

耐原子状酸素コーティング技術の国際標準化

国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構
研究開発部門 第一研究ユニット 研究領域主幹
木本 雄吾

2022年9月27日「ISO 23129:2021 Space system-Thermal control coatings for spacecraft - Atomic oxygen protective coatings on polyimide film」が発行された。本ISOは原子状酸素耐性を持つ各種コーティングを付与したポリイミドフィルムに関して、特性要求、各種試験要求並びに各種コーティングの特徴及び適用ガイドラインを規定したもので、日本が主導して成立した。本標準内容及び本標準に関わる背景、成立の経緯等および今後の展望について、既存の資料等を参照しながら解説する。本標準制定プロジェクト推進においては、New work item Proposal (NP) 登録前にステークホルダーからのニーズ収集、各種試験データの取得を行った。国際技術審議に際してはこれら試験データや文献を提示し、論拠を明確にして審議を進めた。このような入念な準備活動が本標準制定へ功を奏した。

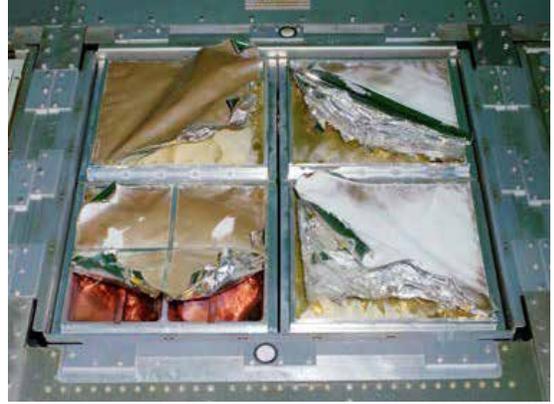
1. 原子状酸素とその影響

原子状酸素 (Atomic Oxygen (AO)、以下AOと呼ぶ) とは何であろうか。AOは高層大気成分の一つに過ぎない。しかしながら、それは低軌道を周回する衛星の材料設計に大きな影響を及ぼす [1]。特に多層断熱材 (Multi Layer Insulator (MLI)) の最外層である有機材料を浸食し、ボロボロにしてしまう。この結果、熱的、機械的に影響が起こるだけでなく、ちぎれた破片、粒子が他の機器に悪影響を及ぼ

す危険性もある。宇宙空間での実際の劣化状況については、Banksらの文献 [2] が有名であるが、ここでは別の例について紹介したい。NASAは「A Researcher's Guide to International Space Station Space Environment Effects」と題し、科学者向けに国際宇宙ステーション (International Space Station (ISS)) を研究プラットフォームとして利用をする際、宇宙環境の点で注意すべき点について紹介している [3]。その中で、図1はAOを中心とした宇宙環境と材料への影響を示す例として示されている。図1の画像はLong Duration Exposure Experiment (LDEF) 長期曝露実験施設へ搭載された重イオン計測実験装置のフライト前後 (LDEFは1984年4月7日にスペースシャトルチャレンジャーで打上げ。1990年1月12日にスペースシャトルコロンビアで地球に帰還、回収。軌道上 (高度400km-286km) に結果的に69か月間 (5.7年間) 滞在した) であるが、重イオン計測センサの前面に設置されたMLI最表層 (白色コートされたAl裏面蒸着カプトン®) は取り付け部が破損、捲りあがっている状態となっている。JAXAは国際宇宙ステーション等を利用して、宇宙材料曝露実験を行ってきた [4]。きぼう搭載材料曝露実験装置において、8.5か月間宇宙空間に曝露され、地上へ回収された耐原子状酸素性処理をしていないブラックカプトン®は図2に示すとおり、半分以上が消失していた [5]。このように、有機材



(a) フライト前

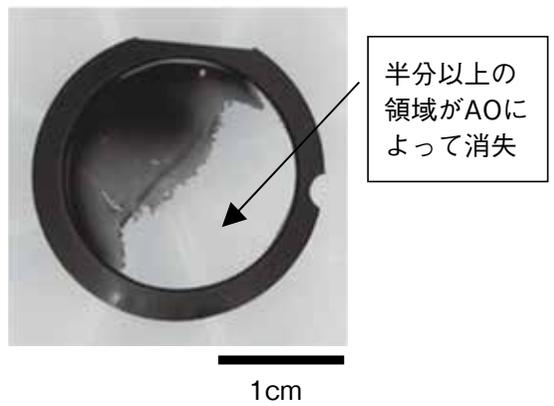


(b) フライト後

図1 LDEF実験で搭載された実験機器のフライト前後の写真 [2]



(a) 軌道上の材料曝露実験装置
(2009年7月撮影)



(b) 地上回収ブラックカプトン®

図2 きぼう搭載材料曝露実験装置におけるAOの影響 [4]

料を低軌道で使用する場合、ミッションによっては適切な対策が不可欠である。

2. 耐原子状酸素性材料の課題と新材料 [6]

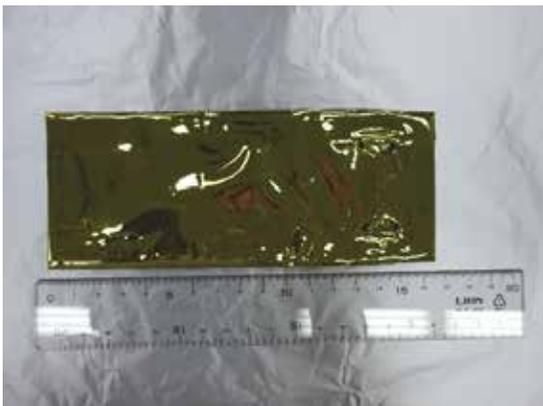
上述のとおり、原子状酸素は有機物表面を浸食する。単層、多層断熱材等の熱制御材、塗料等の有機材料は表面が浸食され、熱光学特性が変化する上に材料自体の構造が変化するため、強度的な低下も生じる。

耐原子状酸素性の付与、即ちコーティング技術は、対策の一つである。例えば、酸化インジウムスズ (ITO)、ゲルマニウム (Ge)

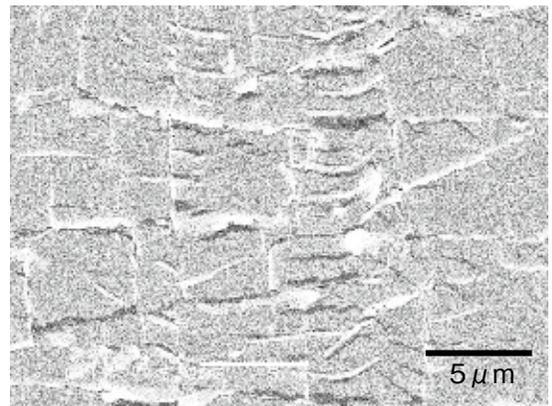
などの無機物は優れた耐原子状酸素性を示す。これらを耐放射線性、耐熱性が優れた有機フィルムであるポリイミドへ施し、宇宙用熱制御材料の最外層として使用することが、従来から行われている。しかしながら、地上取り扱いの上で課題はある。図3にフライトプロジェクトで実使用を予定していたMLIの表面観察結果について示す。本MLIは衛星システムへ引き渡す前に、表面を走査電子顕微鏡 (Scanning Electron Microscope : SEM) で観察したところ、ITOコーティングに点、線状、格子状の傷が多数発見された (図3 (b))

は一例)。本MLIはコンポーネント側で各種PFM試験（電気性能、振動、衝撃、熱真空試験）を経たものであるが、慎重に扱っていたにも関わらず、このような表面状態であり、ITOコーティングの欠陥が生じていた。このような微小な欠陥は、文献 [2] に示されたような「原子状酸素起因の劣化」の起点になり、軌道上にて同様な事象を引き起こす可能性が高い。ITOは優れたAO耐性を持つ材料ではあるが、透明で極めて薄い（ナノレベル）無機コーティングであるために、目視による表面状態の確認ができず、また“硬い”ために地上での取り扱いに際し、割れやすいという欠点が存在する。

Geコートブラックカプトン®は優れた宇宙環境性（原子状酸素、紫外線、放射線）、且つ導電性、電波透過性を持つことから、10数年前までは良く使用された。しかしながら、衛星の組み立て段階で、変色をたびたび起こし、射場での交換を余儀なくされた。図4は筑波宇宙センターにおいてデシケータ内で長期保管（約9年間）されたGeコートブラックカプトン®である。中央部がGeコート特有の灰色が無くなり、下地のブラックカプトン®の黒色が見えている状態である。この理由はGeの変質によるものであるが、このようにGeコーティングは地上での取り扱いが難しい材料である。



(a) 観察したMLIの外観



(b) 表面損傷（SEMでの拡大画像）の例

図3 MLIの実際 [6]



図4 長期間保管されたGeコートブラックカプトン® [6]

これら課題を克服するべく新しいタイプの有機-無機ハイブリッド材料であるシルセスキオキサン（Silsequioxanes）を使用したコーティングの研究を行った。本コーティングは耐原子状酸素性だけでなく、耐宇宙環境性と取扱いを両立させたコーティングとして研究がすすめられた。

一方、母材自体に耐原子状酸素性を持たせたポリイミドの研究も進めている。「シロキサン変性ポリイミドシート（BSF-30）」は無機コーティングを必要とせず、AOに曝露されることにより自分自身で表面に保護膜となるSiO₂層を生成できることができる。そのため、MLIの最外層の他、積層構造物の母材等、広い応用が期待されている。

3. 国際標準化の検討

ISO/TC20/SC14（宇宙システム・運用分科委員会）[7] 内に7つある分科会の一つとして常設されたWG6（材料・工程）は宇宙機で用いられる材料及びその取扱い等に関連する技術標準を審議する専門委員会である。本WG6において、2014年2月にISO16691 Thermal Control Coatings for satellites and spacecraft -General requirements “衛星及び宇宙機に適用する熱制御コーティングへの基本要件”が制定された。ISO16691は宇宙機の熱制御用塗料への特性要求及び工程要求を規定する標準である。本標準の下位文書となる規格群の整備が議論、計画された。下位文書にはISO16691に記述されない種別コーティングの仕様や工程が含まれる。「耐原子状酸素コーティング」技術はこの文書体系の一部を構成するものの例として、日本よりWG6へ提案したものである。AOによる浸食は低軌道宇宙機に共通する課題であり、材料メーカー及び宇宙機システムメーカーが本技術の重要性及び標準の市場適合性を理解して

いたため、新しい国際標準を作成する機運が起こり、議論が活発に行われる土壌が形成された。

3.1 国内での審議

一方でWG6や2項で述べた課題や研究の動向に関連して、経済産業省委託事業 [8, 9, 11, 12] が2015年から2017年まで、2014年のフィージビリティスタディを経て行われた。宇宙機システムメーカ、材料メーカ、大学、宇宙機関の主に宇宙材料の専門家が委員として終結し議論を行った。計4年間の活動において、コーティング技術の有用性及び国際標準としての可能性、課題を明確化するとともに、国内、海外の宇宙機システムメーカ、材料メーカから耐原子状酸素コーティング技術に対する国際標準への要望を聴取し、ニーズを整理した。

2014年のフィージビリティスタディにおいては、国産の耐原子状酸素コーティング技術について国内の原子状照射試験機関による評価、本技術を世界に先駆けて国際標準化するための調査、及び国際標準化に向けた課題の洗い出しを行った [8]。シルセスキオキサンを使用した新しいコーティング及び既存技術であるITOコーティングを施工したポリイミドフィルムに対し、神戸大学・九州工業大学・JAXA の3機関にて原子状酸素照射試験を実施し、コーティング性能を評価した。照射後の質量、及び熱光学特性を計測した結果、新開発コーティングは既存ITOコーティングとほぼ同等の十分な耐原子状酸素保護性能を示した。同時に国内、海外宇宙メーカから耐原子状酸素コーティングに関する国際標準への要望等を聴取した。結果、既存を含む各種コーティングに対する全般的な要求項目（機械特性、熱光学特性、耐宇宙環境性、施工性等）と各種コーティングの特性・特質、選定指針

にニーズがあることが判った。これら調査結果から宇宙用コーティングを規定する国際標準の制定は、これまでの取得データ及びこれから追加試験で得られるデータがあれば十分に可能であると判断された。また原子酸素照射試験等、試験方法が国際的に確立されていない特性要求項目がある等の課題も明らかとなった。

2015年以降の活動においては、不足していた基礎データを取得するとともに、標準試案を作成し国際会議の場で提案するための準備を行った。不足していた基礎データの一つとして、地上ハンドリングの際に生じた擦り傷等がAO耐性にどのように影響を及ぼすかを評価した。この定量的評価のために、屈曲及び摩擦負荷を4種（SiO_x、ITO、Ge、シルセスキオキサン）のコーティングコートポリイミドフィルムに加え、負荷後の試料にAOを照射し、照射後の質量、熱光学特性の変化を計測した。また帯電解析に必要な二次電子放出計数、光電子放出計数、体積抵抗率、表面抵抗率の計測を行った [9]。

これら地上評価試験を行う一方で、シルセスキオキサンコーティングコートポリイミドフィルムの宇宙環境曝露実験の準備を開始した。本サンプルは「きぼう」日本実験棟簡易曝露実験装置（ExHAM）において行われたカーボンナノチューブの宇宙曝露実験 [10] において、耐AO対策として使用されたものである（図5）。この分析結果は、宇宙実証データとして、本標準の参考データとなる。

2016年においては前年度摩擦・機械負荷を行ったサンプルの詳細分析（SEM等）を行った。これは前年度、摩擦・機械負荷後にAO照射した4種コーティングを比較評価したところ、シルセスキオキサンの質量減少が他無機コーティングに比して大きかった理由を解

明するためである。この質量減少がコーティング欠陥部のベースフィルム浸食によるものかどうかを試験及び解析により評価した。SEM 観察では、シルセスキオキサンの欠陥は他無機コーティングより優位に少なかった。AO非照射で真空放置したところ、アウトガスのみによる質量減少は機械負荷及びAO照射による減少量の1/4～1/2程度であった。よってシルセスキオキサンからのアウトガスは極めて少ないことが確認された。地上AO照射において、SQ 表層には約20nm 厚のSiO₂層が形成されていることは透過型電子顕微鏡（Transmission Electron Microscope (TEM)）による分析でわかっている。無機化（SiO₂層形成）に伴う有機基の離脱による質量減少を解析的に評価したところ、理論質量減少は試験値とよく合致した。以上より、AO照射によるシルセスキオキサンの質量減少はSiO₂層形成に伴う有機基の離脱によるもので、コーティングの脆弱性が原因ではないと説明できた [11]。

一方で本標準の確立を世界的な合意を経て実施するため、国際的に大きなシェアを持つと考えられる米国のMultek社（Sheldahlブランド）及びATU社へ標準化活動への参画を打診した。ATU社からは活動参加への同意を得ることができ、その後標準の内容がフェーズアップする度に貴重な意見を聞くことができた。耐AOコーティングを製造する仏国のMAP社の協力も得られた。

最終年である2017年においては、識別された課題である国際的にも確立されていない特性試験方法の検討及び宇宙から帰還したシルセスキオキサンコートポリイミドフィルムの分析を行った [12]。前者の検討結果として、コーティングコートフィルムの体積抵抗率はベースフィルムに大きく依存していることが判明したため、表面抵抗率と体積抵抗率両方

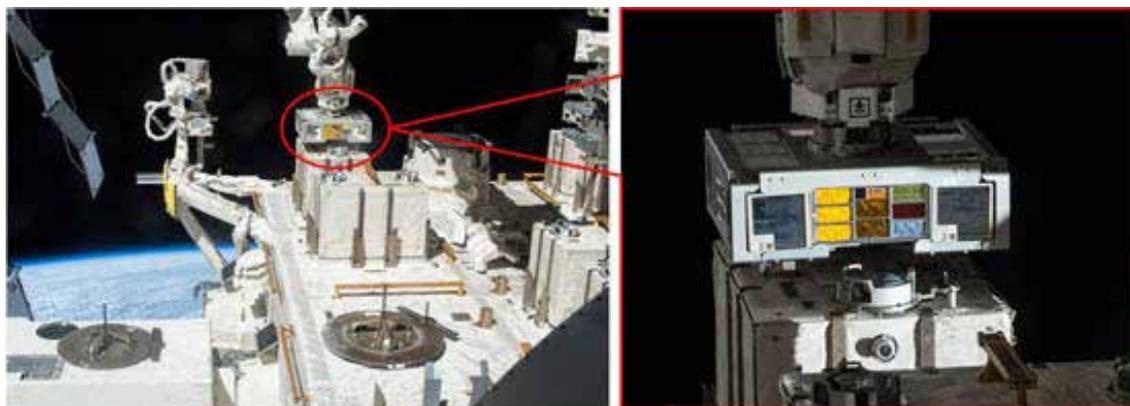


図5 国際宇宙ステーション上に設置されたExHAM

について標準に記載すること、コーティング/ベースフィルム間の密着性評価にはクロスカット法（主に塗料の密着性評価に適用される）は適さないため、テープ引きはがし試験のみとすること等の結論を得た。後者について国際宇宙ステーション進行方向（RAM面）に1年4か月間曝露した試料を地上回収し、観察を行った。TEM分析では、シルセスキオキサン最表層に120nm程度のSiO₂層が観察された。施工時に1μm程度だったシルセスキオキサン層は670nm程度に薄くなっていた。AO被曝の大きいRAM面では、昨年度回収した後尾側（Wake面、SiO₂層約50 nm）に比してより厚い無機酸化層が形成されることが判った。この無機酸化層がAOを阻止する。下層のポリイミドフィルムの浸食を防ぐ保護機構がこのように宇宙環境において実証された。

3.2 WG6での国際審議

3.1項に示す活動と同時並行で上述のWG6内においても本耐AOコーティング標準の議論を行った。フィルム特性は、使用しているコーティングの量が微小（厚みが薄い）であるためにコーティングによってほとんど影響を受けない。ユーザとしてはコーティング

のみの特性ではなく、コーティングを施工した熱制御フィルム全体の特性に関心があるとの指摘があった。例えば熱光学特性はコーティングの有無による変化はほぼ無いと言える。コーティングの保護機能が健全であれば熱光学特性はAO照射によって変化しない。但し紫外線、放射線はコーティングを透過するため、ベースフィルムの熱光学特性を変化させる可能性がある。また耐AO特性を主眼とするも、耐AO性だけではなく、アウトガス特性、耐放射線性等、宇宙機での使用を前提として他の特性を含めた標準にするべきとの要望があった。これら議論を経て、標準の対象範囲について当初はベースフィルムを含めずコーティングのみとすることを提案していたが、合意には至らず、①コーティングのみ、②ポリイミドフィルム上のコーティング、③各種フィルムとコーティングの3案について検討することとなった。結論として、ベースフィルムを宇宙用フィルムとして代表的なポリイミドフィルムに絞り、タイトルを「Thermal control coatings for spacecraft - Atomic oxygen protective coatings on polyimide film（ポリイミドフィルム上の耐原子状酸素性コーティング）」として再度国際会議の場で説明した。標準の制定効果については、

コーティングコートフィルムに求められる特性を規定することで市場への新規参入及び価格競争を促進し、購買者により多くの選択肢を与えると説明した。国際審議を通じ、材料メーカ（側）とユーザ（宇宙機メーカ）（側）双方の要望が明確化できたと考える。材料メーカにとっては、ユーザ（宇宙機メーカ）によってデータ提示・試験の要求が異なり、都度対応する負荷が高いとの課題があった。一方、ユーザ（宇宙機メーカ）からは複数の材料の特性データを一律条件で取得・提示してほしいとの要望があった。国際標準が必要最小限の特性データ（並びに取得試験方法）を規定することで、材料メーカ及び宇宙機メーカ双方の課題解決を目指すことができると考えた。

これら審議を経て2017年9月にNP投票に臨んだ。2017年12月21日にNP投票を賛成7（伯、中、仏、日、露、ウクライナ、米）、反対0、棄権5（フィンランド、印、伊、ノルウェイ、英）で通過した。これ以降、国際標準プロジェクトスケジュールに従って、主に春と秋に行われるWG6会合で議論が進むことになった。

2018年の会合においては、放射線試験（特に陽子照射試験）の必要性、紫外線照射試験の条件、AO照射試験の条件等、耐宇宙環境性評価の点で議論がなされた。特にAO照射試験条件（フラックス、フルエンス）については耐AO性の観点で重要である。AOフルエンスが多い場合は耐AO性が担保できる一方、照射時間が長くなりコストが大きくなる。小さい場合はその逆であるが、本標準の根幹をなすものであり、議論となった。第一案として、材料認定試験のAOフルエンスとして、ISS軌道約1年に相当する 1.0×10^{21} atoms/cm²を提案した。米国は、AO被曝量等の宇宙環境条件は宇宙機の軌道によって異なるため、

一律条件を課すべきではないとコメントした。WG参加者から、数値要求には許容範囲（幅）を持たせるべきとの指摘があった。コーティング厚の計測方法について、仕様の10%以内との精度要求は実現可能かどうか指摘があり、確認することとした。

2019年以降において、2020年初旬のCommittee draft (CD) 登録を目指し、各種コメントに回答しながら標準文書へ具体的に反映を行った。AOフルエンスについては、十分な耐AO保護性能を持つコーティングであればフルエンスが増加しても保護性能を維持し、ベースフィルムの質量減少は伸展しないため、2018年度提案通りとした。非常に薄いコーティング厚は、一般的な方法では測定できないため、コーティング厚の計測は要求せず、膜厚は工程によって管理する要求とした。また米国の帯電放電の専門家からコメントがあった。特に体積抵抗率の測定手法について議論、調整を行った。測定手法は帯電放電の原理・原則に従って、より精密な手法が望ましいが、多くの材料メーカは専用の測定装置を有していない。また本標準技術の適用は低軌道を前提にしているため、静止軌道等と比較すれば精密な測定は不要であること及び材料の帯電に関する傾向が把握できる簡易的な手法で十分あることについて、専門家へ解析結果を示して議論を行い、合意に至った。

CD投票は2020年4月28日に終了し、Draft ISO (DIS) ステージへ移行した。DIS移行への賛成は9か国（棄権は5か国）であった。2020年春季国際会議は新型コロナの影響で対面での会議開催ができなくなり、オンラインで開催された。WG6では一会議2件程度の案件、2時間程度を基本にオンライン会合をおこなった。2020年は春期会合及び秋期会合に相当するオンラインZOOM会議が合計8回開

催された。その中で本DISドラフト内容について、技術的議論が続いた。例えば目視検査のやり方、定量的判断の基準という点で **witness sample**（後述）の写真を別資料として追加してはどうかとのコメントがあった。本技術におけるコーティング厚みは概して薄く（ナノレベル or $1\ \mu\text{m}$ 程度）且つポリイミドフィルムは一般的には薄い黄色のため、目視での検査でコーティングの健全性を確認することは極めて難しい。このため、PLから別資料で「(参考) 目視検査ガイドライン」の章を追記し、限度見本等（後述）を用意し、あらかじめ決定した判断基準に従って検査員が判断すること等を既存の標準類（例えば EN13018）と共に案として提示した。この際2015年、2016年に国内で取得した摩擦・機械負荷試験後のサンプルの具体例を写真で示し、コーティングコートフィルムの健全性を目視検査で確認することの難しさについて説明し、課題について共通認識を得ることができた。

さて日本語でいうところの「限度見本」はある製品を品質上合格とするか、不合格とするかの限度を示した製品見本を示す。この用語及び目視確認をする行為の国際標準（英語）化が議論となった。結果的（その後のFinal Draft ISO (FDIS) フェーズ、ISOとしての成立時も）に「**witness sample or criteria sample**」という用語で合意されたものの、各国で調査すると「**reference sample**」「**criteria sample**」即ち「良品」と比較する意見、「**defect sample**」「**fail sample**」即ち「悪品」と比較する意見が出された。「**reference sample**」という用語はISO GUIDE 30で定義されている。おそらくこれについては、「**reference sample**」と比較しつつ、「**defect sample**」も参照しながら両方で判断する記述がよいと考えているが、次回の改訂までに各国の意見

や他の標準文書を参考に整理したいと考えている。

またCDV版においては製品品質管理の「変更管理」の項目について、上位のISO標準を参照せよとのコメントがあった。国内WG5（プログラム管理検討分科会）の協力をいただき、ISO 27025:2010を参照するように改訂した。国内WG5のご協力にお礼を申し上げます。

もう一つDISフェーズの議論において、改めて品質確認試験におけるAO、紫外線、放射線の照射フルエンス要求値が議論となった。軌道上宇宙機が遭遇するAOの量については、宇宙環境モデルによって推定しているが、高度、対象時期の宇宙環境の状況（太陽活動、地磁気活動）によってその量に変化する。例えば高度を400kmと固定させても、宇宙環境の状況に応じて $10^{20}\sim 10^{22}\text{atoms/cm}^2/\text{年}$ の範囲で出力される。この記述について、 $1.0\times 10^{21}\text{atoms/cm}^2$ という量を規定しながらも、Note（注記）へ「この試験における定量的なパラメータは、宇宙環境モデル、その計算、実証性能から定義される。これにより、宇宙で使用される材料の最低限のスクリーニング基準を提供する」と、注意書きを行った。また寿命試験については推奨要求とし、AOフルエンス、フラックス及び照射装置の種類を記録する規定とした。紫外線、放射線照射量について、本標準はAO耐性を主眼とするが、他の宇宙環境耐性についてもユーザである宇宙機メーカーから要望があったことを踏まえ推奨要求として設定した背景を説明した。これら数値的根拠、歴史的背景を丁寧に説明し、資料としてWG6メンバー全員と情報共有しながら議論を進めた。

このようにWG6参加各国と合意を形成しつつDIS投票を2020年10月8日に開始し、同年12月31日に終了した。結果FDIS移行への賛

成は9か国（反対は0か国）であった。FDISフェーズ以降はルール上技術要求の大きな変更はできない。ISO中央事務局からの編集的なコメント対応が主ではあるが、技術的な議論はその後も続いた。その一つにベースフィルムをポリイミドに限定している点であった。具体的にはpolyethylene terephthalate (PET) やテフロンなどの他のベースフィルムを追加する提案がなされた。NP前においてはベースフィルムの種類は限定されていなかったこと、2016年以降のNPに関係する議論においてWG6はコーティング材のみか、ベースフィルムも含めて議論したこと等の歴史的背景を説明した。またコーティングの密着性は、コーティング材の種類やベースフィルムによって異なる。この議論の中でWG6は、ベースフィルムは宇宙環境（原子状酸素を除く）に対する耐久性を有し、宇宙機で汎用的に使用されているポリイミドに絞る決定を行った経緯についても説明した。この議論は時間切れになったが、今後のベースフィルム拡張については、ポリイミド以外のフィルムの使用実績、データの有無等の今後の調整が必要であると考えている。日本にはポリイミド以外のフィルムへの耐AOコーティングを施工した製品はなく、基礎データもほとんど存在しない。

2021年7月1日にFDIS投票が開始され、8月26日に賛成10か国（反対は0か国）終了し、9月27日に制定された。2014年のフィージビリストアディから約8年かけての成立であった。結果的に表1に示す構成で7章、4つのAnnex、全26ページで完成した。Annex Bには日本のシルセスキオキサンの他、ITO、SiO_x、Ge、シリコン及び合金メタルの、市場で入手可能なコーティングポリイミドフィルムの各種特性データを示している。

表1 ISO 23129 : 2021の目次

Foreword	まえがき
Introduction	序文
1. Scope	範囲
2. Normative references	引用文献
3. Terms, definitions and abbreviated terms	用語、定義、略語
3.1 Terms and definitions	用語と定義
3.2 Abbreviated terms	省略された略語
4. General requirements and recommendations	一般要求事項及び推奨事項
4.1 General	一般事項
4.2 Visual characteristics	外観の特性
4.3 Coating thickness	塗膜の厚さ
4.4 Thermo-optical properties	熱光学特性
4.5 Thermal vacuum stability	熱真空安定性
4.6 AO resistance	耐AO性
4.7 UV resistance	耐紫外線性
4.8 Radiation resistance	耐放射線性
4.9 Adhesion	密着性
4.10 Volume resistance	体積抵抗
4.11 Surface resistance	表面抵抗
4.12 Secondary electron emission yield	二次電子放出係数
4.13 Photoelectron emission yield	光電子放出係数
4.14 Thermal cycling	熱サイクル
4.15 Repair/Retouch	補修/リタッチ
4.16 Cleaning	洗浄
5. Test methods	試験方法
5.1 General	一般事項
5.2 Visual inspection	目視検査
5.3 Coating thickness	塗膜の厚さ
5.4 Thermo-optical properties	熱光学特性
5.5 Thermal vacuum stability	熱真空安定性
5.6 AO resistance	耐AO性

- 5.6.1 Product qualification test 製品の認定試験
- 5.6.2 Life estimation test 寿命評価試験
- 5.7 UV resistance 耐紫外線性
 - 5.7.1 Product qualification test 製品の認定試験
 - 5.7.2 Life estimation test 寿命評価試験
- 5.8 Radiation resistance 耐放射線性
 - 5.8.1 Product qualification test 製品の認定試験
 - 5.8.2 Life estimation test 寿命評価試験
- 5.9 Adhesion 密着性
- 5.10 Volume resistance 体積抵抗
- 5.11 Surface resistance 表面抵抗
- 5.12 Secondary electron emission yield 二次電子放出係数
- 5.13 Photoelectron emission yield 光電子放出係数
- 5.14 Thermal cycling (influence of temperatures) 熱サイクル (温度の影響)
- 5.15 Repair/Retouch 補修/リタッチ
- 5.16 Cleaning 洗浄
- 6. Requirements and recommendations for application 要求事項及び適用に関する推奨事項
 - 6.1 Consideration for usage 使用上の注意事項
 - 6.2 Identification 識別
 - 6.3 Protectors 保護具
 - 6.4 Packing 梱包
- 7. Production program of quality assurance 品質保証の製造プログラム
 - 7.1 General 一般事項
 - 7.2 Changes and revisions 変更及び修正
 - 7.3 Record of changes 変更記録

Annex A (informative) Types of coatings
(参考) 各種コーティング

Annex B (informative) General properties of atomic oxygen protective coatings
(参考) 耐AOコーティングの一般特性

Annex C (informative) Coatings selection guideline
(参考) コーティング選定ガイドライン

Annex D (informative) Visual characteristics guideline
(参考) 目視検査ガイドライン

Bibliography 参考文献

4. おわりに、今後の展望

本稿において、ISO23129ポリイミドフィルム上の耐原子状酸素性コーティングに関する成立経緯等について述べた。今後、低軌道における各種宇宙利用が一層進むと考えられるため、低軌道環境における課題を解決する一手段としての本技術を国際標準として成立させることができたのは意義があると考えられる。本技術の応用に関連し、ITOなどの酸化物系耐AOコーティングはスパッタリング等の製膜工程が必要なものに対し、シルセスキオキサンコーティング、東亜合成(株)が製造・販売するシルセスキオキサン誘導体「SQシリーズ」はこれまでにない、“塗れる保護コーティング”として、小ロットの宇宙用品への適用や、宇宙機組み立て途中コンポーネントの補修などへの応用が期待されている[13]。塗れる保護コーティングとしての特徴を活かし、ポリイミド以外の材料に対しても適用を検討しており、実際に宇宙ステーション補給機「こうのとりのり」3～6号機の機体識別マーク(日の丸とHTV及びJAPANのロゴ)の保護材料として宇宙空間で実証されている(図6 [14])。

次回改訂に関連し、当初はシルセスキオキサンコートポリイミドに関する国際宇宙ステーションにおける宇宙実証データについて

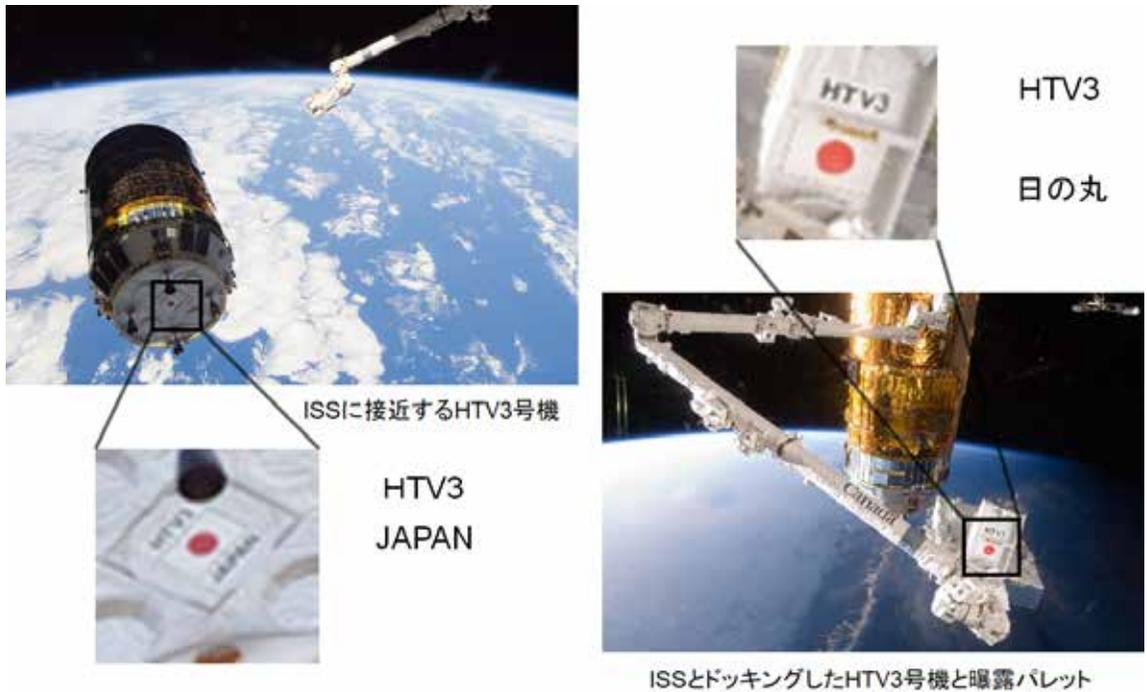


図6 軌道上の宇宙ステーション補給機「こうのとり」3号機
及び曝露部パレットの機体識別マーク [14]

Annexへまとめる予定であったが、全体的なバランスから掲載を見送った。今後シルセスキオキサン以外のコーティング材料に関する宇宙実証データについても調査し、WG6国際会議の場等で紹介しながら改訂版での反映を計画したい。宇宙機メカは材料についての使用実績や実環境データを重視する傾向があるため、これらデータを開示するのは重要と考えている。また3項で述べた通り本標準に関する拡張の議論や品質保証に関する整理についての反映が今後必要と考えている。さらに本標準制定から得られた知見として、宇宙機の帯電解析に必要な熱制御材料等最外層材料の帯電放電特性の要望が強いことが分かった。中でもキーとなる二次電子放出計数が十分取得されていない印象である。このため相対的に寄与の小さい体積抵抗率が過剰に着目され、宇宙機における使用材料の幅を狭

めているとも言える。これら宇宙用材料の帯電放電特性（例えば二次電子放出係数）の取得方法についての標準化が望まれる。

一方でJAXAは世界に先駆け、「超低高度」と呼ばれる従来の低軌道よりももっと低い軌道（高度300km以下）の利用を超低高度衛星技術試験機「つばめ」（Super Low Altitude Test Satellite (SLATS))で実証した [15,16]。SLATSのミッションにおいても本技術に関連した宇宙実験が行われた [17]。超低高度軌道は世界的には「Very Low Earth Orbit (VLEO)」とも呼ばれ、昨今その利用に注目が集まっている。本軌道利用においては、耐原子状酸素技術、軌道制御技術（大気モデル、空力加熱制御、電気推進等）が鍵となりえる。SLATS等の経験を生かした国際標準の可能性も将来的に検討したいと考えている。

5. 参考文献

- [1] 木本雄吾、宮崎英治、石澤淳一郎、島村宏之、“低軌道における宇宙用材料への原子状酸素の影響とその地上評価”、J. Vac. soc. Jpn., 52、475 (2009)
<https://doi.org/10.3131/jvsj2.52.475>
- [2] B. A. Banks, M. Lenczewski and R. Demko, “Durability Issues for the Protection of Materials From Atomic Oxygen Attack in Low Earth Orbit” , IAC-02-1.5.02 (2002) .
- [3] Miria M. Finckenor, Kim K. de Groh, “ A Researcher’s Guide to: Space Environmental Effects” , Oct 29, 2020
- [4] “Proceeding of International Symposium on SM/MPAC&SEED Experiment” , Japan, 2008, JAXA-SP-08-015E (2009) .
<http://id.nii.ac.jp/1696/00005210/>
- [5] 木本雄吾, “SEDA-AP搭載微小粒子捕獲実験装置及び材料曝露実験装置(MPAC&SEED)による実験概要” , 宇宙航空研究開発機構特別資料: 第7回宇宙環境シンポジウム講演論文集(JAXA-SP-10-013) , pp25-33 (2011)
- [6] 木本雄吾, “耐原子状酸素防護技術の動向と将来” , 第64回宇宙科学技術連合講演会講演集 (2020)
- [7] 宇宙システム関連ISO国際規格の開発, 航空と宇宙 第811号 (2021年7月)
- [8] 経済産業省委託、平成26年度政府戦略分野に係る国際標準化活動、宇宙材料開発分野の耐原子状酸素コーティング技術に関する国際標準化フェーズビリストアディ成果報告書 (2015)
- [9] 経済産業省委託、平成27年度政府戦略分野に係る国際標準化活動、宇宙材料開発分野の耐原子状酸素コーティング技術に関する国際標準化成果報告書(2016)
- [10] 淵田安浩、人見尚、石川洋二、荻田基志、井上翼、馬場尚子、“カーボンナノチューブの耐宇宙環境性試験地上対照試験と機械的性能の評価”、日本航空宇宙学会誌 67 巻 1 号 p. 31-34 (2019)
https://doi.org/10.14822/kjsass.67.8_286
- [11] 経済産業省委託、平成28年度政府戦略分野に係る国際標準化活動、宇宙材料開発分野の耐原子状酸素コーティング技術に関する国際標準化成果報告書 (2017)
- [12] 経済産業省委託、平成29年度政府戦略分野に係る国際標準化活動、【戦16】宇宙材料開発分野の耐原子状酸素コーティング技術に関する国際標準化成果報告書 (2018)
- [13] 古田 尚正, 藤田 武士, 北村 昭憲, “シルセスキオキサン誘導体の耐熱用途への展開と宇宙機用保護コーティング剤の開発” , 色材協会誌90 巻 (2017)
<https://doi.org/10.4011/shikizai.90.207>
- [14] 石澤淳一郎, 木本雄吾, 田村高志, 古田尚正, 北村昭憲, 鈴木浩, “耐原子状酸素コーティングの開発状況と材料保護効果” 第56回宇宙科学技術連合講演会講演集 (2012)
- [15] 佐々木雅範, “超低高度衛星技術試験機「つばめ」(SLATS)によるギネス世界記録®の達成”、日本航空宇宙学会誌、第68巻、第4号、pp.91-93 (2020)
https://doi.org/10.14822/kjsass.68.4_91
- [16] 三浦健史, 佐々木雅範, 川崎春夫, 高山慎一郎, 此上一也, 今村俊介, “超低高度衛星技術試験機「つばめ」(SLATS)の開発と運用結果” 日本航空宇宙学会誌、68 巻 9 号 p. 265-271 (2020)
https://doi.org/10.14822/kjsass.68.9_265

- [17] 木本雄吾、宮崎英治、土屋佑太、後藤亜希、行松和輝、“超低高度衛星技術試験機「つばめ」(SLATS)搭載原子状酸素モニタ (AMO) の開発と観測成果”、日本航空宇宙学会誌69 巻 6 号 p. 205-211 (2021)
https://doi.org/10.14822/kjsass.69.6_205