

衛星搭載機器の輸出事業 —グローバル市場拡大に向け更なる躍進を目指して—

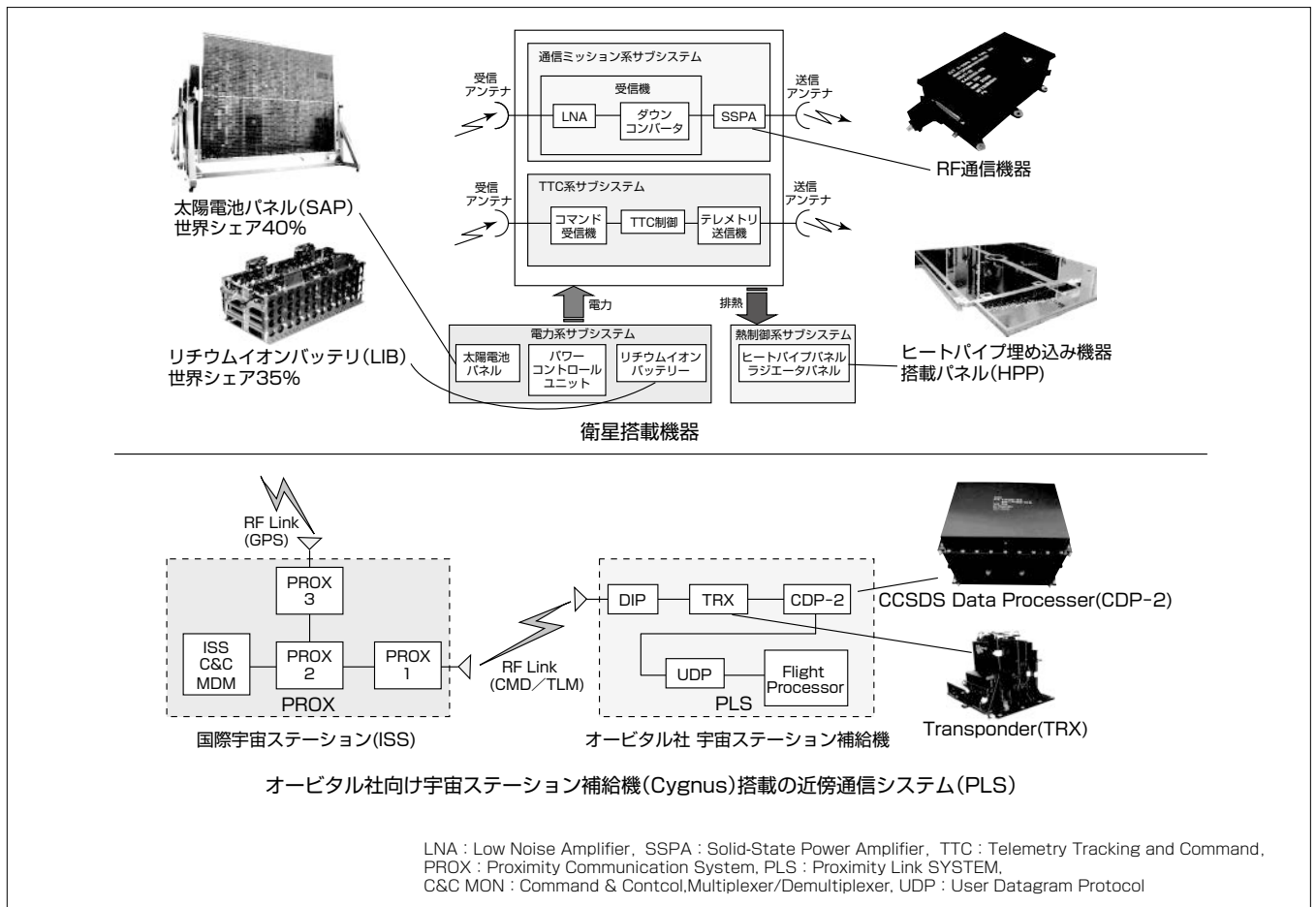
田中宏治* 清川 丈*
佐古 理* 望月恭介*
平野拓也*

Space Satellite Products for Export Business—Aiming at Performance Leap toward Further Expansion of Global Market—
Koji Tanaka, Tadashi Sako, Takuya Hirano, Takeshi Kiyokawa, Kyosuke Mochizuki

要 旨

三菱電機の輸出用衛星搭載機器事業は世界の衛星メーカー向けに着実に市場を拡大してきている。輸出用衛星搭載機器の主要製品群として、RF (Radio Frequency) 通信機器、太陽電池パネル (SAP)、ヒートパイプ埋め込み機器搭載パネル (HPP)、リチウムイオンバッテリー (LIB) などが挙げられ、国内向け官需衛星／商用衛星向け搭載機器の開発成果を生かしながら、30年以上にわたってこれらの製品を世界中に供給しており、年間事業規模は10年前の規模と比較すると、倍増に近い伸びである。海外輸出衛星搭載機器の市場を更に拡大していくにあたり、長期供給契約 (Long Term Purchase Agreement : LTPA) を締結・維持することが肝要となる。特に各衛星メーカーのシリーズ衛

星等で共通的に搭載されるSAP、HPP、LIBなどのバス系機器のLTPA参入は事業の存続、拡張に向けて効果は大きく、そのためには性能・品質・価格・納期等の面で際立った魅力を発揮し、衛星メーカーと長期間タイアップするための他社との差別化を維持すること、市場ニーズを掘り起こして熾烈(しれつ)な戦いを勝ち抜いていくことが不可欠となる。高効率化、高出力化、軽量化、低価格化が差別化への鍵であり、衛星搭載機器の長年の共通課題である。以上の観点から近年開発成果を得て9機分の受注を獲得したオービタル社向け宇宙ステーション補給機搭載の近傍通信システム (PLS) 用機器、フランスTAS社向けSAP並びにLIBの製品について述べる。



輸出用衛星搭載機器

海外の商用衛星、通信衛星などに向けて出荷されている主要衛星搭載機器を示す。ミッション系機器としてRF通信機器、バス系機器として太陽電池パネル、ヒートパイプ埋め込み機器搭載パネル、リチウムイオンバッテリーなどがある。

Cygnus搭載用近傍通信システム用機器は国際宇宙ステーションとランデブ・ドッキング時に安全に誘導する通信機器であり、ISS側と交信するコマンド、テレメトリ等のデータをRFリンクで送受し、適切に信号処理する。

*鎌倉製作所

1. ま え が き

当社は、1980年代前半ごろから本格的に輸出用衛星搭載機器事業に乗り出し、米国Space Systems/Loral(SS/L)、Boeing Satellite Systems(BSS)、Lockheed Martin(LM)、欧州Thales Alenia Space(TAS)、EADS Astrium、インドIndian Space Research Organization(ISRO)などの大手海外衛星システムメーカーに衛星搭載機器を供給してきた。1996年のSS/L社向けHPPのLTPA締結を皮切りに、LM社、TAS社等と同様の締結を実現できた製品がある。しかし、LTPAでは3～5年を契約期間にする場合が多いが、発注台数、時期が確約されるものではなく、市場動向次第でLTPAのメリットが得られないこともある。このような事業環境下で、搭載機器メーカーは常日ごろから市場ニーズに注目し、技術動向を追従し、競争力のある製品を開発し続ける姿勢を保つことが不可欠であり、これを怠ると流れの速い宇宙ビジネスの激流の中で吸収・合併の対象となってしまう。厳しい事業環境の中、当社では近年の国内向け通信・観測・測位向け衛星事業の拡大、海外商用衛星市場参入等の追い風を味方にして、衛星搭載機器の高出力化、高効率化、高速化、軽量化、高品質化、低価格化などの取組みを着実に進めてきた。

(1) 近傍通信システム用機器(PLS)

国際宇宙ステーション(International Space Station:ISS)への宇宙貨物輸送機HTV1(“こうのとり”1号機)は米国航空宇宙局(National Aeronautics and Space Administration:NASA)にその高精度なGPS(Global Positioning System)相対飛行制御技術を高く評価され、米国オービタルサイエンス社(Orbital Sciences Co.:OSC社)の宇宙貨物輸送機Cygnus(シグナス)の近傍接近システム9機分の受注につながった(図1)。受注した機器は、ISSへの接近時に使用するPROX通信システム用機器である。

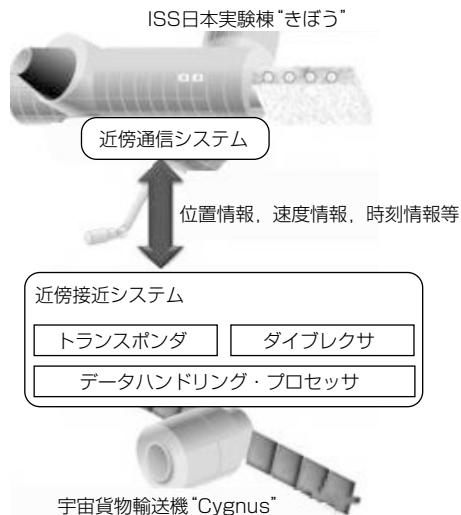


図1. Cygnus近傍の接近システム

NASA関連機器受注及びOSC社からの受注はともに初めてであり、これまで実績前例の数少ない近傍接近システム用通信機器のメーカーとして当社の名を打ち立てることができた。

(2) 太陽電池パネル(SAP)

衛星の最近のトレンドである高出力化推進の原動力となっているのが、SAPの高出力化、高効率化である。当社製SAPは高性能、高品質に裏付けられた技術的優位性及び過去の軌道上実績を売りに、近年海外商用衛星市場の約40%を占めるに至っている。従来のSi系セルを、1990年代後半に開発したGaAs系セルに置き換えることで高効率化、高出力化を実現し、電力当たりのコストは下がってきているが、さらに原低活動を継続し競争力を維持していく。今後は軽量化、長寿命化に向けて薄膜太陽電池の開発を進めていく。キーパーツが購入品であること、外貨建て契約が多い等のリスクを抱えているが、SAP事業は輸出用衛星搭載機器事業の約半分の規模を担っており、これまでのSS/L社、TAS社とのLTPA経験を生かしながら更なる事業拡大が期待されている。

(3) リチウムイオンバッテリー(LIB)

海外の衛星システムメーカーでは、従来のNi-H₂バッテリーセルから性能、信頼性、品質面で優れたLIBセルに着々と切替えを進めており、今後事業の拡大が期待されている。当社は、2001年以降継続的にSS/L社に納入し、2005年の同社向けiPStar搭載用LIBを機にフライト実績が認められ、SES、Intelsat、Echostar、Satmex、Sirius Satellite Radio等の通信事業者向け衛星にも採用が拡大され多くの受注を果たしている。TAS社向けにはGlobalstar-2及びNilesat搭載用LIBを受注し、フランスSAFT社が占有していた市場の牙城(がじょう)を崩し、初参入に至った。ISRO向けには、INSAT-4Bを発端に同シリーズ衛星向けに安定した供給を継続しており、Astrium社とは拡販を展開中であり、海外商用衛星市場の約35%のシェアを得ている。現在開発中の次世代LIBを含め更なる拡販に向けて高性能化、低価格化とともに製品寿命の裏付けと信頼性向上が鍵であり、軌道上データ収集及び地上評価が重要となる。

本稿では、これら製品の最近の開発成果と確立した技術について述べる。

2. ISS近傍通信システム用機器

2.1 概要

この機器は、ISSと宇宙貨物輸送機Cygnusのランデブ・ドッキング用の通信システム機器であり、送受信器(Transponder:TRX)、電力分配合成品(Duplexer:DIP)、CCSDS(Consultative Committee for Space Data System)データ処理装置(CCSDS Data Processor:CDP-2)で構成

し、スペクトラム拡散変復調技術による広帯域化、暗号処理技術などを特長としている。当初HTV向けには、TRXは海外製を採用していたが、官需・商用衛星搭載用通信中継器、変復調装置などで培った固有要素技術を駆使して国産化を実現し、この機器のTRXはすべて国産である。次に、各機器の機能、性能、外観について述べる。

2.2 TRX

TRXはCygnusとISSのJEM(Japanese Experimental Module)搭載PROXとの間で、テレメトリ・コマンド通信、距離・距離変化率測定を行う機器である。

図2にTRXのブロック図を示す。TRXはDIP経由で入力される受信信号(スペクトラム拡散信号)をスペクトラム逆拡散、コマンド復調し、CDP-2へ出力する機能と、CDP-2からのテレメトリ信号を変調、スペクトラム拡散し、DIP経由で出力する機能を持っている。図3に外観を、表1に主要性能を示す。

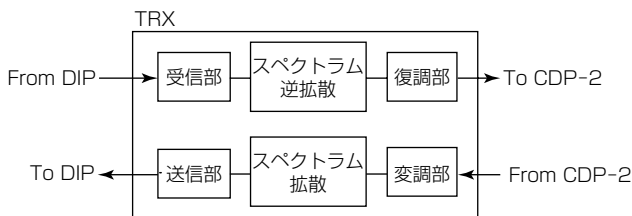


図2. TRXのブロック図



図3. TRXの外観

表1. TRXの主要性能

項目	主要性能	
受信 (RX)	キャリア周波数	2030.4375MHz
	入力レベル	-125dBm ~ -45dBm
	ビットエラーレート	1×10 ⁶ 以下
送信 (TX)	キャリア周波数	2.205MHz
	出力レベル	1.7dBW ~ 3.2dBW (Highパワー) -24.6dBW ~ -21.1dBW (Lowパワー)
共通	変調方式	USQPSK
	データレート	8kbps
	電源バス	50Vバス
	消費電力	37W以下 (RX ON, TX ON) 25W以下 (RX ON, TX OFF)
	質量	5.56 ± 0.28kg
	外形寸法	(L)300 × (W)249 × (H)240 (mm)

USQPSK : Unbalanced Staggered Quadrature Phase Shift Keying

2.3 DIP

DIPはPROXに搭載されるアンテナから送信される円偏波の受信信号及びアンテナへ送信される円偏波の送信信号の分波・合波を行うとともに、帯域外の不要信号を抑圧する機器である。

図4にDIPのブロック図を示す。DIPは送受信信号を分離する2種類の同軸コラムラインで構成する空間共振帯域通過フィルタ(TX/RX-BPF)からなるダイプレクサ(DIP)部とRX側へ漏れ込む不要波を除去するためのスタブ型低域通過フィルタ(LPF)で構成する。図5に外観を、表2に主要性能を示す。

2.4 CDP-2

CDP-2は、CCSDS勧告に対応してテレコマンド信号及びテレメトリ信号を処理し、またテレコマンドに対しては暗号復号を行う機器である。

図6にCDP-2のブロック図を示す。CDP-2は、ISS経由で受信する地上からのコマンドデータからパケット抽出、暗号復号を行い衛星バス機器に送信する機能と、衛星

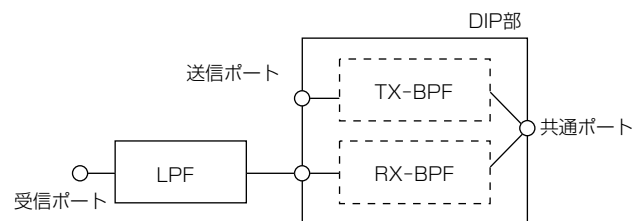


図4. DIPのブロック図



図5. DIPの外観

表2. DIPの主要性能

項目	主要性能	
受信 (RX)	キャリア周波数(Frx)	2030.4375MHz
	通過損失	< 1.0dB (Frx ± 2.1MHz)
	VSWR	< 1.3 (Frx ± 3MHz)
	減衰量	> 84.5dB (Ftx ± 3MHz) > 75dB (2.210 ~ 2.220MHz) > 71dB (13.7 ~ 15.2GHz)
送信 (TX)	キャリア周波数(Frx)	2.205MHz
	通過損失	< 0.8dB
	VSWR	< 1.3 (Ftx ± 3MHz)
	減衰量	> 70dB (50 ~ 1,555.42MHz) > 80dB (2,025 ~ 2,040MHz) > 60dB (2,080 ~ 2,110MHz)
(TX-RX)	送受信間アイソレーション	> 84.5dB (Ftx ± 3MHz)
共通	質量	0.427 ± 0.02kg
	外形寸法	(L)330 × (W)100 × (H)75 (mm)

VSWR : Voltage Standing Wave Ratio

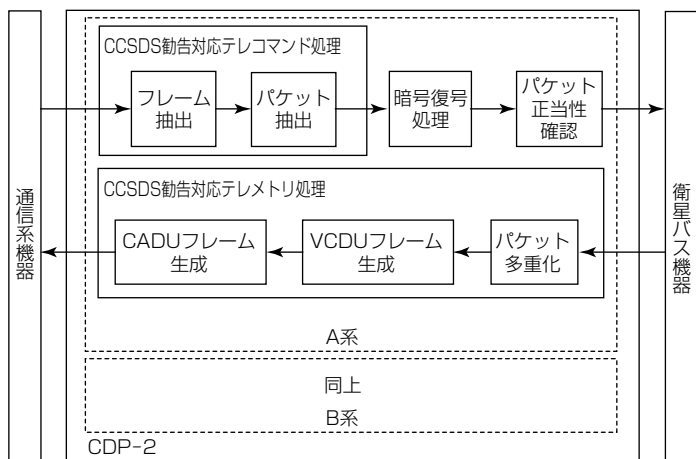


図 6. CDP-2 のブロック図



図 7. CDP-2 の外観

表 3. CDP-2 の主要性能

項目	主要性能
冗長構成	内部冗長(同時オン可)
コマンド処理性能	CCSDS勧告対応テレコマンド処理
	暗号復号機能あり
	入力ビットレート 8 kbps(バースト) 出力ビットレート 64 kbps(バースト)
テレメトリ処理性能	CCSDS勧告対応テレメトリ処理
	入力ビットレート 64 kbps(バースト) 出力ビットレート 8 kbps(連続)
	電源バス
消費電力	10W最大
質量	9.60±0.96kg
外形寸法	(L)216×(W)332×(H)246 (mm)

バス機器から受信するテレメトリパケットをISS経由で地上に伝送するフレームフォーマットへの変換を行い送信機へ出力する機能を持っている。図7に外観を、表3に主要性能を示す。

3. 太陽電池パネル

太陽電池パネル(Solar Array Panel : SAP)は人工衛星の搭載機器へ唯一電力供給を行うことができる製品であり、過酷な宇宙環境でも、運用期間中は確実に電力供給を継続できる高性能、高品質、及び運用期間を延長するために軽量化が要求される。

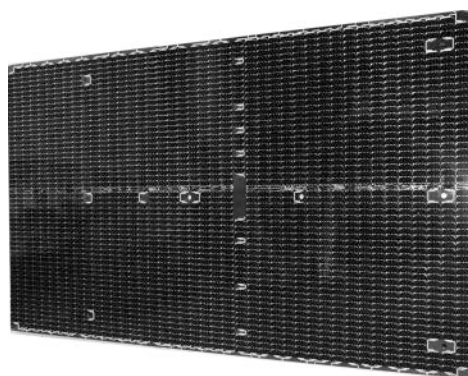


図 8. TAS社向けSAPの外観

多くの厳しい要求が課せられる製品であるが、当社のSAPは2010年度に打ち上げられた全商用衛星の約40%のシェアを占める世界的に信頼された製品であり、これまで1,000枚以上の製造実績とSAP軌道上稼働時間4,000万時間の実績を持っている。一方、当社のSAPの故障が原因で運用期間内に機能を喪失した人工衛星は皆無である。

当社のSAP事業は1976年に打ち上げられた“うめ”から始まった。当初は米国からの技術導入を受けて製造を開始したが、円筒形のスピン衛星の外周に20mm角の単結晶Si系太陽電池セル(以下“セル”という。)約4,800枚を手作業で接着し配線作業を実施しており、衛星の発生電力はSAP換算で1枚あたり0.015kWであった。その後、“きく”“さくら”など5衛星分(SAP換算で13枚相当)を製造・出荷した。

その後、高出力の機器を搭載する必要が生じたため、人工衛星は現在の三軸衛星が主流となり、SAPも展開型のパネル形式となった。当社もパネル形式のSAPの開発を行い、1993年にはSi系セルを使用した最初のパネル型SAPが搭載されたIntelsat-VIIの一号機が打ち上げられた。Si系セルを使用したSAPの製造を現在も続けており、2011年5月時点で90衛星分640枚のSAPの製造・出荷を完了した。

人工衛星の高電力化に伴い、当社は1998年から高効率のGaAs系多接合セルを使用したSAPの開発を開始し、2001年にはGaAs系2接合セルを初めて使用したEchostar-8向けSAPを出荷した。GaAs系セルを使用したSAPの製造を現在も続けており、2011年5月時点で39衛星分360枚のSAPの製造・出荷を完了した。

出荷済みの1,000枚以上のSAPのうち約80%が、軌道上寿命15年以上を要求される商用衛星に搭載されているが、これは顧客が当社SAPの設計/製造技術や製品品質に高い信頼を寄せていることを示している。実際、当社のSAP事業は海外顧客が中心となっており、1996年に米国SS/L社、2000年にはフランスTAS社とSAPのLTAを締結し、2011年現在もSAPの供給を継続している。図8にTAS社向けSAPの外観を示す。

当社のSAPが35年という長期間にわたって衛星機能劣化(又は喪失)に至る軌道上不具合を起こしていないことは、高い設計・製造技術と自動化設備、そして高い品質管理能力によるものである。

SAPが他の人工衛星向け製品と最も大きく異なるのは使用環境の厳しさで、常に放射線や紫外線にさらされ、かつ+60～-170℃の温度変化に耐える必要がある。この環境条件で機能する製品を作り上げるため、当社は様々な技術を組み合わせている。

例えばSAPの構造部分であるサブストレート(SBST)は高剛性のCFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastic: 炭素繊維強化プラスチック)材料を使用し、厚さ約0.1mmの表皮と低密度ハニカムコアを組み合わせることで、高剛性、かつ世界最軽量級の質量、かつデンプル0.1mm以下を達成している。高剛性と軽量化によって軌道上姿勢制御時の燃料消費を減らし、デンプル低減によってセル-SBST間の接着剤を減らすことでSAPの質量減、及びセル-SBST間の熱伝導向上によってセルの発電効率低下を防いでいる。

また先に述べたようにSAPは厳しい温度環境にさらされるため、セル-セル間やセル-コーナーダイオード間を接続するインターコネクタと呼ばれる金属部品には、材料の線膨張差から生じる熱応力が数千サイクル負荷されることになる。このため当社ではインターコネクタの設計に際しては詳細な熱応力解析とクーボン試験を繰り返し、人工衛星の運用期間にインターコネクタが熱応力で破断しないよう、ストレスリリーフを含めた形状を慎重に決定している。また、冗長系を持たせる設計とすることでインターコネクタの破断による発生電力低下を防いでいる。

実際のインターコネクタは厚さ0.1mm以下の非常に薄い金属箔(はく)をエッチングで加工し、溶接性を上げるため表面にめっき処理を行った後曲げ加工でストレスリリーフを設けているが、傷や凹(へこ)み、欠陥があるとそこから破断が起こることから、製造プロセスと検査を厳しく管理することで、高い信頼性を持つ部品を製造している。

人工衛星は今後、さらにデータ通信量の増大が見込まれるため更なる高電力化が必要な状況にあり、セルメーカーは更なる効率化と軽量化を求めて薄膜太陽電池を開発している。現在、研究室レベルであるが変換効率が35%近いセルが実現化されている。従来のセルと薄膜太陽電池は構造的にも大きく異なっており新たに様々な開発が必要となるが、薄膜太陽電池を使用することで当社製SAPの質量を約40%減らし、衛星の長寿命化に貢献できるため、2015年を目処に市場へ投入する計画で開発を行っている。

4. リチウムイオンバッテリー

当社の宇宙用リチウムイオンバッテリー(LIB)は、1998

年からジーエス・ユアサテクノロジー社(旧日本電池)と共同開発を進めてきている。輸出用として初めて2005年8月にSS/L社向けiPStarに搭載され、2007年3月にはISROのINSAT-4Bに搭載されて打ち上げられ、現在も正常に運用されている。これらの実績を皮切りにLIBの搭載が拡大し、2011年3月時点でフライトモデルの出荷台数が累計100台に到達した。軌道上での作動実績時間累計は、2011年5月末現在で国内外を含めて56年分に相当し、一つの故障もなく正常に作動を続けており、高い信頼性を裏付けている。2010年9月には図9に示すTAS社向けGlobalstar-2搭載用大容量LIB(100Ah、9セル構成)の第一弾6機が打ち上げられ、順次後続機向けの製造・出荷を予定している。主要性能を次に示す。

- バッテリー容量：3,663 Wh
- セル容量：100Ah(公称容量)
- バッテリー構成：9セル直列
- 寸法：(W)192.1×(L)575×(H)270(mm)
- 質量：35.7kg
- 質量エネルギー密度：103Wh/kg

SES、Intelsatなどの大手通信事業者向け衛星にも採用されたことから、今後従来のNi-H₂バッテリーセルからLIBへの移行が更に進み、輸出事業の拡大が期待される。LIBは2009年に電気自動車(EV)が発売されたことや、スマートグリッド向けなど、国策を背景とした市場を対象に急成長の勢いを見せているが、宇宙用の機能としては、

- ①充放電サイクルに強い(低軌道では数万サイクル)
- ②長寿命(静止衛星：15年以上、低軌道衛星：5年以上)
- ③軽量でエネルギー密度が高い
- ④衛星搭載性(熱的・機械的な特性)に優れること

等が要求される。セルには正極にコバルト酸リチウム(LiCoO₂)を用いて高い充放電電圧を得るとともに、負極にはカーボン材料を用いて容量の確保を図っている。バッテリーとしてはセルごとに、セル故障対策のための過充電保護回路、直列に接続されたバッテリーセルの開放故障時でもバッテリー機能を維持できるバイパススイッチを独自に自社開発し、長寿命化を支える高信頼性技術を保有している。



図9. Globalstar-2搭載用大容量LIB

宇宙用セルとしてはエネルギー密度が高い大容量セルを目標とし、50Ah、100Ah、175Ahのセルを開発した。エネルギー密度は代表値で140Wh/kgとなっており、従来の宇宙用セルであるNi-H₂バッテリーセルに比べて2倍以上の高い値である。バッテリーレベルでも筐体(きょうたい)や保護回路などの軽量化を図り、100Wh/kg以上の高いエネルギー質量効率を実現し、競争力強化を図っている。

セルの形状としては長楕円(だえん)円筒形という独自の形状を採用しており、容積効率が高い一方で、バッテリー筐体フレームとの接触面積を大きく取れるため、セル内部での温度均一性に優れる。セルの機械実装に関しては、アルミ合金製T型断面のフレームに対して、弾力性を持たせた薄板のシェルで押さえつけて保持する構造としている(特許 2002-305758)。バッテリーセルは充放電に従い膨張・収縮を繰り返すため、Ni-Cdバッテリーに見られるようなスタック構造を採用した場合、国連勧告によってセルに設けることが義務付けられている安全弁周りに応力が集中し、セルケースの疲労破壊による電解液漏れを起こす懸念があり、上記のセル実装技術はこれを回避し、製品のサイクル寿命の10倍(40万回)以上のサイクル強度を持っている。

バッテリーはセルを直列に複数接続して構成し、充放電はバッテリー一括で行う。このため、セル電圧がばらつくことと各セルの電圧に差が生じ、この結果、特定のセルが過充電になる可能性がある。これを防ぐのが過電圧保護回路で、一定電圧以上に充電が持続する場合に、この充電電流を迂回(うかい)させ、充電電圧が規定値以上にならないように制御する(特許 2003-427961)。

バイパススイッチは直列に接続されたセルの一つが開放故障を起こした場合でも、充放電電流の経路を確保してバッテリーの機能を喪失しないようにするためのスイッチである。これがないと、1セル故障に対し、バッテリー冗長を構成する必要があり、質量効率が損なわれるため、重要な技術の一つである。セルごとにスイッチを並列に接続し、セルが故障を起こした場合に自動で作動し、機能を維持できるようにしている(特許 2005-063869)。

このほか、EMI(Electro Magnetic Interference)を低減するためのバスバー接続方式(特許 2002-038164)や、セル端子の電気接続技術に関しても独自に技術開発を行うなど、バッテリーシステムとしての信頼性を高める工夫を総合的に実施している。

静止衛星用には大容量化、低軌道衛星用には長寿命化と低コスト化が今後のトレンドであり、これらの要求にこた

えるために客先を巻き込みながら次世代バッテリーの開発を進めている。現在、半年ごとに技術革新がおこっているリチウムイオン電池というデバイスを用いて、いかに高い信頼性を低コストで実現するかの研究開発を継続しており、(独)宇宙航空研究開発機構(JAXA)設計標準、当社内の蓄電デバイスプロジェクトとも密に連携しながら、安全、安心して高性能なLIBを世界中の顧客に使ってもらえるよう、努力を続けている。

一方で、技術のガラパゴス化を防ぐべく、日進月歩の民生技術を早期に取り込み、高い性能、安全性に関する技術革新をタイムリーに宇宙用に取り込める仕組みを構築するとともに低コスト化を両立させる技術の検討も並行して進めている。これらの検討成果は宇宙用LIBに対する検証要求としてISO TC20/SC14を通じて日本から提案することを検討している。この活動は経済産業省の予算で日本航空宇宙工業会(SJAC)の中に“宇宙用リチウムイオン電池の国際標準化にかかわる事業”として検討委員会を設置し、宇宙機関、関係企業が参画し、宇宙用LIB発展の下地となる規格案を欧米、アジアの宇宙機関、関連メーカーとも調整しながら検討を進めている。また、SJACを通じて自動車業界、電池工業会とも適宜連携し、他産業とのバランスを図りつつ、国連などでのLIB輸送安全にかかわる規定に対しても活動を展開し、スムーズな国際輸送によって輸出入が活性化する努力を継続している。

これらの成果を当社商用衛星DS2000及び海外衛星メーカーへ拡販していくことによって国内外シェアNo.1を目指す。

5. む す び

輸出衛星搭載機器の最近の代表的な製品として、米国OSC社向けCygnus搭載用近傍通信システム用機器、フランスTAS社向け太陽電池パネル並びにGlobalstar-2搭載用リチウムイオンバッテリーについて述べた。輸出用衛星搭載機器事業は、海外市場動向、海外顧客要求及び契約の多様化、外貨為替レートなどの先を読み難い不確定要素があり、利益を生み出すことが困難な状況が続いているが、技術革新、実績に基づく海外顧客信用の獲得、品質管理改善、生産安定化など長年の活動の積み重ねが漸(ようや)く実りつつあり、不確定要素分を補い、更には利益を生み出せる体質となってきた。今後も技術革新に邁進(まいしん)して他社との差別化を図り、海外市場シェアの更なる拡大を視野に入れながら、商用衛星事業の一翼を担っていく。