

第 13 章 月探査衛星「かぐや」搭載ハイビジョンカメラ ～その開発と地球の出の撮影～

日本放送協会(NHK) 放送技術局 コンテンツ技術センター
制作・開発推進 山崎順一

HDTV System onboard Lunar Explorer KAGUYA (SELENE)

Japan Broadcasting Corporation (NHK) Broadcasting Engineering Department
Technical Operating & Engineering Center Junichi Yamazaki

ABSTRACT The high-definition television (HDTV) system onboard the Japanese lunar explorer KAGUYA (SELENE) succeeded in taking clear moving images of the Earth and the Moon at a distance of 380,000 km from the Earth. We enforced the space environment experiments and improvements for the space HDTV system. It consists of the camera-unit and the electronic-unit, and includes 2.2 M-pixel IT-CCDs and narrow design-rule as 0.18 micron LSIs. Video data of one minute is compressed and recorded into 1GB semiconductor memory, and is transmitted to the ground station in Japan. 150 volumes of video footage were obtained up to the end of December 2009. The picture-quality of the space HDTV camera is very good in spite of the being exposed to the space ray.

1. はじめに

2007年9月14日、H-IIA 13号ロケットによって打ち上げられた宇宙航空研究開発機構(JAXA)の月周回探査衛星「かぐや(SELENE)」は、10月4日に月軌道に投入された。この衛星には14の観測機器とNHKが開発した「ハイビジョンカメラ(HDTV)」が搭載された。カメラは、一般の放送用機材を宇宙用に改修したものであるが、2007年11月7日に月の地平線から昇る「地球の出」や沈む「地球の入り」を鮮明なハイビジョン動画として世界で初めて撮影することに成功し、その後も1年以上にわたって新しい映像の取得に成功している。

2. 搭載経緯

宇宙搭載用ハイビジョンカメラの検討を開始したのは2000年からである。その前年の1999年に、「かぐや」衛星に大きな設計変更があり、無人月着陸を次の機会に委ね、かわりに月周回観測で着実に大きな成果を上げることが目標となった。そこで着陸機の浮いた重量を何か有効に利用できないかという話になり、ハイビジョン搭載の話がでてきた。しかし、科学観測機器は宇宙の厳しい環境にも適応できる「宇宙認定(高信頼性)部品」を使っているのに対して、ハイビジョン機材は真空宇宙で実績のない「放

送(民生汎用)機材」から成る。この放送機材の信頼性試験を含めた提案書を作成し、2001年の公募に応募、2001年12月の宇宙開発委員会で搭載が決定した(第1表)。

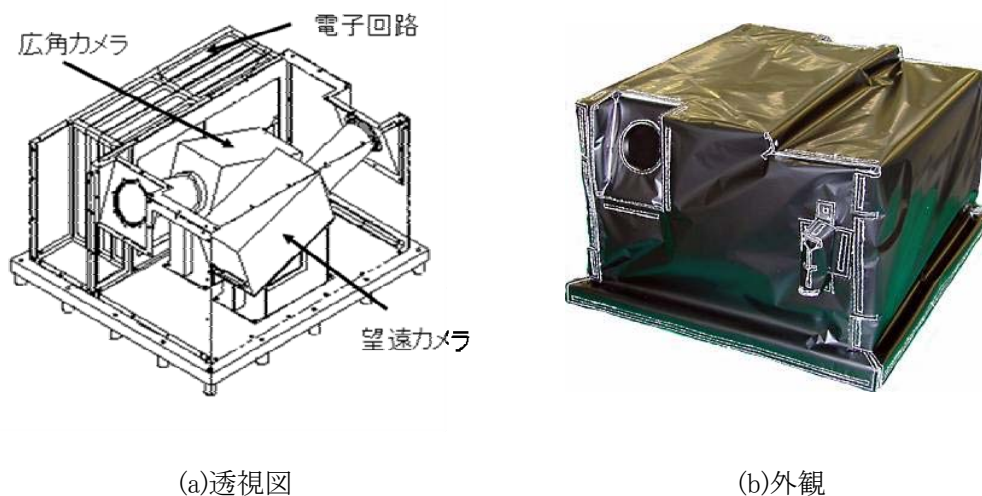
第1表 搭載経緯

1999年	セレーネ搭載の14の科学観測機器決定 月着陸船を断念する設計変更
2000年	NHKハイビジョンカメラの環境試験を開始
2001年11月	放送事業者にカメラを公募
2001年12月	宇宙開発委員会でNHKカメラの搭載決定
2003年1月	NASDA&ISAS(現JAXA)とNHKで正式に協定に調印

3. 提案内容

提案の正式名は「高精細映像取得システム(HDTV)」(第1図)である。その目的は最先端の高精細カラーカメラによって、月周回軌道から動画映像を取得し、お茶の間に届けることで、目標被写体は月面ならびに地球である。従来の映像に比べて、ハイビジョンはきわめて鮮明であるだけでなく、動画による臨場感は、あたかも月を周回する宇宙船に自分が乗って窓から眺めているような新鮮なインパクトを与える。このことは、かぐやの目的である「月誕生の謎の解明」とあいまって、広く国民に宇宙と宇宙開発の理解を促進させるとともに、21世紀を担う青少年に科学技術への興味と夢を与えるものと考えられる。

遠くて容易に行けない場所から映像を伝えるのはテレビジョンの大きな役割である。また未知なるものへの好奇心は、生命の遺伝子に組み込まれたプログラムといえよう。ハイビジョンが月に向かったのは必然的な流れであったといえる。



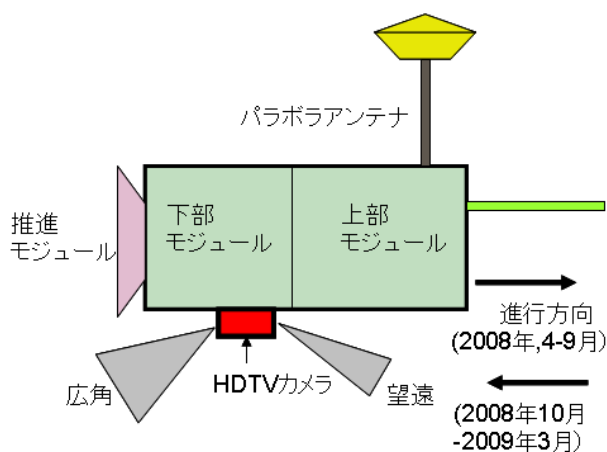
第1図 高精細映像取得装置(HDTV)

4. ハイビジョンシステムの概要

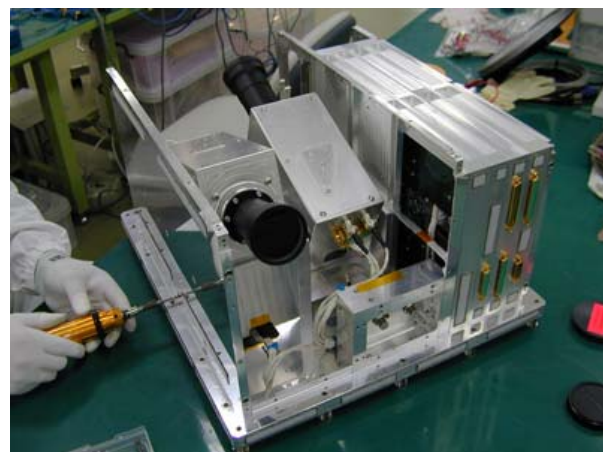
ハイビジョンシステムは、衛星の下部モジュールの月面側に取り付けられている(第2図)。システムは1つの筐体にまとめて、内部にカメラ、データ圧縮、記録、電源部および制御部を組み込んだ。主要な部分は2システムを用意し、冗長性をもたせた。1台のカメラには広角レンズを他方には望遠レンズを付け、月の地平線が画角の中央付近に入るように取り付け角度を定めている。この斜めの取り付け角度は、ほぼ月面直下を観測対象とする他の多くの観測機器とは異なる特徴といえる。

カメラは2/3型200万画素のIT-CCDを用いた3板カラー方式である。圧縮部はフレーム内DCT圧縮方式、記録部はフラッシュメモリである(第2表)。記録方式には標準モード(1倍)の他に長時間の撮影を可能とするインターバル記録モード(2倍、4倍、8倍)を用意した。メモリ容量は1GBで、ハイビジョン動画1分間相当の保存が可能である。ハイビジョンカメラが衛星や科学観測機器に悪影響を与えてはならない。そのため、熱的に独立させる必要があり、カメラを16本のスペーサーで衛星から離れた状態でネジ止めしている。内部にサーモスタットヒーター2式を組み込み、レンズ開口部を除く外周を断熱膜で覆って、温度管理をハイビジョン独自におこなっている。また、微弱な月の磁場を測定する科学観測装置があるため、磁場の発生が懸念される電気モーター類は用いていない。

電源部は衛星の太陽電池から最大DC52Vを受電し、電圧を安定化して±12Vと5Vを作り、各回路に分配している。また、要所に温度や電圧などのセンサーを取り付けている。システム全体の重量は16.5kg、消費電力は最大50Wである。システムの諸元を第2表に、組み立て中の外観を第3図に示す。



第2図 衛星へのカメラの取り付け図



第3図 宇宙カメラシステムの外観(組み立て中)

第2表 システムの諸元

項目	諸元
CCD	2/3 型 IT-CCD 1920×1080 画素
カラー方式	ダイクロイックプリズム 3 板カラー (RGB)
圧縮部	HDCAM 方式 144Mbps
記録部	EEPROM メモリ 1GB
伝送IF	CCSDS パケット方式 7.6Mbps
寸法(mm)	460(W)×280(H)×420(D)
重量(kg)	16.5
消費電力(W)	最大 50

5. カメラシステムの詳細

撮影のための光学系の諸元を第3表に示す。画角と内蔵 ND フィルタの値については、望遠は地球の出を、広角は月面の広い範囲を捉えることに主眼を置いて決定した。カメラの制御項目は、地上品とほぼ同様に数多く設けた。露光調整に使う電子シャッターは、被写体の輝度ピークに合わせた自動制御を基本としている。電気ゲインは通常-6dB、CCD のダーク検出時などでは+12db としている。映像調整機能を第4表に示す。

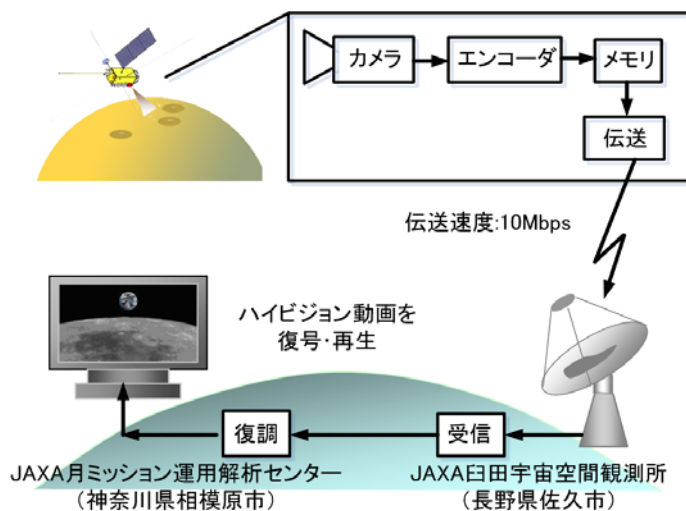
第3表 光学系諸元

項目	広角 (W)	望遠 (T)
焦点距離 (mm)	10	35
視野角 (°) HxV, D	50.1x29.5, 56.3	15.5x8.7, 17.8
F 値 (最大口径比)	F 5.6 (円形固定絞り)	
減光フィルタ	ND = 1	ND = 1/8
寸法 (mm) LxΦ	112.5×60	81.5×60
重量 (g)	330	260
取り付け角度 (°) (衛星水平面-光軸)	22.5	18.5

第4表 主な映像調整機能

項目	諸元
ゲイン調整 (dB)	-6、-3、0、3、6、12、18
露出調整	電子シャッター
A: オート	ピーク値制御、平均値制御 露出補正: -2eV~+2ev (1/63.4~1/1,983 sec.)
B: マニュアル	1/63.4~1/16,000 sec.
その他の調整	γ、Knee(ポイント、スロープ)、ブラックγ、 PED (R,G,B)、AWB、ABB: エリア指定
基準信号	カラーバー、CAL
コントロール信号	シリアル&パラレル
スーパーインポーズ	中心座標、シャッター速度

カメラのデータ出力は約1.485 Gbpsである。これを143Mbpsにデジタル圧縮して、メモリに一時蓄積し、約20倍の時間をかけて地球に伝送する。衛星側の伝送容量は最大10Mbpsである。信号伝送の系統を第4図に示す。



第4図 信号伝送系統図

6. 開発指針と信頼性試験

ハイビジョンカメラシステムには、数100万個のトランジスタを1つのチップにした高集積回路(LSI)が複数個使われている。そのデザインルールは $0.18\sim 0.25\mu\text{m}$ であり、宇宙での実績がない。しかし集積度の高いLSIを宇宙用部品に置き換えることは開発期間、費用の両面から実質的に不可能であった。そこで基本的には、これら部品を使って環境試験を行い、不具合が起きた部分に改良を加えていく開発方針をとった。

厳しい環境条件の例としては、まずロケット打ち上げ時にかかる振動がある。ハイビジョン取り付け位置で20G(Gは重力加速度)がかかるが、この数値はジェットコースターの3Gに比べて7倍である。次に衛星切り離し時に加わる衝撃がある。火薬で切り離すため1000Gの衝撃がかかるが、これは車の衝突実験に使われる機材の耐G仕様である100Gに比べて10倍である。その他、直射日光が当たる表面温度は $+130^{\circ}\text{C}$ と高温になり、逆に日陰の表面温度は -170°C まで低下する。

特に懸念されたのは、CCDが宇宙放射線によって画素欠陥(白キズ)を生じやすい問題である。また、レンズ、プリズムに関しては振動や衝撃に対する精度の維持、LSIに関しては放射線によって生じる誤動作や熱への対策、高密度実装基板に関しては振動やEMCの対策が課題となった。

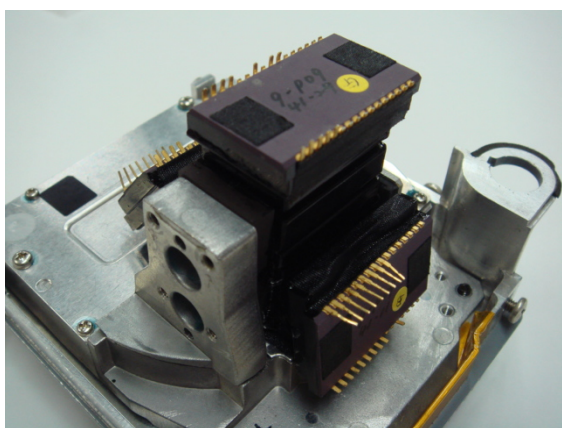
7. 試験結果と改良

第5表に実際に行った試験項目とその条件を示す。まず真空中で使えない電解コンデンサなどの部品を交換し、つぎに振動試験などで壊れた部分の設計変更と改修を行った。第5図はランダム振動で壊れたCCDであるが、この対策としてCCDと電子基板との信号接続をフレキシブルケーブルに変更した。第6図に衝撃試験の様子を示す。木製のハンマー(掛谷)によって規定の1000Gの衝撃レベルを得た。宇宙放射線の試験は、日本原子力研究所の高崎研究所、放射線医学研究所、ブルックヘブン研究所などで実施した。影響としては、データが壊れる(1と0が反転する)あるいはソフトウェ

アが暴走する現象が確かめられた。この対処法として多数決判定ソフトウェアやタイマー回路、電流制限回路などを組み込んだ。また放射線で CCD に白キズが発生するが、これについては地上での画素補間に対応することにした。第 6 表に実施した主な改修を示す。

第 5 表 各種試験条件

試験項目	試験内容	単体	全体	総合
放射線試験	トータルドーズ: γ 線 (11Krad)	●	●	
	シングルイベント: LET 最大 37.4MeV/(mg/cm ²) : 核種 (H, N, Ne, Si, Ar, Kr など)	●		
温度(内部)	-30~+60℃, 75℃	●	●	
熱真空・熱平衡	真空 -170~+130℃ 温度サイクル		●	●
磁場	磁気、帯磁	●		●
振動 (X,Y,Z)	モータール: 0.4Grms (20-2kHz) 正弦波: 10Grms (5-50Hz), 20Grms (50-100Hz) ランダム: 9, 16, 22Grms (20-2kHz, 60-80sec.)	●	●	●
衝撃	±X, ±Y, ±Z: 1000G (800-4kHz)		●	●
EMC	電磁輻射(30Hz-40GHz)、相互干渉			●



第 5 図 振動試験で壊れた CCD と光学ブロック



第 6 図 衝撃試験(ハンマー打撃法)

第6表 宇宙用の主な改修

部位	改修内容
光学系	分光プリズム固定強化、前面にガンマ線吸収用石英ガラス、フォーカスの無限遠固定、絞り固定、レンズマウント固定、レンズエレメント固定、真空によるバックフォーカス補正、フィルタ類一体化
電子部品	電解コンデンサ交換、ボタン電池取り外し、冷却ファン取り外し、高さ5mm以上の部品固着、ICのポッティング
回路、基板	電流制限回路付加、タイマー回路付加、電源回路強化、基板補強、基板全体へのコーティング、熱伝材料と熱経路の見直し
コネクタ、筐体	コネクタ交換と固着、放熱板強化、締結点増加、フレキシブルケーブル採用、筐体の表面処理変更
ソフトウェア	メインプログラム2重化、制御テーブル3重化と多数決判定ソフトの組み込み

8. 撮影計画

ハイビジョンによる動画撮影を的確に実施するために、運用支援ツールを開発した。支援ツールには天体運行や月面地図、地形の名称、緯度・経度、ハイビジョンカメラの視野角などの基本データが入っている。ここに最新の衛星軌道情報、イベント情報などを入力して、撮影エリアの表示をさせ、さらに太陽高度から地形の高低差による陰影などを考えて実際の撮影タイミング(年月日、時刻)を決める。また、カメラの感度やインターバル記録などの運用条件を決めて撮影の立案を行う。併せて、ダウンロードが可能な時間帯を見つけて、データの伝送を行う。

9. 映像取得と公開

2007年9月29日、「かぐや」衛星が月に向かう途中の11万キロメートルの距離から「遠ざかる地球」を望遠カメラで撮影することに成功した。この時、衛星はスラスラ噴射により姿勢を変更し、リアクションホイールで姿勢を維持した。10月29日以降は月周回軌道の高度約100kmから月の撮影を行った。衛星が前に進むことで月面のクレーターが奥から手前に迫ってくるように見える。演出側からは短い時間の中で多くの地形を紹介し、適度な速度感が欲しいといった要望があった。そこで通常は8倍のインターバル記録モードを使い広角カメラで月を撮影した。緯度にして約24度の広い領域をダイナミックに移動した映像が得られた(第7図)。斜め先を見ているので1画素は画面の下のラインで70m相当である。

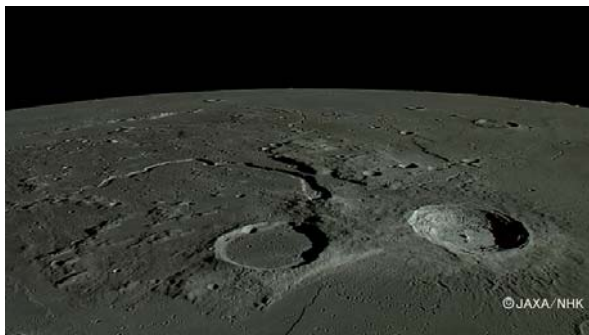
得られた映像は、JAXAのホームページで順次公開されると共に、NHKでは11月14日の総合テレビで「探査機「かぐや」、月の謎に迫る」と題した特別番組で放送した。また、その後もカメラは順調に撮影を続け、2008年4月6日には「満地球の出」を望遠カメラの1倍速で撮影した(第8図)。この画像は同年7月、北海道の洞爺湖で開催された環境サミットのポスターに使われた。7月4日には衛星が姿勢を変えて慣性航行をおこなったため、この時期を利用して衛星直下の撮影をおこなった。この時は広角カメラで4倍のインターバル撮影をした。直下の撮影では、1画素は広角でおよそ40m相当、望遠で14

mになる。10月13日にはNHKスペシャル「月と地球、46億年の物語～探査機かぐや最新報告～」を放送した。2009年1月11日には、サイエンスZERO「月の素顔に迫る～“かぐや”と巡る“月世界”～」を放送した。2月10日には、衛星の姿勢を変えて月食中の地球の撮影に成功した(第9図)。

10. 撮影結果

今までの撮影実績を第10図に示す。図でベースラインと呼んでいるのは、年2回の「満地球の出」の機会を示し、HDTVが優先して2回ずつ撮影できた。それ以外は観測機器が優先され、伝送容量に空きがあるときのためのみの撮影であった。科学観測機器の定常運用期間(2007年12月21日～2008年10月31日)では頻度が下がっているが、その前後にあたる初期機能確認と後期運用の期間で多くの撮影を行うことができた。2009年2月現在で静止画、動画それぞれ150本を超える映像を取得している。

CCD撮像素子の白キズ補正はビデオの画像処理作業(コントラスト調整など)の中で実施している。2009年1月の撮影でも補正数は5ドット程度であり、スペースシャトルでハイビジョンカメラを使用した時に比べると白キズの発生が大変少ない。これは第7表に示す両者の違い(温度、シャッター速度、ゲイン)が白キズの見え方に影響しているためと考えられるが、詳細については今後検討したい。かぐやハイビジョンカメラの開発体制を第8表に示した(主なもののみ)。なお本開発、試験、運用は、JAXAセレーネプロジェクトの下で進められた。



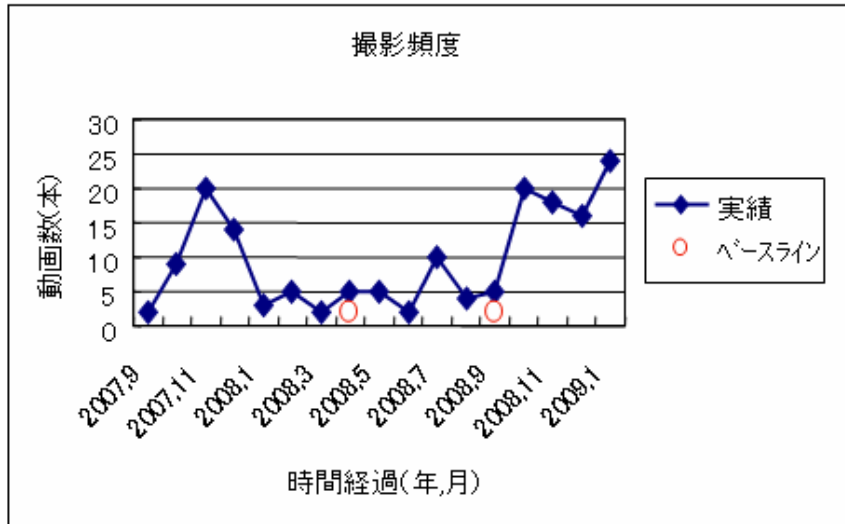
第7図 アリスタルコス台地(広角カメラ)



第8図 満地球の出(望遠カメラ)の連続表示



第9図 月食中の地球(望遠カメラ)部分拡大



第 10 図 撮影実績とベースライン

第 7 表 CCD 白キズ発生の条件比較

	スペースシャトル	かぐや広角カメラ	キズの見え方への寄与
環境温度	20℃	0-5℃	
動作時間	30 分以上	20 分以下	
予想素子温度	45℃	10-30℃	1:0.06-1:0.25
電子シャッター	1/60	1/1000-1/60	1:0.06-1:1
アンプゲイン	0 dB	-6 dB	1:0.5

第 8 表 ハイビジョン開発体制

NHK かぐや HDTV 開発グループ	関係機関と担当
・ハードウェア	明星電気(アセンブル、試験)
山崎順一 (PI)	池上通信機 (カメラ)
三橋政次 (S-PI)	フジノン (レンズ、プリズム)
山内正仁 (Co-I)	富士通 (テレメトリ)
太刀野順一 (Co-I)	ソニー (エンコーダ)
・運用支援ツール	NEC (インターフェース)
本田理恵 (Co-I、共研/高知大学)	JAXA (衛星計画試験、衛星運用)

11. あとがき

ハイビジョンシステムが 38 万キロメートル離れた宇宙に飛び出したのは世界で初めてのことであり、得られた映像は日本のみならず、世界中から大きな反響があった。今回の衛星搭載によって、地上用のハイビジョン機材でも適切な改修と運用を行えば、厳しい宇宙環境にも耐えられることを実証できた。このことは、今後の月着陸船などへの搭載でも技術的な可能性があることを示している。

ハイビジョン関連の技術は目を見張るような小型化、低消費電力化が進んでいる。また最近の小型携帯機器は、衝撃や振動、温度に対する耐性を高めながら高性能化を図っている。微細化によって放射線の影響の懸念はあるものの、今後、宇宙で民生品を利用する機会は増えていくものと考えられる。