

[依頼講演]月周回衛星かぐや搭載ハイビジョンカメラシステム

太刀野 順一¹ 山崎 順一² 三橋 政次² 山内 正仁²

本田 理恵³

¹NHK エンジニアリングサービス 〒157-8540 東京都世田谷区砧 1-10-11

²日本放送協会 〒150-8001 東京都渋谷区神南 2-2-1

³高知大学 〒780-8520 高知県高知市曙町 2-5-1

E-mail: ¹tachino@nes.or.jp, ²{yamazaki.j-gq, mitsuhashi.s-jo, yamauchi.m-gm}@nhk.or.jp
³honda@is.kochi-u.ac.jp

あらまし かぐや(SELENE)搭載ハイビジョンカメラシステム(HDTV)の開発過程と現在までに得られた新しい映像を紹介するとともに、宇宙環境におけるハイビジョンカメラシステムの現状、運用状況について報告する。また、ハイビジョンカメラの今後の撮影計画および、将来性と課題について報告する。

キーワード かぐや, SELENE, ハイビジョンカメラシステム, HDTV, 宇宙

1. かぐやの概要

月周回衛星「かぐや」は、2007年9月14日に種子島宇宙センターから打ち上げられた。衛星の大きさは2.1m×2.1m×4.8mであり、燃料込みの質量が3tもある日本では最大級の衛星である。「かぐや」には14の科学観測機器が搭載されており、月の進化の謎を解明するのが目的である。「かぐや」は月の高度100kmの極軌道を周回しながら、2007年12月後半から観測を行っている。「かぐや」は主衛星(月周回衛星)と、2機の子衛星(リレー衛星(おきな)・VRAD(ブイラド)衛星(おうな))から構成されている。「かぐや」では月表面の元素分布、鉱物組成・分布、地形、表面付近の地下構造、磁場分布、重力分布の観測を月全域にわたって行う。これらの観測によって、総合的に月の起源・進化の解明に迫ると期待されている。同時に周回衛星に搭載された観測機器で、プラズマ、電磁場、高エネルギー粒子など月周辺環境計測を行う。これら計測データは、科学的に高い価値を持つと同時に、将来月の利用の可能性を調査するためにも重要な情報となる。

2. HDTVの概要

HDTVシステムの外観を図1示す。構成としてはカメラ部と電子装置部とからなる。カメラ部は2/3型200万画素のIT-CCDを用いた3板方式のカメラを2台搭載しており、1台はTELE(35mmレンズ装着)、もう1

台はWIDE(10mmレンズ装着)となっている。光学系諸元を表2に示す。撮影する時は2台のうち1台を選択して撮影を行う。電子装置部は電源部、I/F(インタフェース)部、メモリ部、エンコーダ部の構成になっている。「かぐや」の太陽電池パネルで発電された電力はHDTVシステムの電源部にDC52Vを供給する。電源部ではDC52Vを受けて、+5V電源、±12V電源を各部に供給している。I/F部は衛星からのHDTVシステム専用のコマンドを受信したり、HDTVシステムの健康状態を示すテレメトリを衛星側に送ったりする部分である。メモリ部はエンコーダ部からのデータをメモリする。EEPROMを使用しており、容量は1分間の映像データ(圧縮されたもの)が保存可能な1GBを2系統としている。エンコーダ部はカメラとセットで1式ずつの構成である。メモリ部は2系統あり冗長性を持たせている。メモリ部に記録した映像データは、高速データインタフェース回路を経由して衛星本体に転送する。「かぐや」衛星からのデータは、長野県佐久市の臼田宇宙空間観測所で受信し、地上の回線で相模原市の月ミッション運用解析センター(SOAC)に送られる。地上側の設備は、搭載機器の動作状態(温度、電圧、コマンドやパラメータ)を監視するテレメトリ表示装置(クイックルック)と、送られてきた映像データを復元する復調装置から構成されている(図2)。HDTVシステムには質量削減のため、雲台、ズーム機能はない。よって、撮影可能な場所は衛星の軌道に依

存する。また、HDTV 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おり、レンズの向きは進行方向に対して2台を逆向きにしている(図3)。衛星の軌道高度誤差(100±30km)や他の観測機器が画角に入らない等の考慮をして、月の地平線と地球が画角の中にバランスよく収まるように取り付け角度を決定している。

HDTV システムには温度変化での故障を防ぐために、温度センサをカメラ部、エンコーダ部周辺に1個ずつ取り付けられている。なお、電源、インタフェースおよびセンサは、宇宙用高信頼性部品を使用している。

HDTV システムが衛星から地球へ向けてのデータ伝送には、高速と低速の二つのモードがある。高速伝送は、7.6Mbpsのレートで1分間の動画データを約20分で伝送可能である。低速伝送は、100kpbsで静止画の伝送予備となる。

カメラの露光調整は電子シャッターで行っており、これにはマニュアルとオートの2種類がある。そのほか電気ゲイン、ガンマ、ペダスタル、ホワイトバランスなどの多くの映像調整項目が地上からのコマンド制御で行える。また、非常時の原因調査のために地上品と同様のテスト信号も組込んである。通常はシリアル制御で行うが、重要項目は、パラレル制御も行えるようにしている。映像調整機能を表3に示す。記録方式には標準モード(1倍)の他にインターバル記録モード(2倍, 4倍, 8倍)を用意した。



図1 HDTV システムの外観

項目	諸元
CCD	2/3型 IT-CCD 1920×1080 有効画素
カラー方式	ダイクロイックプリズム 3板(RGB)
圧縮部	DCT圧縮 HDCAM方式 144Mbps
記録部	EEPROMメモリ 1GB
伝送 I/F	CCSDS パケット方式 7.6Mbps
寸法	460(W)mm×280(H)mm×420(D)mm
質量	16.5kg
消費電力	最大 50.0W
撮影モード	動画(×1, ×2, ×4, ×8), 静止画

表1 システム諸元

項目	広角(W)	望遠(T)
焦点距離(mm)	10	35
視野角(°)H×V,D	50.1×29.5,56.3	15.5×8.7,17.8
F値	F5.6 固定	F5.6 固定
減光フィルタ	ND=1	ND=1/8
寸法(mm)LxΦ	112.5×60	81.5×60
質量(g)	330	260
取付角度	22.5	18.5

表2 光学系諸元

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 1/63.4~1/1983
B: マニュアル	1/63.4~1/16000
その他の調整	Knee(ポイント、スロープ)、 ブラックガンマ、PED
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

表3 映像調整機能

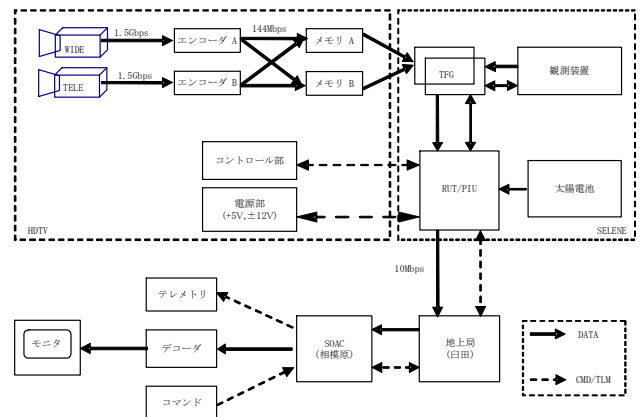


図2 システム系統図

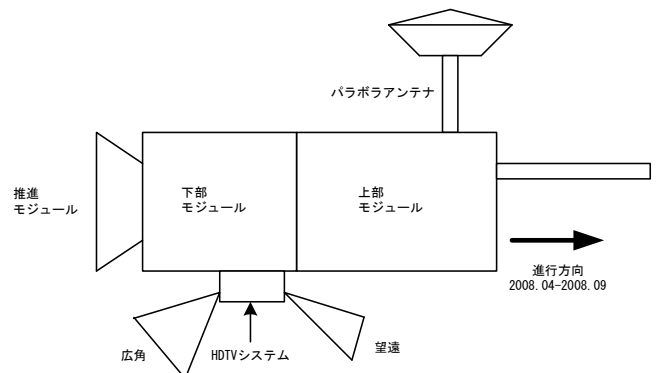


図3 衛星での HDTV システムの取付位置

3. 環境試験

HDTV システムを宇宙に持って行くには、厳しい宇宙での環境を模擬した試験を行い、耐久性があること

を実証しなくてはならない。ロケット打上げ時に加わる振動、ロケット分離や衛星に搭載されている分離機構など分離時に加わる衝撃、宇宙環境に入ってから真空環境下での±150℃にもなる温度変化、宇宙空間を飛び交う宇宙放射線など、これらの地上とは異なった環境を模擬した試験を行う。また、宇宙に飛び立ってしまうと、修理することができないというのも重要な項目である。

3.1. 放射線試験

宇宙放射線の影響としては、ガンマ線による長期劣化と、粒子線（重粒子，高エネルギー粒子）による瞬間的なダメージの二つがある。前者ではレンズのガラスが黄色く変色するブラウニング現象が認められたため、レンズ前面に石英ガラスを配置し、放射線による劣化のない石英に吸収させる手法をとった。電子装置部は月軌道1年間分のガンマ線照射を行い問題がないことを確認した。後者の粒子線では、粒子の種類やエネルギーによって挙動は異なるが、CCD撮像素子では白キズ(画素欠陥)が多数発生することが予想された。対策として地上側の画像処理により映像を補正する新たな装置を開発した。また、LSI等に論理反転現象が生じるため、カメラのメインソフトウェアの二重化とバンク切替え、制御データの三重化と多数決判定処理とした。メモリ部に関しては論理反転が起こったとしても、映像は1フレーム分の欠損で済むので、対策は講じていない。

3.2. 熱真空試験

熱真空試験では、真空チャンバーの中で、深宇宙を見立てた液体窒素の円筒状シュラウド(隔壁)により、衛星の周回に相当する2時間周期で加熱と冷却を繰り返して動作試験を実施した。HDTVシステムはデータ量が多く、一方で衛星の伝送レートは低いため、連続撮影はできない。撮影時間はメモリー容量(1分間の映像データ分)によって決まり、全体としてはOFFの時間の方が長く、内部の温度はヒーターがなければマイナス側で平衡するため、HDTVカメラは2系統のヒーターを持っている。一つは衛星システムで制御するヒーター(サバイバルヒーター)である。これはHDTVシステムがOFFの状態でも温度を極端に低温にしないように保持するため、-4℃でON、+1℃でOFFとしている。もう一つはHDTV側で持つ機器ヒーターであり、このヒーターはサバイバルヒーターのバックアップ的な意味合いが強い。HDTVシステムの外側が黒色なのは、チャージアップを防止するカーボンコーティングがなされているためである。完成した搭載機(フライトモデル)は衛星と組合せた状態で、さらに各種の試験と他

の観測機器との相互干渉試験を実施し、問題がないことを確認した。

3.3. 振動試験

振動は、ロケットが大気圏を抜けるまでの80秒間、衛星への取り付け位置で16Gが加わる。地上での振動試験では、レンズがその重心位置に対して片側だけで支えている片持ち構造のために振幅を増幅させ、レンズエレメントが脱落、フィルタディスクの欠き切り部分でも、振幅の増加によってフィルタハウジングが破損した。そのため、色変換(CC)と濃度(ND)フィルタおよびレンズと絞りは、一体形状にして強度を高めた。フォーカスは無限遠とし、絞りはF5.6固定とした。

3.4. 衝撃試験

衝撃試験は、衛星をロケットから切り離す際に、ボルトを火薬で一瞬に焼き切る時に生じる衝撃を再現するものであるが、重量物が切り離されるため、低周波から高周波までの幅広い周波数を含んでいる。この試験は本来であれば、落下法を用いて試験を行うことが通常である。しかし、試験設備の関係からハンマー打撃法によって極短時間に1,000GをHDTVシステムに与えた。金属性のハンマーでは低周波成分が不足し、柔らかいハンマーでは高周波成分が不足することから、大型の木製ハンマー(掛谷)を用いて試験を実施し耐性を確認した。

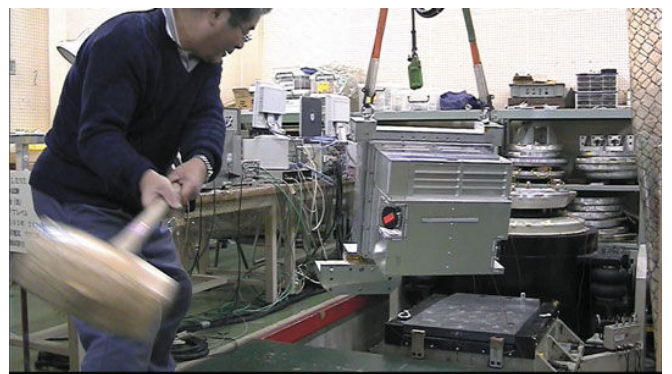


図4 打撃法による衝撃試験

4. 撮影までの計画立案

HDTVシステムでの撮影に際しては、コマンドシーケンスを立案しなくてはならない。具体的には何時何分何秒に、このコマンドを衛星からHDTVに発行しなさいという命令群である。この命令群なくしてはHDTVは動作しない。立案の方法は、まず、撮影したい日時の直近の軌道データ(衛星が通る軌道のデータ)、太陽方向情報ファイル(太陽の位置が示してあるデー

タ)、イベント時刻対応表(可視時刻などの衛星のイベントが記述されているファイル)をシミュレータに読み込ませ、撮影したい場所を決定する。次に撮影場所でのカメラの設定などのHDTVシステム内での設定を撮影開始時刻などを考慮しながら、コマンドシーケンスとして立案する。立案が完了したらシステム運用者にデータを渡し問題がないことを確認する。立案は衛星の昇交点通過時刻からの相対時間で記述をする。これは衛星の昇交点通過時刻がずれたとしても、衛星内で修正してくれるという利点がある。これに対して、絶対時刻で記述した場合は衛星の昇交点通過時刻がずれても、コマンド発行の時刻は修正されない。HDTVの場合、数十秒の誤差により、撮影したい場所をはずす恐れもあることから、相対時間による記述は有効である。

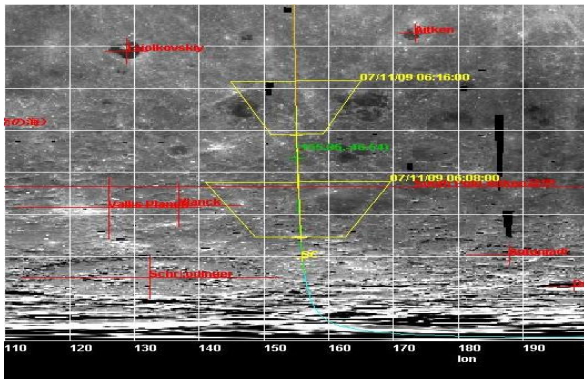


図5 実際の計画立案画面(月面撮影時)

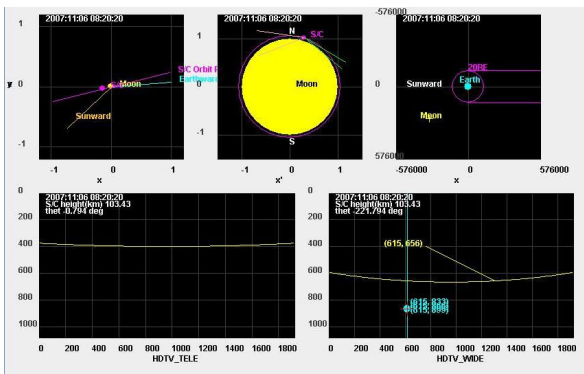


図6 実際の計画立案画面(地球撮影時)

5. HDTVシステムの詳細構造

HDTVシステムのデータは、1フレーム588パケット、1パケットのデータ長は1kバイトである。1分間の動画データは30フレーム×60秒=1,800フレーム分なので、 $588 \times 1,800 \times 1,000 = 1,058,400,000$ バイトである。HDTVはこのデータ量を保存できるだけの不揮発性メモリ(EEPROM)を搭載している。このデータを衛星に送信し、7.6Mbpsで約20分かけて地球に送られることとなる。データの中には地上でどのパケットが抜けたかが判別できるように、各パケットにはフレ

ーム番号、パケット番号が付加されている。

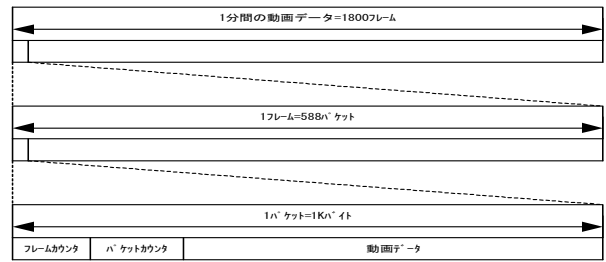


図7 HDTVのデータ構成

6. 打ち上げ後のHDTVの撮影ポイント

「かぐや」は、2007年9月14日に、種子島から、HIIAロケットにより打ち上げられた。9月29日には月軌道に向かう途中、地球から11万kmの距離から上弦の地球を撮影することに成功した。その後衛星は10月1日に高度約100kmの月周回観測軌道に投入された。HDTVカメラは、2007年11月7日に、「地球」が月の地平線の向こうからゆっくり昇ってくる様子をとらえることに成功した。月面の撮影では、短い時間の中で多くの地形を撮影したいという理由から、8倍のインタバル記録モードを使い広角レンズで撮影している。この場合1回の撮影で緯度にして約 24° の広い領域を移動した映像が得られる。月面を撮影する上では、太陽高度が非常に重要になってくる。太陽高度が高ければ、影のほとんどない映像になる。太陽高度が低ければ、陰影のついた映像になる。2008年4月6日には、太陽、衛星、月、地球が一直線上に並んだ。この現象は1年間に2回しかないチャンスで、「満地球の出」の撮影にも成功した。この時はゆっくり昇る地球を撮影するために標準の1倍モードにより望遠レンズで撮影した。2008年7月4日には、他の観測機器の校正運用に相乗りした形で撮影を行った。「かぐや」は通常、月心指向で姿勢を保っているため、HDTVシステムはいつも月の地平線を撮影することが可能である。しかし、この時は慣性指向での運用となる。したがって、HDTVシステムから見ると、画角全体が月面になるなど通常では得られない映像を取得することができた。



図9 2007年9月29日に撮影した上弦の地球

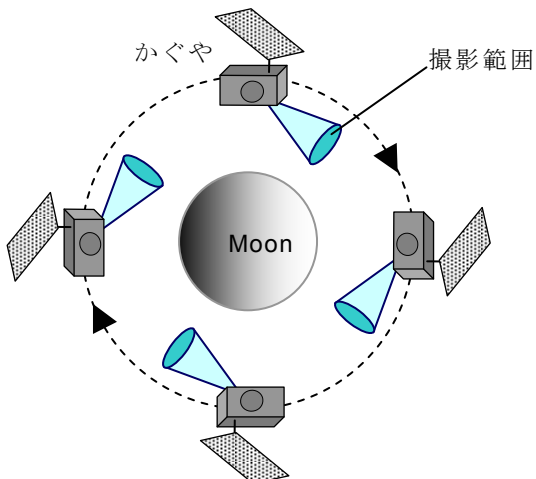


図 8 「かぐや」の定常運用での飛行状態



図 1 3 2008年7月4日に撮影した特殊運用時の画像



図 1 0 2008年4月6日に撮影した満地球



図 1 1 月面撮影の画像 (アリストアルコスクレータ)

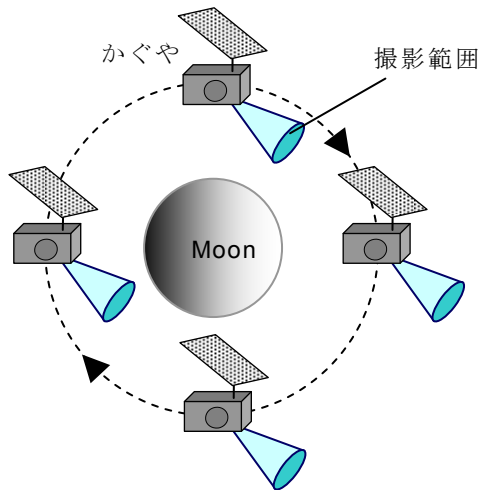


図 1 2 「かぐや」の特殊運用での飛行状態

7. HDTV の現状 (白傷評価)

HDTV システムの構成部品において、劣化が懸念されるものにカメラの撮像素子である CCD がある。劣化要因としては、太陽風によりプロトンが CCD に衝突することによりフォトダイオードに結晶欠陥が発生し、画像モニタに白傷として現れる。そこで、HDTV システムとしては、「かぐや」の放射線環境を考慮し、事前に CCD 等の放射線試験を行った。その結果、20,000 個/年の発生という非常に多いものであった。ただ、この条件としては、太陽活動がもっとも活発な時期を設定し、もっとも厳しい条件での予想結果である。

現在、HDTV システムは、2008 年 2 月から 1 回～2 回/月に白傷の評価画像の撮影を暗所 (月面が日陰) で行っている。白傷評価の画像取得時の設定は、Gain=+12dB, ShutterSpeed=1/63.3 固定である。

図 1 4 は HDTV システムの TELE 側のカメラで白傷評価画像を撮影したものを使用して、映像レベルの 43% (画像のブラックノイズの標準偏差の 3 倍) 以上のレベルの画素を白傷とした場合の撮影時の温度と白傷の個数を示したものである。これを見ると、打上げ前に解析した値と比べて、観測を開始してから約半年間、飛躍的に白傷の個数が増加している傾向はない。理由としては、解析条件がもっとも厳しい条件であったため、現状の環境 (太陽活動が最も静かな時期など) とはかなり異なっている結果と考えられる。

また、図 1 5 は温度と白傷の相関関係を示している。これは温度が高ければ、白傷の個数が多く見えるという相関関係を示している。

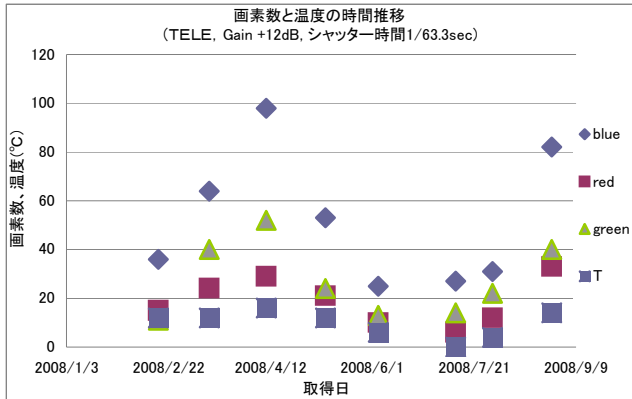


図 1 4 画素数と温度の時間推移

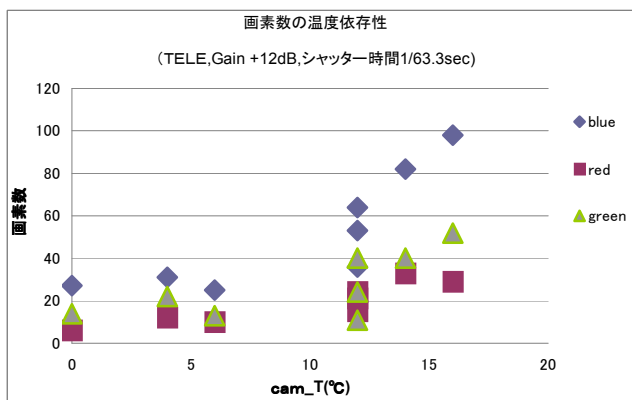


図 1 5 画素数の温度依存性

試験、運用を行えば、厳しい宇宙環境に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の宇宙搭載機器として技術的な可能性があることを示していると同時に次の技術的なステップとして、カメラ雲台・レンズズーム機構の実装、また、更なる高画質化が挙げられる。

8. HDTV の今後の撮影計画

HDTV システムの今後の撮影計画としては、9月30日に予定されている1年に2回のみの撮影チャンスである「満地球の出」を撮影することにある。4月6日に撮影した前回は、南半球からの出であったが、今回は北半球からの出になる。また、今までに地球を撮影した動画の中に日本列島を確認することはできていない。9月30日の撮影では日本列島も視野に入れた撮影を行うことが期待されている。HDTV システムでは、他の観測機器に迷惑をかけないという制約条件の下、地球への伝送が限られているため、月面の全球マップを作成することはできないが、12月から1月にかけては、太陽高度が低く、月面を撮影するには陰影がはっきりした魅力的な映像を可能な限り取得する予定である。

9. まとめ

今回、ハイビジョンカメラが38万 km 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、アポロ計画以来の月から見た地球の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環境