07	95.99	99.32
Post test sample					
Offgassed products					
HF	ppm	-	4	6.8	8
Mehtane	ppm	-	-	-	0.189
CO	ppm	0.24	3.05	1.34	22.1
CO2	ppm	-	-	-	83.6
Ethyl alcohol	ppm	0.041	-	-	-
Acrolein	ppm	-	0.046	-	-
C5-C7 Fluorinated hydrocarbon	ppm	-	0.076	-	-
Difluorobenzene	ppm	-	0.015	-	-
Tetrafluorobenzene	ppm	-	0.026	-	-
Trifluorobenzene	ppm	-	0.027	-	-
C4 alkene	ppm	0.023	0.033	-	-
Ethylene	ppm	-	0.092	-	-
Propylene	ppm	-	0.028	-	-

検出された有機成分の分子量は、いずれも 300 程度以下であった。本試験ではコールドサンプリングを行ったため、炉内及びサンプリング系への吸着により高沸点有機成分の捕集率が低下したものと考えられる。委託分析により、吸着管を用いて高沸点有機成分を捕捉したところ、発生ガスの平均分子量は 500°C 加熱ケースで 20~47、800°C で 11~49 であった。

異常発生時に観察された姿勢変動より、衛星には約 4 分間トルクが作用し、ロール/ピッチ/ヨー夫々に -1.0Nm/+0.6Nm/-2.0Nm 程度の角運動量が蓄積されたことが判っている。発生ガスの平均分子量及び被覆の質量減少率を用いて、相当するトルクを生じうるハーネス束の焼損長さを推定したところ、3cm~11cm 程度となった。多数回路の放電波及試験等の結果から、この程度のハーネス長が熱損傷する可能性は高く、観察事象は本仮定により説明できるものと考えられる。

4. まとめ

ADEOS-II 電線被覆材の損傷、及び熱損傷したハーネスからのガス放出について、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、温度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考えられる。デブリやメテオロイドの衝突についても、不具合原因となり得る可能性が示唆された。

また、電線被覆加熱時の発生ガス分析により、ハーネスの熱損傷による発生ガスが MLI の隙間や熱損傷によって生じた破損箇所から噴出し、異常発生時に観察された姿勢変動及び軌道変化を起こしうることが確かめられた。

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るため、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、有人宇宙システム(株)及び(株)アミルの皆様のご尽力を頂いた。記して感謝する。