

衛星搭載太陽電池パネルの帯電放電試験方法の ISO 国際標準規格(ISO-11221)の成立について

趙孟佑（九州工業大学）、今泉充（宇宙航空研究開発機構）

## 1. はじめに

90年代末以降、商用衛星の大型化に伴い高電圧化した太陽電池パネルで放電事故が頻発し始め、衛星機能の全損という最悪の事態に至る衛星も後を断たなかった。太陽電池パネルの帯電・放電への耐性を評価するための試験を打ち上げ前に徹底的に実施することが求められるようになったが、衛星機器の国際調達が進む状況の中で、試験方法の国際標準化が望まれていた。特に2000年代前半には太陽電池パネルの不具合が保険金支払い金額事由の半分を占める状況になっており、保険会社等からの要求が強く寄せられるようになっていた。

衛星帯電の専門家の間では、各国での試験方法に違いがあることが2001年頃には認識されていたが、国際標準化に向けた動きは遅々としたものであった。経済産業省の支援の元で、2005年から日本が主導権をもって国際標準化を押し進めることで標準化の流れが加速され、2010年5月の最終投票によって ISO-11221” Space Systems - Space Solar Panels - Spacecraft Charging Induced Electrostatic Discharge Test Methods”が成立することとなった。本稿では、今回の ISO 規格の成立に至る経緯と国際標準化の意義について簡単に報告する。

## 2. 航空宇宙分野における ISO 標準

ISO 一般については様々な書籍が出版されており、日々身近に接しておられる読者も多数おられるので、本稿では割愛する。航空宇宙分野での ISO については、過去に文献[1]や[2]で紹介されている。また、航空宇宙関連国際規格の国内取りまとめを行なう航空宇宙工業会を出発点として、そこからより深い情報を得ることが可能である[3]。

ISO 規格における航空宇宙分野は TC(Technical Committee)20 が担当し、その中が更にいくつかの SC(Sub-Committee)に分けられるが、宇宙分野は SC13(Space

data and information transfer systems)と SC14(Space systems and operations)が相当する。SC14 は更に設計・試験・材料・環境等々で6つの WG(Working Group)に分けられ、設計を審議する WG1 は日本が議長国を務めている。今回の規格は TC20/SC14/WG1 で審議された。2010年5月の時点で投票権をもつのは日本、アメリカ、カナダ、ブラジル、中国、イスラエル、ロシア、ウクライナ、イタリア、イギリス、フランス、ドイツ、インド、韓国の14カ国である。

ISO 規格として成立するためにはいくつかのステージを経る必要があるが、まず ISO に登録されるための New Work Item Proposal (NWIP)で標準化に相応しいプロジェクトであるかどうかについて投票がある。通常、NWIP は問題なく承認され、承認後は正式に ISO 事務局にプロジェクトが登録される。(実際の事務作業は SC14 の事務局であるアメリカ航空宇宙学会(AIAA)が実施する。)登録に際しては、プロジェクトリーダーが決められ、今回の規格では趙と今泉の2名があたった。規格案は NWI から Working Draft(WD) 、 Committee Draft(CD)と名前を変えながら進化していくが、CD の終了時点で投票国の2/3以上の賛成がないとその後のステージに進めない。CD を通過すると Draft International Standard (DIS)となるが、最後に参加国の2/3以上の賛成を経て International Standard (IS)として成立することになる。このように主として CD から DIS, DIS から IS への移行という2回の関門が存在する。

## 3. 太陽電池パネルの静電気放電

宇宙空間は、電気を帯びたプラズマで満たされている。衛星の表面は、プラズマからの電子やイオンに常に晒され、正や負の電荷をプラズマとの間でやりとりする。衛星の表面は様々な材料で覆われているが、太陽電池パネルには放射線防護用のガラス

が貼られており、電気絶縁体であるガラスの上にたまった電荷はなかなか抜けない。衛星が磁気圏嵐やオーロラ等の高エネルギーの電子に出会った時は、衛星のあらゆる所で大きな電圧が発生し、数 100V 程度の電圧が発生した途端に、静電気放電が発生する。放電は、衛星表面に露出した金属と絶縁体の境目で発生するが、太陽電池パネルにはそのような箇所が無数にあり、最も放電が発生しやすい部位である。静電気放電のエネルギーにより、大型の衛星では非常に大きな放電電流が流れ、太陽電池回路の短絡等につながって、最悪の場合は衛星一つが丸ごと失われる大事故につながる。これらの事象については、文献[4]や[5]により詳細な解説がある。

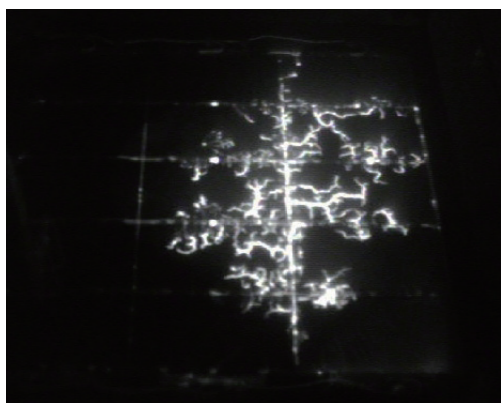


図1 実験室で観測される太陽電池パネル上の静電気放電の様子

#### 4. 標準化に向けた準備作業

太陽電池パネルの帯電・放電による不具合が広く知られるようになったのは、1997年にSS/L社の静止軌道衛星Tempo2が衛星電力の15%を一瞬で喪失した事故が発端である。当時、海外の大型静止衛星を中心に、バス電圧が従来の50Vから100Vへと移行し始めており、パネル表面が帯電したことによって発生した小さな静電気放電（一次放電）が引き金となってアーク放電（二次アーク）が発生し、太陽電池アレイ回路の短絡に至ったという事故報告（文献[6],[7]）は大きな衝撃となった。その後、設計の見直しと試験が各国で早急に実施され、日本でもMUSES-C(はやぶさ)とETS8(きく8

号)の帯電・放電試験が九州工大で実施された。2001年4月にオランダのNoordwijkで開催された7th SCTC(Spacecraft Charging Technology Conference)において、日米欧からの帯電放電試験についての研究発表が初めて出そろったが、3地域毎に試験方法が異なることが目の当りになった。相違点は主として(1)二次アークの種火となる一次放電に外部試験回路から与えるエネルギー量、(2)供試体表面を帯電させるのに低エネルギー・高密度プラズマを使うべきか、高エネルギー電子ビームを使用すべきか、という2点であったが、会場外でも論争が続いていた。

2002年夏の3ヶ月間、趙が欧州の帯電・放電試験の拠点であるONERA(フランス国立宇宙研究所)に滞在し、衛星帯電に関する共同研究と欧州内の研究動向の調査を行なった。その過程で域外に衛星を輸出することの多い欧州企業では試験方法を国際標準化したいという強い要望があることを知ることができた。九工大とONERAの間では、標準化に向けた基礎研究を行なっていくことで合意し、まずは相互に研究者を派遣し、共同実験を行なうことになった。2003年10月にアメリカのHuntsvilleで開催された8th SCTCでは、趙が議長を務める形で円卓会議を行なった。その場において、試験方法の標準化をするのであれば、ISOを通じて行なうべきであるとの認識でほぼ一致し、九工大にて標準化活動のとりまとめを行なうメールサーバーを設置することとなった。また、この会議期間中の10月23日には、ADEOS2(みどり2号)が太陽電池パドルブーム部での放電により全損する事故が発生した。幸か不幸か、このADEOS2の事故は日本の衛星帯電研究が発展する大きな契機となった。

2004年から2005年にかけて、九工大・シャープ・ONERA・CNES・アルカテルの日欧5者によって、標準化に向けた共同実験を実施することとなった。一次放電が発生すると、放電プラズマが太陽電池パネル上を沿面放電となって進展し、太陽電池カバーガラスが帯電によって蓄えた静電エネルギーを吸収しながら成長していく。地上

試験において、一次放電にどれくらいのエネルギーを供給すべきかについて答えを見いだすために、シャープが提供した大型太陽電池パネル2枚を使い、パネル上の沿面放電の進展を調べることを目的としていた。



図2 9th SCTCの様子

2005年4月に日本の筑波で開催された9th SCTCは日本が国際標準化で主導権を握る上で決定的な役割を果たした。第8回に続いて9th SCTCでも標準化のための円卓会議を行なったが、SC14/TC20/WG1の議長である三菱電機の永島氏の講演で国際標準化の意義を参加者全員に理解してもらうと共に、決議案を採択して会議を終えた。決議案は、10th SCTC迄にISOの原案を作成するために会議に集まった衛星帯電の専門家が最大限の努力と協力を行い、3年以内のISO標準化を目指すというものであった。

## 5. 標準化作業

2005年夏にNEDOから公募された国際標準創成分野での国際共同研究(NEDO Grant)に対して、九工大・JAXA・シャープ・NEC東芝スペース・三菱電機・CNES・ONERA・Alcatel・Astrium(後に参加)・OAI・NASAの11者で応募した「衛星搭載

太陽電池アレイの帯電・放電試験法のISO標準化プロジェクト」(代表:趙)が採択された。採択は先に述べた準備活動が評価されたためであるが、NEDOからの3年間に亘る資金援助を受けて、標準化作業は大きく進展することとなった。

NEDO Grantにおいては、国際ラウンドロビン試験、相互訪問とワークショップの開催、ISO原案の作成の3項目を実施した。ラウンドロビン試験とは、同じ供試体を使って各国で同じ試験を行なうことを言い、今回のような国際標準化作業ではよく実施される。資金的にはラウンドロビン試験に6割を費やし、残りを旅費と会議費に使用した。

NEDO Grantでは以下の項目について研究が実施された。

- 1) 一次放電の大きさ
  - 2) 繰り返しの一次放電による太陽電池電気性能出力の低下
  - 3) 試験環境の影響
  - 4) 太陽電池アレイ回路を模擬するための外部試験回路
  - 5) 軌道上での一次放電の回数の見積もり
- 研究結果はワークショップや学会等でNEDO Grantのメンバーのみならず、コミュニティ全体で共有することとし、データは可能な限り公開していくことを原則とした。



図3 第一回WS時の九工大でのデモ実験の集合写真

2006年11月から2009年10月までの4年間に5回のワークショップ(WS)を実施し、少ない時で22名、多い時で42名が参加し

た。参加者は実際に試験実施機関・衛星メーカー・宇宙機関等からの衛星帯電の専門家で構成された。北九州では第1回と第5回のWSを実施したが、その際に参加者全員を九工大の試験設備に招待し、2または3日間のデモ実験を行なった。実際に目の前で試験をしてデータを取得し、それらを参加者で吟味することで、研究者コミュニティとしての一体感を作ると共に、ラウンドロビン試験結果の報告と合わせ、WSでの規格原案に関する議論を少しでも円滑にすることに多に役立った。九工大のデモ試験以外にも、NEDO グラントの研究者チーム約10名が ONERA と NASA グレン研究センターを訪問し、当地でのラウンドロビン試験に立ち合った。WSでは、長い時には丸々2日間かけて規格原案を審議していったが、各地域の試験思想の違いや、過去に実施された認定試験との矛盾を回避したいとの衛星メーカーの思惑等もあって、時に平行線を辿ることもあった。そのような時にあっても、ISO 標準化を実施するという大目標に立って、妥協点を見いだしていった。第4回のWS(東京)では、会場隣の温泉に参加者全員で休憩に行き頭を冷やすことも行なった。

ISO 事務局との調整は、航空宇宙工業会の SC14 国際規格検討委員会を通じて実施された。2006年11月の第1回WSの議論に基づいてWD第2版が作成され、それを元に2007年5月にNWIP投票が行なわれ、10カ国の賛成によりISOに正式に登録された。その後WDは第5版まで改訂され、2007年10月のSC14/WG1会議にてCDへの昇格が承認された。第4回WS(2008年1月)を経てCD第2版が作成され、2008年5月のSC14総会にてCDの投票実施が決定された。この時点までは非常に順調に推移していると思われたが、6ヶ月のCD投票期間中に、フランスが反対しているらしく欧州の他の国も同調しかねないとの情報が寄せられた。ISOは一国一票であるが、欧州のフランス・イタリア・ドイツ・イギリスの4カ国が全て反対すれば規格を否決できる(当時の投票国数は11)ため、その影響は極めて大きい。欧州内の反対の理由は

試験思想の違いに起因していたが、必死の説得作業の結果、賛成7、反対1(フランス)、棄権1(イタリア)、無投票2でCDからDISへの昇格が承認された。本来であればDIS移行後に速やかにISへの投票を実施する計画であったが、CDの投票結果を受けて、再度調整する必要が生じた。個別に海外の主要人物と面談して根回しを行なった上で第5回WSを2009年10月に開催し、直後にDIS第2版を最終投票に付与した。第5回WSではCD投票で賛成したドイツがいきなり反対を表明したりしたが、SC14/WG1での働きかけもあって、最終投票の結果は賛成10、棄権3(ドイツ、カナダ、インド)、無投票1(イタリア)であった。メンバー国の3分の2以上の賛成が得られたので、規定によりISへの昇格が承認された。結局NWI登録(2007年5月)からIS投票終了(2010年5月)まで3年、規格の最終成立まで3年半かかったことになる。最近に登録から3年で規格を成立させることをISO事務局が要求しているものの、未だ多くの規格が3年以上の時間を費やしており、ISO全体でも非常に早いペースで規格成立がなったものと自負している。

## 6. 規格の中身

ISO-11221は表1に目次を示すようにページ総数42で9章の本文と10編の付録から構成されている。主立ったところを抜粋して紹介する。

Scopeであるが、”This standard provides qualification and characterization test methods to simulate plasma interactions and electrostatic discharges on solar array panels in space. This standard covers solar array panels made of crystalline silicon, gallium arsenide (GaAs) or multi-junction solar cells. This standard addresses only surface discharges on solar panels.”として、この規格が従来使用されている結晶シリコン、GaAs、化合物系多重接合太陽電池による太陽電池パネルを対象とし、表面帯電のみを取り扱うことを定義している。

Terms and Definitionsは、WSにもて放

電形態の呼称について長時間の議論を費やしたが、図4のように Primary discharge (一次放電), Non-sustained discharge (NSA、非持続放電), Temporary sustained discharge (TSA、過渡的持続放電), Permanent sustained arc (PSA、恒久的持続放電)と呼び、後者の3つを一次放電プラズマに太陽電池アレイの光発生電流が流れ込む二次アークとしている。

表 1: ISO-11221 目次

- Foreword
- Introduction
  - 1 Scope
  - 2 Terms and Definitions
  - 3 Symbols (and abbreviated terms)
  - 4 Tailoring
  - 5 Test Items
  - 6 Preliminary Tests for ESD Inception
- Statistics
  - 6.1 Purpose
  - 6.2 Test facility
  - 6.3 Test coupon
  - 6.4 External circuit
  - 6.5 Test procedures
  - 6.6 Estimation of number of ESD events in orbit
- 7 Qualification Test for Secondary Arc
  - 7.1 Purpose
  - 7.2 Triggering method and test facility
  - 7.3 External circuit
  - 7.4 CIC gap test coupon and procedures
  - 7.5 Panel test coupon and procedures
  - 7.6 Success criteria
- 8 Characterization Tests for Robustness to ESD and Plasma Interaction
  - 8.1 Power degradation
  - 8.2 Secondary arc
  - 8.3 Power leakage to plasma
- 9 Test Report Guidelines
- Annex A (informative) Plasma Interaction and Electrostatic Discharge Effects on Solar Array
- Annex B (informative) Secondary Arc Qualification Processes
- Annex C (normative) Chamber Size for a Test Using LEO-like Plasma

- Annex D (informative) ESD Events Analysis
- Annex E (informative) Spacecraft Charging Analysis
- Annex F (informative) Derivation of Surface Flashover Current
- Annex G (normative) External Circuit of Secondary Arc Phenomena
- Annex H (informative) Solar Cell I-V Characteristics Measurement
- Annex I (informative) Solar Array Back Surface Test
- Annex J (informative) Secondary Arc Statistics
- Bibliography

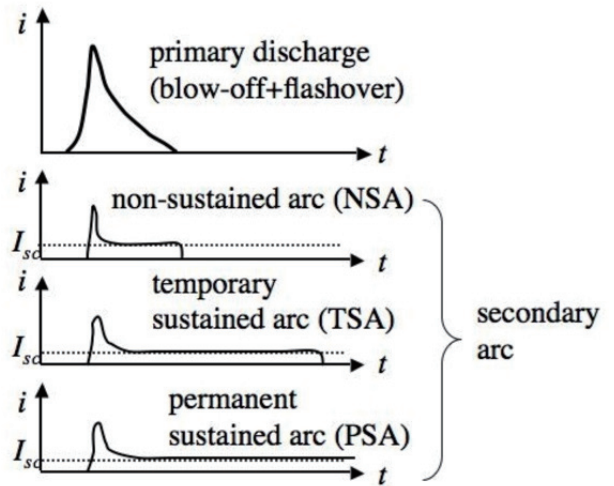


図 4 放電の呼称

Test Item は、最も議論が噴出したところで、世界各地の試験思想が対立したところであった。具体的には、二次アークが発生するか否かを検証するための試験において、欧州が提唱する供試体中の二次アークの放電が発生しやすい箇所に一次放電が集中しておきるように供試体自身に手を加える最悪状態の試験 (Gap 試験)、米国と日本が提唱する太陽電池パネル表面のあらゆる要素をできる限り含んだ供試体の表面全体を一樣に帯電させて一次放電の発生箇所については何のコントロールも施さない”Test as you fly”の試験 (クーポンパネル試験) のどちらを実施すべきかで対立した。結論としては、まず Gap 試験を実施し、必要であればクーポンパネル試験を実施する

ということで合意を得た。

Test Facility については、“If it can be confirmed that the probability of a transition from a primary discharge to a secondary arc does not depend upon the method of primary discharge inception, any method can be used to cause primary discharges, irrespective of the anticipated charging situation in orbit.”とし、2001年の7thSCTC 以来の懸案であった、一次放電を起こさせるための帯電方法は二次放電発生の確率が同じである限り、どの方法を用いてもよいとした。但し、

“The test shall take place under vacuum in a test chamber with a pressure

that guarantees the physical state of a collisionless plasma if a low energy plasma is used, or lower than  $3 \times 10^{-3} \text{Pa}$  if other triggering methods such as an energetic electron beam, UV ray, laser pulse, etc., are used. “として、低軌道プラズマに近い低エネルギー・高密度プラズマを使う際には無衝突プラズマ状態を保証し、高エネルギー電子ビーム等を使用する際には  $3 \times 10^{-3} \text{Pa}$  以下の高真空を保つこととした。

External circuit については、図5のような概略図と日米欧での試験回路を例として掲載し、試験回路設置時に考慮すべき注意点を付録のGにて詳細に説明している。

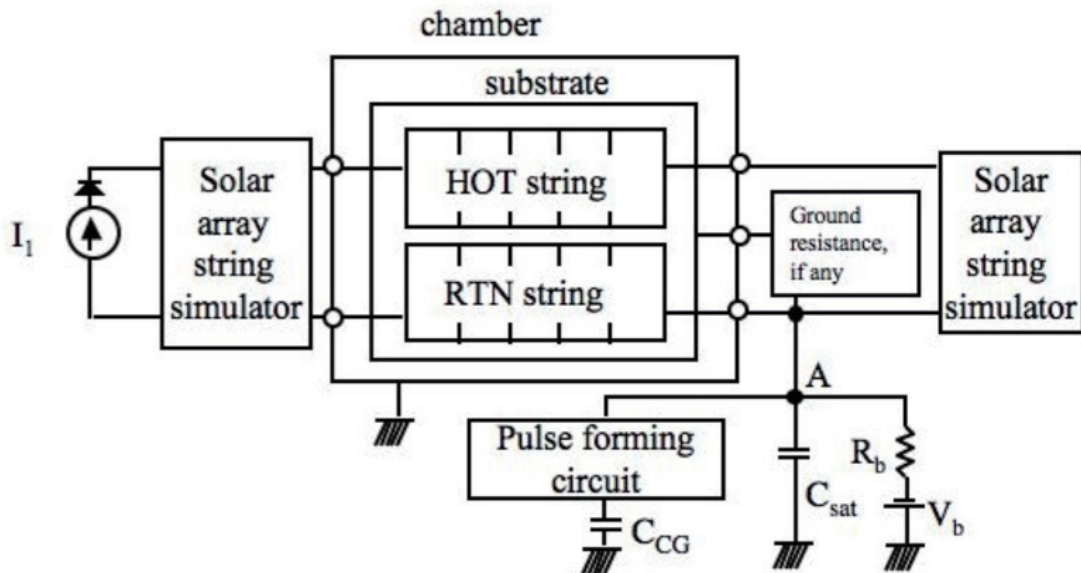


図5 二次アーク試験における外部回路の構成

また、図5のCCG（太陽電池パネルのカバーガラスの静電容量を模擬したコンデンサ）から供給されるエネルギーについては、パルス成形波形をコンデンサの前に設置し、軌道上で予想される Flashover 電流を供給することとされた。Flashover 放電電流波形は軌道上で計測されたことがなく、現状では地上実験結果を元に決めるしかない。”The current waveform supplied by the external circuit shall be

representative of the surface flashover current in orbit. The present state of knowledge about the propagation distance is two meter confirmed by a laboratory test using a 4mx1m coupon panel. The present best estimate of the propagation speed of surface flashover is 10km/s for a GEO solar array under inverted potential gradient. “という記述にて沿面放電プラズマの進展距離と速度を与え、図6に示すような仮定で電流波形を

計算するようになっている。この 2m という数字は JAXA と九工大の共同実験の結果 (文献[8]) を元になっている。この伝搬範囲

の面積が 2001 年以來の懸案事項である外部コンデンサ CCG の容量を決めることになる。

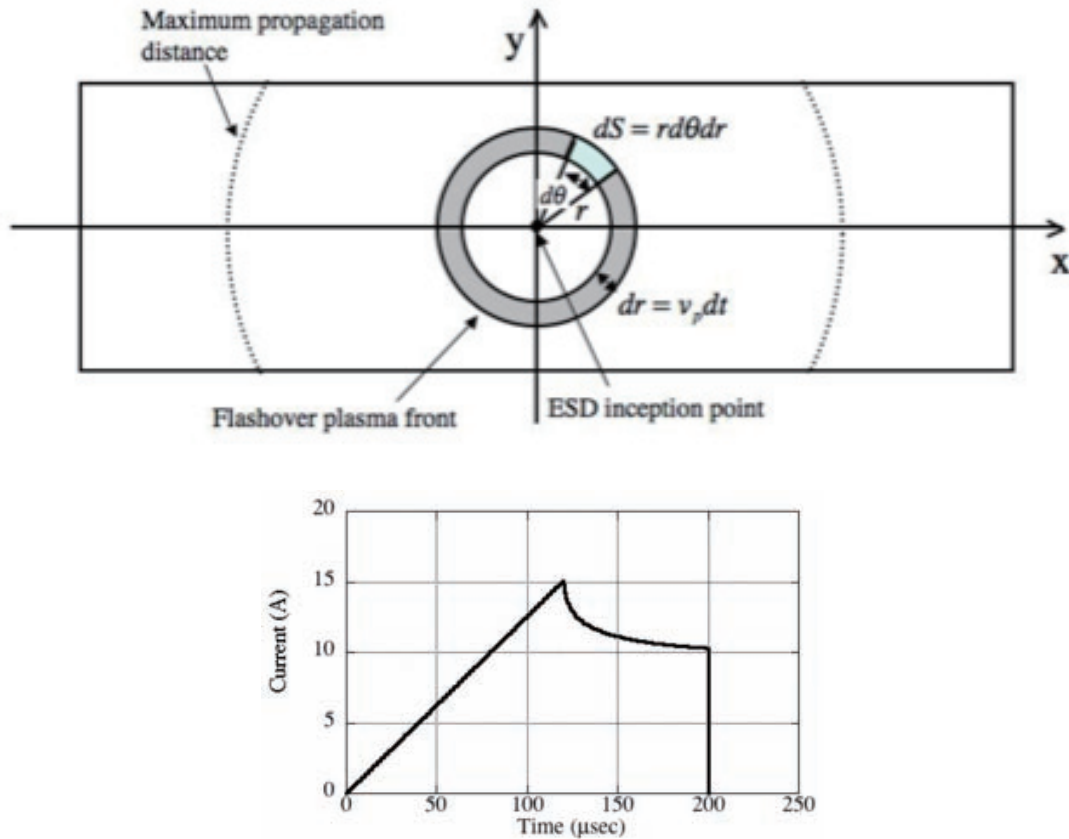


図6 Flashover 電流波形の計算モデル (上) と電流波形の一例 (下)

Success Criteria は” The test shall demonstrate that no damaging secondary arc occurs due to ESD”として、太陽電池パネルの帯電・放電に対する認定試験の合格・不合格の基準を明らかにしている。”damaging secondary arc”としたのは、二次アーク放電の内、継続時間がマイクロ秒オーダーの短いものは回路短絡や電力損失に結びつかないため、ある程度の二次アーク放電は許容するとしたものである。

### 7. 今後の課題

ISO の規定では、規格は制定後5年周期で定期的に改訂していくことを求めている。今回の第一版の制定作業に向けて WS を積み重ねる中で、第二版改訂時までの多くの

課題が明らかにされた。その中で以下についての基礎研究が必要であるとされている。

- ・ 軌道上環境に曝露されて劣化した後の太陽電池パネルの放電をどう考えるか
  - ・ 繰り返し一次放電による太陽電池の電気性能出力劣化に対するより深い理解と認定試験項目化
  - ・ フラッシュオーバー電流が 2m 以上進展するのか否か
  - ・ フラッシュオーバー電流を模擬するための最適な試験回路とはいかなるものか
  - ・ 帯電と真空以外の環境要因を合わせた複合環境試験は必要か?
  - ・ 一次放電の抑制手法は?
  - ・ 新型太陽電池の劣化
- また、太陽電池の電気性能出力の低下に

については、近々に2件の軌道上実験が計画されている。一つはISSの米国モジュールでの曝露試験であるMISSE-8でのPASCAL (Primary Arcing effects on Solar Cells at LEO)実験(2011年2月打ち上げ予定)と2011年度中打ち上げ予定の超小型衛星HORYU-2である。更には、静止軌道衛星を使った放電計測実験が提唱されているが、こちらについては実験プラットフォームを確保することが難しく難航している。いずれにせよ、2012年5月に日本で開催予定の12thSCTCにて第6回WSを併催し、改訂の方向性を再度議論していく予定である。

#### 8. 成功の秘訣と標準化がもたらしたもの

今回、途中でいくつかの障害には遭遇したものの、プロジェクトのスタートから実質5年、NWIP登録から3年で規格成立まで到達することができた。日本が主導する形で成功裏に規格制定を進めることができたが、成功の理由の第一として、NEDOからの資金援助をあげたい。NEDOからの資金援助により、専門家によるWSを5回開催することができ、外国から旅費を出してでも人を呼ぶことができた。これによって、特に欧米以外の中国やインド、韓国といった国にも参加を呼びかけることができ、欧米以外の味方を作ることができたとも言える。第二にプロジェクトリーダーの日本側に他の専門家を納得させるだけの試験実績や論拠となる豊富な基礎データがあり、それらを積極的に開示していったことが、特にWSでの白熱した議論を収束させることに役立った。勿論NEDOの資金援助によりラウンドロビン試験等の多様な研究が可能になった事も大きい。みどり2号の事故以来の日本の衛星帯電への意識向上が研究レベルを支えた。第三に、ISOの当該WGの議長国が日本であったことが、年2回のISO会議での議論を円滑化させる上で非常に役立った。航空宇宙工業会との連携がうまく行ったことも大きい。第四に、たとえ日本がプロジェクトリーダーを握ったからと言って、100%自国の思う通りの規格を作れるわけではなく、規格を成立させることを優先

して妥協すべきところは妥協するという姿勢を貫いたことも大きいといえる。今回のプロジェクトでは欧州と米国の意見が全くの平行線を辿ることが多く、日本がうまく調整に入ることができたことも大きい。第五に、よりよいものを作ろうとする気持ちを専門家が共有したことが大きい。九工大の2回に亘るデモ実験や、ONERAやNASAグレンでの合宿試験など、「同じ釜の飯を喰う」事で、仲間意識を醸成し、コミュニティの発展のために協力しあおうとする気持ちを専門家もつことができた。それによって、多少の違いはあっても、規格を作るという大目標で一致できたと思われる。

今回のISO-11221は日本の試験方法を出発点として起草され、制定作業を終始日本が主導したMade-in-Japanの国際規格である。世界の英知を集めてなされた標準化の過程で多くの新たな知見を得ることができ、人工衛星の信頼性向上に大きく貢献できたと自負している。自国の試験基準に基づいて試験規格を作ること国内の衛星用太陽電池パネルメーカーの輸出促進にも役立つことは自明のことであるが、CDを作成しているところから、国際標準に準拠した試験を希望する外国からの試験依頼がきはじめ、現在も海外衛星メーカーの帯電・放電試験を日本で実施している。これは試験自体が一種の技術輸出であることを物語っており、国際規格を主導することが自国の産業育成に役立つことを規模は小さいながらもまさしく実証している。更に、海外からの試験依頼を受託したり、技術相談に応じることで、各種ノウハウや技術情報を日本国内に集積していくことが可能となり、産業育成に重層的な貢献をすることができる。最後に、国際標準規格作成を主導することが、日本が世界における名誉ある地位を得ることに少しでも貢献するであろうことを願っている。

#### 謝辞

今回の規格成立に対して、国内外の数えきれない方々から多くの叱咤激励・ご協力をいただきました。心からお礼を申し上げます。



**参考文献**

1. 五家 建夫 , 北澤 幸人 , 鈴木 寛 , 戸田 勸, “宇宙環境設計基準の ISO 国際規格化の現状と課題”, 日本航空宇宙学会誌, 49(564), 1-5, 2001.
2. 高崎 信之 , 石崎 政幸 , 播磨 克彦, “ISO/TC20"国際標準化機構/航空宇宙部門"の紹介”, 日本航空宇宙学会誌, 45(525), 553-555, 1997-10
3. 社団法人 日本航空宇宙工業会 Web サイト <http://www.sjac.or.jp/>
4. 趙孟佑、藤井治久, “宇宙環境での帯電・放電現象についての研究動向と将来課題：宇宙環境と宇宙機の帯電電位”、航空宇宙学会誌、Vol.51,No.591, pp.109-117, 2003.
5. 趙孟佑、藤井治久, “宇宙環境での帯電・放電現象についての研究動向と将来課題：高電圧太陽電池アレイの放電現象と将来課題”、航空宇宙学会誌、Vol.51,No.592, pp.139-145, 2003.
6. Katz, I., Davis, V. A. and Snyder, D. B.: Mechanism for Spacecraft Charging Initiated Destruction of Solar Arrays in GEO, AIAA Paper 98-1002, 36th Aerospace Sci. Meeting, 1998.
7. Hoerber, C.F., Robertson, E.A., Katz, I., Davis, V.A., and Snyder, D.B., “Solar array augmented electrostatic discharge in GEO,” AIAA Paper 98-1401, International Communications Satellite Systems Conference and Exhibit, 17th, Yokohama, Japan, Feb. 23-27, 1998.
8. Okumura, T., Suzuki, T. Nitta, K., M. Takahashi, K. Toyoda, “Propagation Area and Speed of Flashover Discharge on Large Solar Array Panels in a Simulated Space Plasma Environment”, 11th Spacecraft Charging Technology Conference, Albuquerque, USA, September, 2010.