

フライ・ツー・ザ・ムーン・アゲイン

～月への宇宙開発新時代と通信～



着陸船イーグル号から月面に降りるアポロ宇宙飛行士



2024年 9月

A2A研究所 田代 務

目次

1 1960年代の宇宙開発競争

アポロ11号	3
米ソによる宇宙開発競争	4
月面撮影に使用されたTVカメラ	5
映画「フライ・ミー・トゥー・ザ・ムーン」	6
アポロ11号月着陸のTV中継	7
当時の通信やテレメトリ等の方式	8
70年大阪万博での宇宙関連展示	9

2 月の歴史と環境

月の起源	10
月の昼夜や地球での潮の干満	11
百人一首に詠まれた月	12
月から見た地球	13
月の表と裏の2分性	14
月面環境（重力や温度）	15
レゴリス	16
レゴリスの利用	17

3 月探査の新時代

月探査ミッションの歴史-1/2	18
月探査ミッションの歴史-2/2	19
日本のSERENE「かぐや」	20
日本の小型月着陸実証機「SLIM」	21
月面基地の候補地	22
米国アルテミス計画	23
アルテミスII号	24
アルテミス計画での通信リンク	25
アルテミス計画での使用周波数	26

6億人が同時視聴した人類初の月面歩行

1969年7月21日、アポロ11号の月着陸船イーグル号からアームストロング船長とオールドリン操縦士の二人が人類で初めて月面に降り立った。

その時、アームストロング船長が発した次の言葉はあまりにも有名である。

「一人の人間にとっては小さな一歩だが、人類にとっては偉大な飛躍である。」

That's one small step for [a] man, one giant leap for mankind.

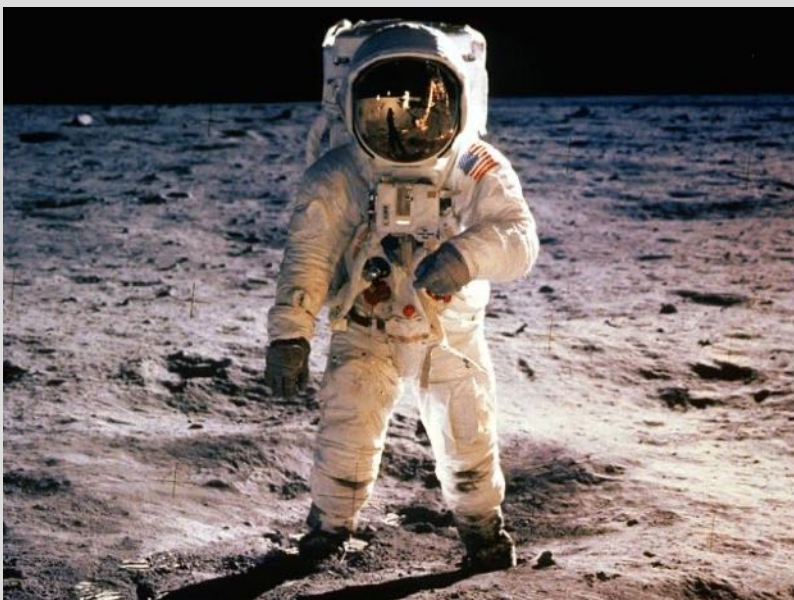
その瞬間の映像は世界中でリアルタイムにTV放送された。

日本は昼時であったので街頭テレビが黒山の人だかりとなり、NHK(及び民放)TVの視聴率は68%を記録した。全世界では5人に1人にあたる約6億人もが同時視聴したらしい。

二人は月面で21時間余りを過ごした後、コリンズ操縦士ひとりが月周回軌道上で待つ司令船コロンビア号に合流した。その後、三人が乗った司令船は無事地球に帰還する。

アポロ宇宙船は司令船(CM: Command Module)のほか、推進系や電力、水、酸素等を供給する機械船(SM: Service Module)、月着陸船(LM: Lunar Module)の3つのモジュールで構成されていた。

月着陸船から降りる宇宙飛行士



機械船 (SM) 司令船 (CM)



月着陸船 (LM)

月面に降り立った宇宙飛行士のゴーグルには撮影者自身の姿が鮮明に写っている。



1. 1960年代の宇宙開発競争

米ソによる宇宙開発競争

冷戦下での国際的イメージ向上に寄与

1961年、のちに「地球は青かった」との名言を残す宇宙飛行士ユーリー・ガガーリンが乗った人類初の有人地球周回宇宙船ボストーク1号の成功は全世界、特に米国に衝撃を与えた。

米国ケネディ大統領は1961年の連邦議会演説にて、「1960年代中に、月面に宇宙飛行士を立たせ、無事帰還させる」との計画を発表する。

以後、冷戦下で対立する米ソは1960年代を通じて熾烈な宇宙開発競争を繰り広げた。

とはいえ地球周回の有人飛行から複数宇宙船の同時飛行(ランデブー)に至るまで、前半戦は常にソ連が先行する。

一方、米国は有人月面着陸までの段階的なアポロ計画を発表するが、その1号機は地上試験時の爆発で3名の宇宙飛行士が死亡する悲劇に見舞われる。

しかし、技術力や資本力に勝る米国は以後の飛行を逐次成功させることでソ連を追い抜き、更に引き離していく。この間にはソ連の宇宙開発を率いた天才科学者コロリョフの死去もあったが、米国の組織力資金力には到底太刀打ちできなかつたかと思われる。

1969年7月、アポロ11号の月着陸船から2名の宇宙飛行士が月面に降り立った後、無事帰還し米国の夢は見事に実現する。しかし、それを公約したケネディ自身は1963年に凶弾に倒れ既に故人となっていた。

米ソの宇宙開発競争の歴史

ソ連		米国	
1957	スプートニク2号がライカ犬を乗せ地球周回	1958	有人宇宙飛行計画(マーキュリー計画)開始
1961	ボストーク1号でガガーリンが 人類初の地球周回	1961	ケネディ大統領が連邦議会で10年以内に月面に人を送る公約を発表
1962	ボストーク3号、4号を同時打ち上げ後、両機での ランデブー実施	1962	フレンドシップ7でグレンが米人初の地球周回
1963	ボストーク6号でテレシコワが 女性初の宇宙飛行士 に	1962-66	ジェミニ計画 で合計12機にて月着陸までの技術を開発・確立
1964	ボスポート2号で 人類初の宇宙遊泳 を実施 月着陸ミッションのソユーズL3計画に着手	1966-67	月面着陸に向けた一連の飛行計画(アポロ計画)を発表、アポロ1号機の地上爆発事故
1966	月着陸計画推進者コロリョフの死去	1967-68	アポロ4,5,6号で無人試験飛行 アポロ7号で最初の有人飛行
1967	最初のソユーズ宇宙船であるソユーズ1号で死亡事故があり失敗	1968	8-10号をサターンVで打上げ、3人乗り宇宙船が地球周回
1969	月旅行計画の飛行士選抜や月着陸船建造を行うも、N1ロケット打ち上げが失敗 その後、有人月着陸計画は中止に	1969	アポロ11号が 人類初の月面着陸
		1970	アポロ13号は月に向かう軌道上で酸素タンク爆発事故起こすが、無事に地球に帰還
		1972	アポロ17号が最後の有人月面着陸

1960年代を通して2大強国米ソによる激しい宇宙開発競争が繰り広げられた。

超軽量の特殊方式カメラを使用

アポロ11号宇宙飛行士が月面にて撮影した映像は、1930年代に英国で発明された特殊方式のカメラによって撮影されたものだった。

1964年の東京五輪以来、国際間の衛星中継ではカラー映像伝送(注)が珍しくなくなっていたが、当時の高信頼カラーTVカメラは大型で重量は約100kgもあったのでアポロ11号の月面での使用は難しかった。

しかし、リアルタイムのTV伝送には絶大な効果があることから、超軽量(約3kg)のTVカメラとともに、これに対応する信号処理と伝送方式が新規開発された。

月面に降りた宇宙飛行士が使用したこのTVカメラ(Westinghouse製)には機械的に回転する3原色フィルターとモノクロ撮像管が内蔵されており、3原色フィルターを通過した各色輝度信号が同期信号とともに地球に伝送された。(フィールド順次方式と呼称される)

その際の毎秒10フレーム、走査線数320本というパラメータは、月面と地球地上局間という極めて厳しい条件下にある伝送路での信号伝送を可能にすることも役立った。

(注) 当時の衛星中継TV放送はアナログの映像信号(NTSCまたはPAL方式)をFM変調して伝送していた。

アポロ11号飛行士が月面で使用したTVカメラの試作機



アポロ11号飛行士が月面で使用したMark V field sequential 方式TVカメラの試作機
(スコットランド国立博物館サイトより)

低速フレームで低解像度の映像は遠い宇宙から送られていることを強く印象づけた。

どこまでリアルか、フェイクか

2024年7月に全国映画館で公開された「フライ・ミー・トゥ・ザ・ムーン」は粋なラブストーリーに加え、月面着陸映像はフェイクだったかとの都市伝説を彷彿とさせる楽しい映画だった。その中には次のような本物のフィルムも多数登場する。

- ・アポロ11号打ち上げ
- ・月着陸船の着陸時の様子（帰還燃料が少なくなる中で着陸地点を探す場面）
- ・ニクソン大統領と宇宙飛行士による電話
- ・CBSニュースアンカーマンのウォルター・クロンカイトによる月面着陸のニュース

失敗続きのNASAに加え国民の月への関心が薄れる中で、敏腕PRマーケターのケリー（スカーレット・ヨハンソン演）は、偽の宇宙飛行士をメディアCMに登場させて大胆なイメージ戦略を仕掛けるとともに、NASA予算拡大に批判的な国会議員へのロビイングにも協力する。

一方、大統領側近は対ソ連や世論を考慮して着陸断念（又は実況放映不能？）時にはリアル映像を差替えるフェイク映像を作るようケリーに命じ、模擬月面と着陸船を用いて撮影させる。

果たして、全世界に放映された月面映像はそのフェイク版だったのか……

打ち上げ現場責任者（チャニング・テイタム演）とケリーとのラブストーリーは作り話だろうが、

フライ・ミー・トゥ・ザ・ムーン



2024.7.19 公開映画ポスター



ニクソン大統領がアームストロング船長に祝意の電話。世界中のテレビに2分割の画面が映し出された。
NASA/AFP より



「7月21日、スピードマスターはムーンウォッチとなった」
オメガ社サイトより

プロジェクトを宣伝するため、実際にテレビやメディアを通じた関連商品CMが多数流れた。



1. 1960年代の宇宙開発競争

アポロ11号月面着陸のTV中継ルート

その時、日本は丁度お昼時だった

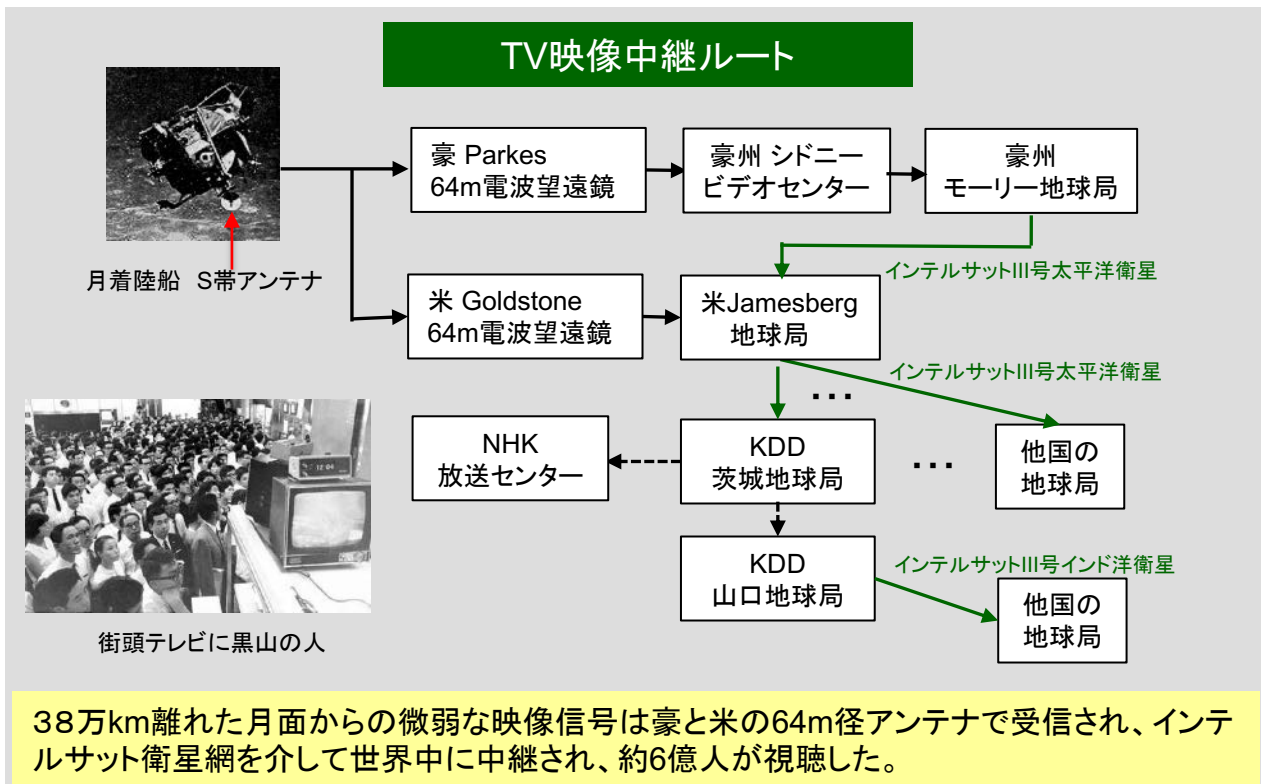
1969年7月21日午前11時56分(日本時間)、人類が初めて月面に降り立つアポロ11号宇宙飛行士の映像はリアルタイムで世界中に放送され、NHK(及び民放)TVの視聴率は68%を記録した。昼時だったことから、街頭テレビが黒山の人だかりとなる。これに先駆け日本家電メーカーは、「月面着陸をカラーで観よう」と宣伝していた。

当時、NASAは月からのTV信号受信局として米国Goldstone、スペインMadrid、豪州Parkesの3つを有していた。

7月21日の月面着陸時、月着陸船や司令船からのS帯(2282.5MHz又は2287.5MHz)の映像信号は豪州Parkesと米国Goldstoneの両局の直径64mアンテナで受信後、下図の経路で全世界に伝送される。

月着陸船からの信号は豪Parkes, 米Goldstoneの2局で受信された後、標準方式の映像信号(525本/フレーム、30フレーム/秒)に変換され、太平洋上のインテルサットIII号衛星経由でKDD茨城衛星通信所などの各国地球局に配信された。

当時インテルサット大西洋衛星が故障中であったため、茨城衛星通信所→KDD山口衛星通信所→インド洋衛星の経路で欧州各国へのTV中継が行われた。



38万km離れた月面からの微弱な映像信号は豪と米の64m径アンテナで受信され、インテルサット衛星網を介して世界中に中継され、約6億人が視聴した。

S帯に統一された各種信号をFMまたはPMで変調

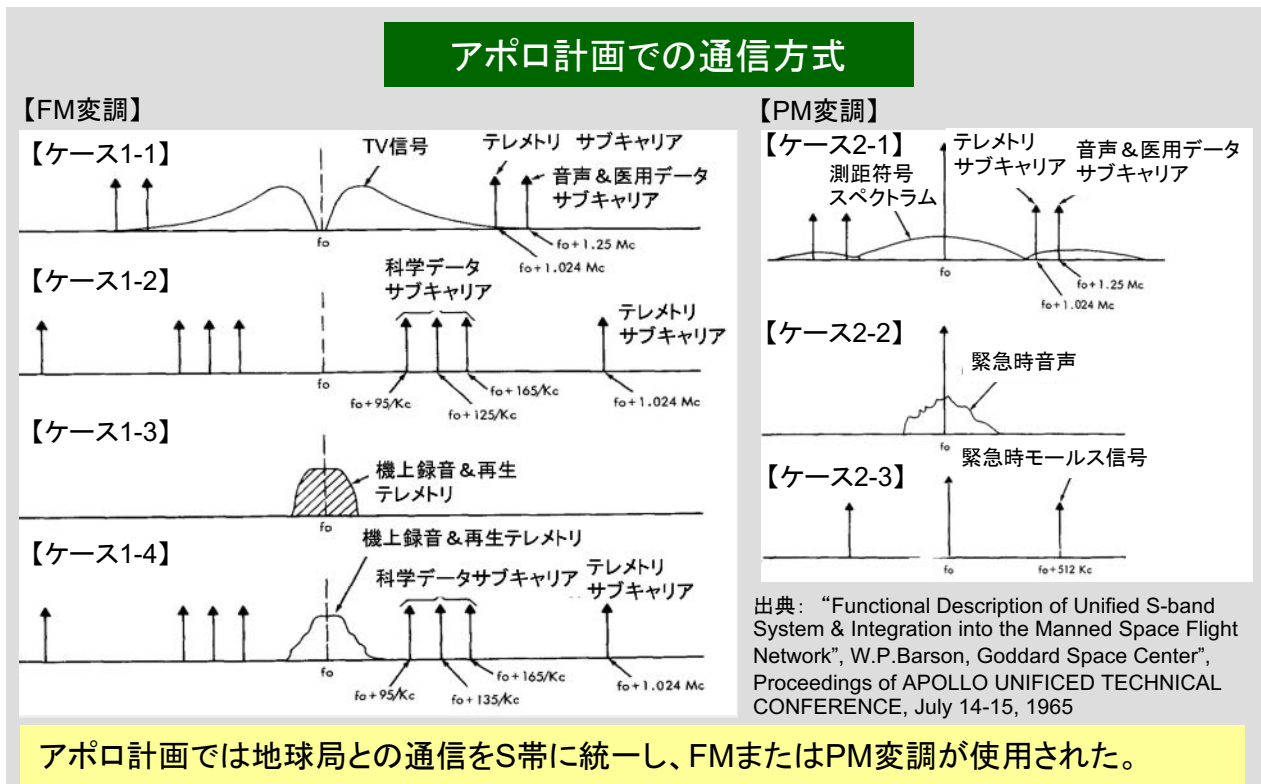
アポロ司令船(CM)から地球へのダウンリンク信号には、テレビ信号のほか、音声、医用データ、テレメータ信号、測距信号、緊急時音声とモールス信号があった。また、月着陸船(LM)からの音声及び医用データもCM経由で地球に送信できた。

これらの多くの信号全てを同時には送信できないので、必要な都度、所要信号を組み合わせたモードに切り替えて送信した。

アポロ計画以前、その信号伝送にはVHF, UHF, S帯が用いられていた。アポロ計画では、多種多様の無線機器の開発や運用を効率化するため、ごく一部を除いて宇宙船/月着陸船と地球局間の殆ど全ての通信をS帯(2GHz帯)に統一した。

下図はアポロ計画での典型的な(宇宙から地上への)ダウンリンク信号スペクトラムであり、例えばケース1-1ではモノクロテレビ信号にテレメトリ信号、音声及び医用データを周波数多重した後、S帯搬送波(周波数 f_0)を周波数変調している。

一方、これとは別にケース2では測距(レンジング)や緊急時の音声やモールス信号の伝送用に位相変調方式が用いられた。



米国とソ連の展示館では大変な人気を集めた

アポロ11号宇宙飛行士の月面着陸成功の興奮が冷めやらぬ翌年の1970年に開催された大阪万博では宇宙開発関係の展示に人気が集まった。

米国館では、アポロ月着陸船、司令船に加え、宇宙飛行士が月面から持ち帰った「月の石」の展示に長蛇の行列ができた。

一方、ソ連館ではソユーズ・ロケットや人工衛星の実物のほか、人類初の宇宙飛行士となったガガーリンの肖像写真が展示され、米国館同様、ソ連館は入場に数時間を要する人気館となった。

2025年の大阪・関西万博でも、宇宙開発関係の各国展示が注目されるだろう。

米国は、1970年の大阪万博で大人気だった「月の石」を再び展示する構想があるらしい。また、日本のJAXAはピンポイントに探査機を着地させる着陸技術や火星探査衛星「MMX計画」などの出展を検討しているようだ。

1970年 大阪万博での宇宙開発関係展示



【左：米国館】
司令船、月着陸船
月の石

【右：ソ連館】
ソユーズロケット
ガガーリンの写真



1970年の大阪万博では米ソ両国の展示館にて、宇宙関係の展示が人気を集めた。

4つの説があるが、いずれも決め手に欠ける

地球の衛星の月はどのようにできたのか。お隣さんだが実はよく分かっていないらしい。なぜなら月の起源説は次の全てを十分合理的に説明できる必要があるからだ。

- ・月は、木星や土星など衛星を有する他の太陽系惑星の衛星と比較して格段に大きいこと。
- ・地球と月の公転面や赤道面は皆バラバラであること。
- ・地球と月の主な元素組成は相当異なっていること。

現在までに有力な説明には兄弟説(共成長説)、他人説(捕獲説)、親子説(分裂説)の3つのほか、最近になって提唱されたジャイアント・インパクト説の計4つがある。

兄弟説(共成長説)は、地球と月が原始太陽系で二重惑星のように同時成長したとする。他人説(捕獲説)は、起源が無関係な月が偶然地球近くを通った際に地球に捕まったとする。親子説(分裂説)は、月が地球の遠心力で分裂したとするものである。ジャイアント・インパクト説は、月が惑星規模の大衝突で生じた破片からできたとするものである。

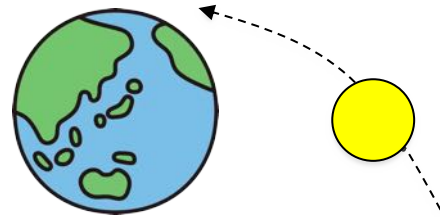
進行中の各種観測や探査から、月の内部構造(核やマントル)や土壌での組成等が詳しく解明される頃には、月の起源が確定するかもしれない。

4つの月の起源説

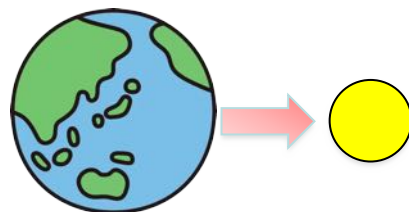
【兄弟説】 地球誕生時に一緒に生成



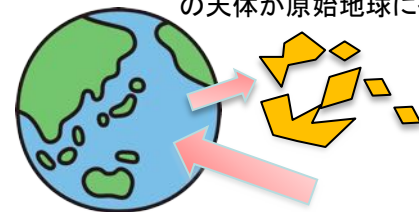
【他人説】 偶然、近くを通った月を捕獲



【親子説】 地球遠心力で分裂



【ジャイアント・インパクト説】火星サイズの天体が原始地球に衝突



探査技術の深化により月の内部構造や物質組成の研究が進み、起源が解明されるかも。

月の自転周期と公転周期が一致しているため月の裏側は常に見えない

月の自転と公転の周期は同一のため、常に地球に同じ半球を見せており裏側は全く見えない。大昔、月の自転速度は今より速かったが、地球の引力の影響で次第に遅くなり、公転周期と一致する速度が安定点となった。月の重心は物体中心よりも地球方向に少しズレているため、「起き上がりこぼし」のような効果が働いたようだ。

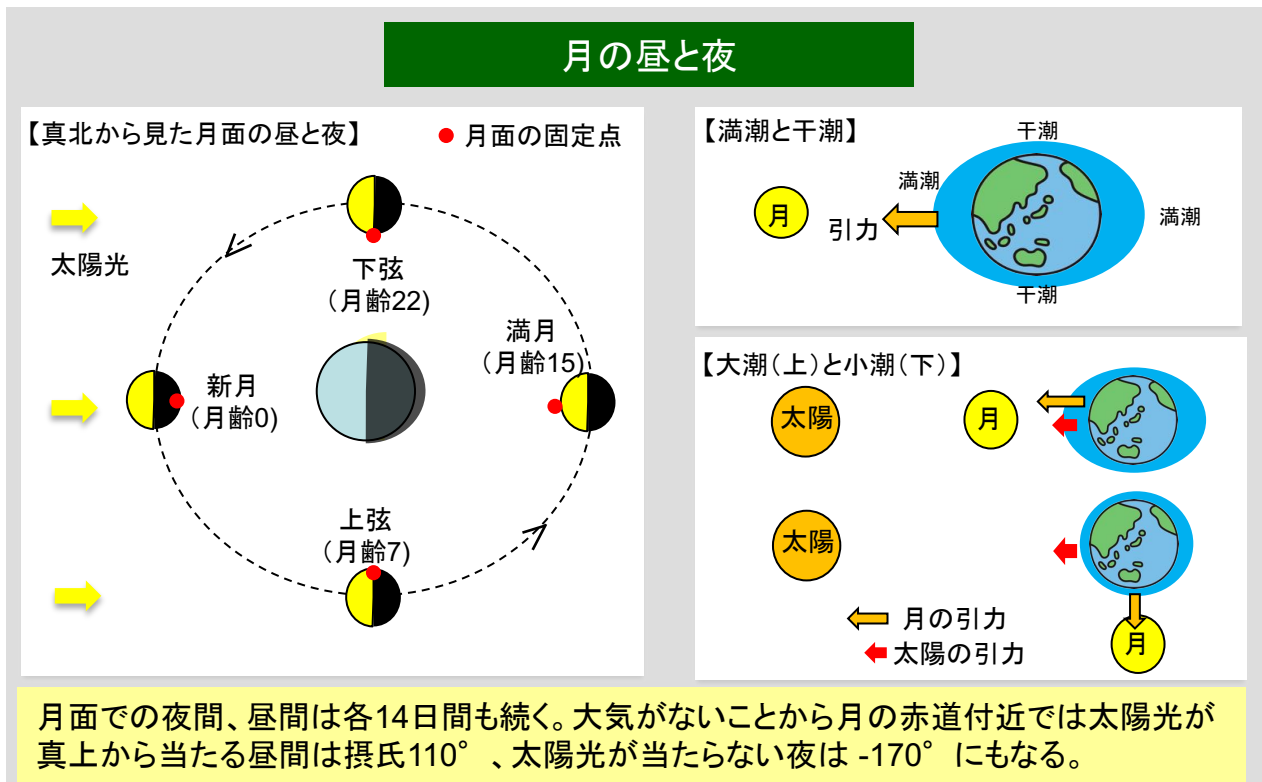
そこで地球を公転する都度、月面では下図のように昼間と夜間が各14日間も連続する。一方、地球から見る月は、月の公転面(白道面)が地球の公転面(黄道面)と僅か 5.1° の差であるため、毎日、太陽の軌道にほぼ沿って移動している。

月の公転と地球の自転によって地球、月、太陽の位置関係が変化することで、地球の海洋(海水)が受ける引力が変化するため地球上では潮位の時間変化、日変化が生じる。

地球自転により月に正対する時刻とその半日後には、海水は月の引力で満潮になる。一方、その中間時刻は月の引力が相殺されるため干潮になる。

月の公転により太陽、月、地球が一直線上に並ぶ時点では太陽と月からの引力が互いに強められ潮位は最大となる。(大潮)

一方、その中間時刻では月と太陽の引力が弱めあう。(小潮)



古来、月は身近で大きな存在だった

小倉百人一首には月を詠んだ和歌が11首もある。

天の原 ふりさけみれば 春日なる 三笠の山に いでし月かも (阿部仲麻呂)
 月みれば 千々にものこそ 悲しけれ 我が身ひとつの 秋にはあらねど (大江千里)
 夏の夜は まだ宵ながら 明けぬるを 雲のいづこに 月宿るらむ (清原深養父)
 やすらはで 寝なましものを 小夜更けて かたぶくまでの 月を見しかな (赤染衛門)
 秋風に たなびく雲の 絶え間より もれ出づる月の 影のさやけき (左京大夫顕輔)
 嘆けとて 月やはものを 思はする かこち顔なる わが涙かな (西行法師)
 めぐり逢いて 見しやそれとも わかぬまに 雲がくれにし 夜半の月かな (紫式部)
 心にも あらで憂き世に ながらえば 恋しかるべき 夜半の月かな (三条院)
 今来むと いひしばかりに 長月の 有明の月を 待ち出でつるかな (素性法師)
 朝ぼらけ 有明の月と 見るまでに 吉野の里に 降れる白雪 (坂上是則)
 ほととぎす 鳴きつる方を 眺むれば ただ有明の 月ぞ残れる (左大臣後徳大寺)

月の満ち欠けを基準とする太陰暦に従って農作業や祭事などを行っていた頃、夜空に煌々と輝く月は、今よりずっと身近な存在だったろう。

阿部仲麻呂と紫式部の歌



留学生として唐に渡り玄宗皇帝に使え、李白や王維ら著名人と交流があったと伝えられる仲麻呂が故郷を偲んで詠んだ歌



式部が古い友人に宛てて詠んだもの。久しぶりの再会だったのに、ゆっくり話す時間もなく過ぎてしまった心残りを夜半の月にたとえた

夜空に煌々と輝く月は月齢を基準に日々を暮らす人々にとって身近な存在だったろう。

月面の定点から地球は常に同じ位置に見える

月から地球はどのように見えるだろうか。

月は常に地球に表側を向けているので、月の表側の1地点から空を見ると地球は常に同じ位置に見えることになる。

そこで、例えば月の表側の赤道の中心付近にいるとすると、地球は天頂、すなわち頭の真上に見えることになる。

また、月の極付近からは月の地平線すれすれの低い仰角位置に常時見えるはずである。

1968年にアポロ8号搭乗者が撮影した写真は月面とは対照的な美しい地球を撮したことで「地球の出」と名づけられ、史上最も影響力のある環境写真として知られるようになった。

また、2008年には日本の月周回衛星「かぐや」が初めてハイビジョンカメラで「満地球の出」の動画撮影に成功した。

つまり、これらは月を周回する宇宙船から月面越しに地球を見た時の撮影なので確かに宇宙船の移動に伴って地球が月面地平線から姿を現したわけである。

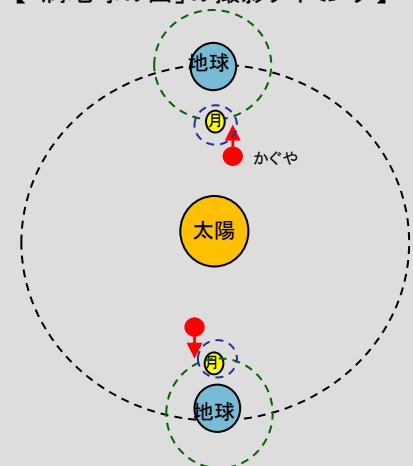
月面定点からは天空を移動する地球が見られるわけではないのである。

月周回衛星「かぐや」撮影の「満地球の出」



©JAXA/NHK

【「満地球の出」の撮影タイミング】



「満地球の出」の撮影タイミングは、月、地球、太陽と「かぐや」が一直線上に並ぶ年に2回しかない。

2008年に「かぐや」は世界で初めてハイビジョンカメラによる「満地球の出」を撮影した。

月の表面と裏面の様相は大きく異なっている

月の表側、裏側の地形は大きく異なっており、月の2分性と呼ばれている。

常時、地球から見える表側は比較的平坦で「海」と呼んでいる暗く見える領域がいくつかある。一方、地球からは見えない裏側には「海」は少なく、クレーターが非常に多い。

下図は、主にNASAの月探査機LROの広角カメラで撮影されたステレオ画像を元に作成されており、高度によって色分けされている。

表側で「うさぎ」のように見える青色で示された平坦で広い「海」は、実際はサラサラした熔岩（火山岩）で埋め尽くされている。熔岩は玄武岩（げんぶがん）でできている。平坦であるので、アポロ宇宙船の多くは「海」の領域に着陸している。

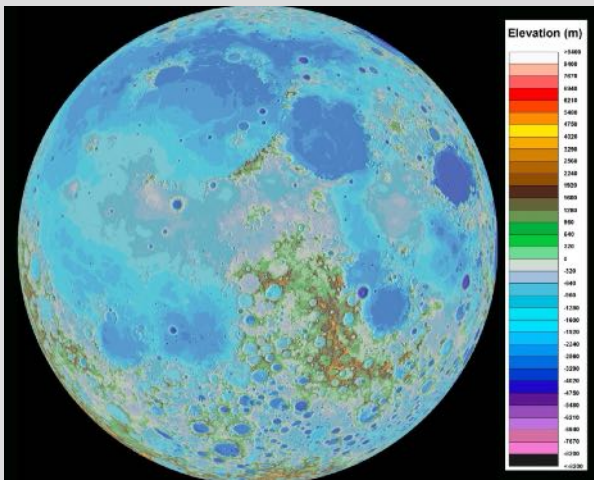
図の下側（南半球側）は比較的高地が多く、衝突クレーターがいくつもある。高地は主に斜長岩（しゃちょうがん）でできている。

一方、裏側には「海」がほとんどなく、クレーターや凸凹の多い地形となっている。

月の最高地点（平均高度+10.75km）と最低地点（平均高度-9.06km）は共に月の裏側にあり、しかも両者は近接している。南半球側には直径2500kmもの巨大な盆地があり、大昔に巨大な天体衝突によってできたクレーターと考えられている。

月の表と裏の代表色表示

【月の表】



【月の裏】

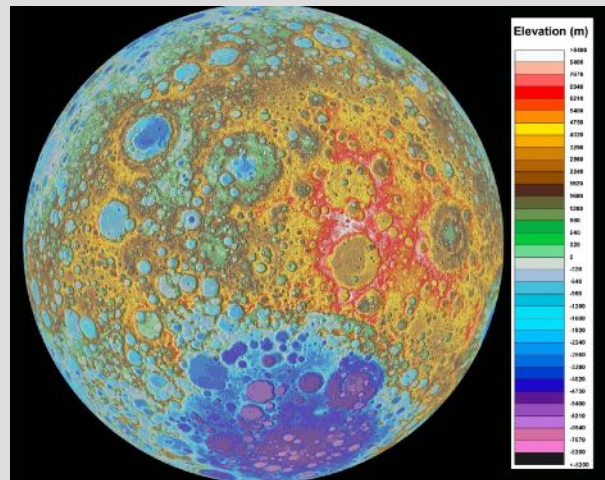


Image Credit: NASA/GSFC/DLR/Arizona State University

月の表側は平坦で暗い領域の「海」がいくつかあるが、裏側は凹凸が激しく平地が少ない。

月の重力は地球地上の約1/6で空気は殆どない。

月の直径は3,476km, 地球は12,742kmと約1/4である。例えば、サッカーボールの地球に対して、月はテニスボールほどになる。

また、月の質量は地球の約1/100である。

そこで、月面での重力は次の式から地球の16/100(約6分の1)になる。

距離 r にある質量 m , M 間の引力 F は定数 G を用いて $F=GMm/r^2$

そこで、 M の代わりに $M/100$, r の代わりに $r/4$ を上式に代入すると、 $F = 16/100 (GMm/r^2)$

重力が小さいことは月表面に空気がないことにもつながっている。地球上では空気中の分子が熱エネルギー(温度)に相当する速度で飛び回っているが、地球の重力によって地球表面に繋ぎ止められている。

一方、月面では重力が少ないため、大昔に月面に空気があったとしても留められずに宇宙空間に逃げてしまったようだ。

大気が殆どないため、昼夜の温度差が非常に大きい。(地球では対流圏が地上からの放射熱を保留させることで温度差を小さくしている。)

月の赤道付近では、昼は110°C、夜は-170°Cと、その差は200°C以上にもなる。

月面での物体落下実験

空気がないため、鳥の羽とハンマーは同時に地面に落ちることをアポロ15号のスコット船長が実験した。(右はその時の写真)



Photograph by Hulton Archive/Getty

ガリレオはピサの斜塔から重量の違う2球を落下させ、同時着地したことで「重い物は速く落ちる」との古典物理学を否定したとされる。



"How about that! This proves that Galileo was correct in his findings."
(D.R. Scott)

月面に空気がないことによって、月面での人間の活動に大きな支障が生じる。

尖っていて非常に細かい

月面の表層はレゴリスと呼ばれる細かい砂で覆われている。レゴリス(regolith)は岩石表面を覆う軟らかい堆地層の総称であるが、一般的には非常に細かく砕かれた砂や土のイメージがある。

月面のレゴリスは衝突によって基盤岩が砕かれ破片となって飛び散って生じたものである。地球の砂は風化や摩耗によって丸くなっているが、月のレゴリスは砕かれたままの尖った形状をしており、直径は10ミクロンから1ミリと非常に小さい。

月面には長年降り積もったレゴリスが層を作っている。レゴリス層は太陽光を多方向に散乱するので、地球から見る月は周辺部も明るい平面の円盤のように見える。

アポロ宇宙飛行士の足跡や月面車の車輪跡はレゴリス表層を押しつぶしてできている。レゴリスは小さく尖っていて摩擦が大きいのに加え、帯電性を帯びているため月面活動では非常に厄介である。

ローバーや機械の隙間に入り込んで故障を引き起こす可能性があるほか、宇宙飛行士が吸い込むと肺などに留まって病気の原因になるかもしれない。花粉症のようなくしゃみを引き起こすことがあり、アポロ17号では月面に降り立った全員が発症したとのことである。

月面のレゴリスによる効果



アポロ11号宇宙飛行士による足跡



月面を覆うレゴリスは太陽光を多方向に散乱するので月の周辺部も明るく見え、まるで「盆」のように見える。

レゴリスは非常に細かく尖っており帯電性もあるため機器故障や病気の原因にもなる。

建材や舗装材としての製造方法の検討が進んでいる

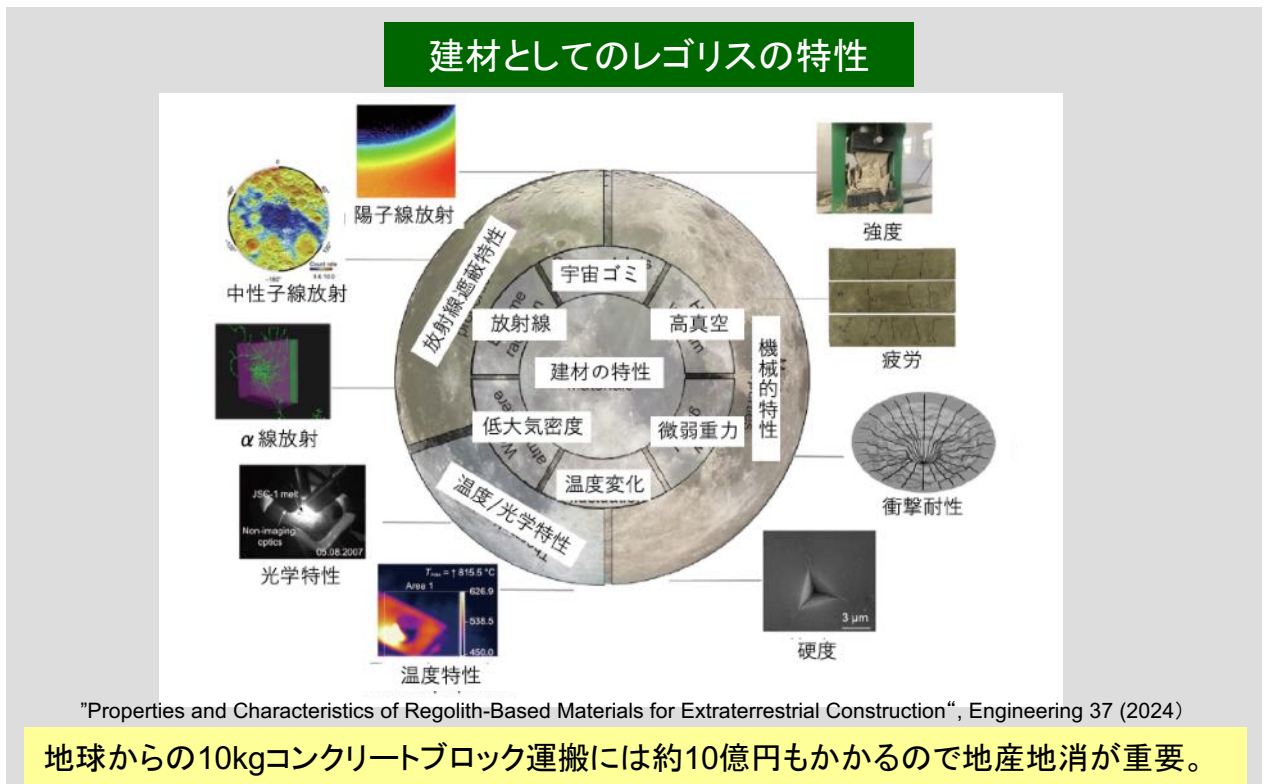
レゴリスは地産地消できる月面基地の建設材料として有望視されており、次のような用途や製造方法が検討されている。

- ・放射線の遮蔽材
- ・建設資材
- ・舗装材
- ・水の原料
- ・蓄熱材

大林組などは、レゴリスを原料としたセメントから製造するコンクリートや、レゴリスをレーザー光やマイクロ波を用いて高温で焼き固める方法などを検討している。居住施設用には隕石の衝突に耐えられる防護壁としての十分な強度を前提にしている。

ニチレキなどは誘導加熱によって月面レゴリスから舗装路面を製造する技術を開発している。

また、レゴリスには月面に吹きつける太陽風成分の水素やヘリウムが蓄積されている可能性があるため、重機で集め加熱すれば水の原料となる水素が分離できるかもしれない。





3.月面探査の新時代

月探査ミッションの歴史-1/2

1970年代までは米ソが牽引

最も近い星である月は、1950年代より数多くの衛星による次のような様々な観測や探査が行われてきた。当初は常にソ連が先行し、米国がこれに続いた。

- 1950年代 (宇宙開発黎明) 米国(Pioneerシリーズ)衛星による側方通過(フライバイ)やソ連(Lunaシリーズ)衛星による衝突実験
- 1960年代 (米ソの宇宙開発競争) 米国(Rangerシリーズ)、ソ連(Lunaシリーズ)による着陸や側方通過、米国(Lunar Orbiterシリーズ)は周回し月面を写真撮影
- 1970年代 (有人探査でのサンプル取得) 米国(Apolloシリーズ)は有人着陸で岩石等のサンプル持ち帰り、ソ連(Lunarシリーズ)は月周回やサンプル持ち帰り
- 1980年代 (停滞) 関係ミッションなし
- 1990年代 (ロボットによるサンプル取得) 日本(ひてん)はスイングバイとエアロブレーキを実施、「はごろも」を月周回軌道に投入、自身も月周回後に月面衝突
- 2000年代 (月面の国際化) 欧州、中国、インドの参入 日本(かぐや)が成功
- 2010年代 (探査の深化) 米国と中国による月の探査競争
- 2020年代 (月面に再注目) ARTEMIS-I (米)によるラグランジュ点での重力場の観測など Chandrayaan-3(インド)による月面南極付近への軟着陸、Chang's-6(中国)による月裏面からのサンプル取得など SLIM(日本)による軟着陸とローバー

成功した主な月探査衛星-1/2

各種資料を元に作成

衛星名	国	打上げ	種類	衛星名	国	打上げ	種類
Pioneer 4	米国	1959. 3	側方通過	Apollo 13	米国	1970. 4	着陸、撮影
Luna 2	ソ連	1959. 9	初の衝突	以後 14, 15, 16, 17			
Luna 3		1959. 10	初の裏側撮影	Luna 16 以後	ソ連	1970. 9	月周回、サンプル取得
Ranger 7	米国	1964. 7	衝突、撮影	17, 19, 20, 21, 22, 23, 24			
Luna 9	ソ連	1966. 1	初の着陸	Lunokhod 1, 以後2	ソ連	1970. 11	初の月面ローバー
Surveyor 1	米国	1966. 5	着陸、撮影	PFS-1, 以後 2	米国	1971. 7	月周回
以後, 3, 4, 5, 6, 7				1980年代 関係ミッション なし			
Lunar Orbiter 1	米国	1966. 8	月周回	MUSES-A (ひてん)	日本	1990. 1	周回、衝突
Luna 10	ソ連	1966. 6	初の月周回	Clementine	米国	1994. 1	月周回
以後11, 12, 13, 14				Lunar Prospector	米国	1998. 1	周回、衝突
Apollo 8	米	1966. 6	月周回、着陸				
以後10, 11, 12							
Zond 5, 以後6, 7	ソ連	1966. 6	側方通過				

1970年代までは米ソによる月周回、衝突、着陸による撮影やサンプル取得が行なわれた。



3. 月面探査の新時代

月探査ミッションの歴史-2/2

2000年代からは中国、日本、インドが加わり国際競争と協調時代に

特に2000年代に入ると欧州、中国、インド、日本が参入して国際化の時代を迎える。

日本は2007年に14種類もの観測機器を搭載した月周回衛星SELENE(日本名:かぐや)と、より高い楕円軌道を航行する2機の子衛星を成功させた。「かぐや」はハイビジョンカメラによる鮮明な「満地球の出」の写真撮影に成功する。

2023年にはSLIMが月面の狙った場所へのピンポイント着陸と超小型ローバー(LEV-1,LEV-2)の打ち出しに成功した。

中国は嫦娥(じょうが)シリーズ衛星による月探査を推進し、2024年の嫦娥6号では史上初めて月の裏側に着陸して岩石などのサンプルを持ち帰った。

インドは2023年に着陸船と探査車(ローバー)で構成されるチャンドラヤーン3号が月の南極付近に着陸後、帰還機の開発を想定して着陸船を数十センチの高さに飛び上がる実験やローバー走行を実験した。

一方、米国は2019年に2020年代中頃までに男女の宇宙飛行士を月に送るアルテミス計画を発表する。2022年の無人ミッションのアルテミス1号には合計10機の小型衛星を搭載し、月周辺の小惑星の探査、月の重力場や大気・塵の測定、ラグランジュ点での観測などを行った。

成功した主な月探査衛星-2/2

各種資料を元に作成

衛星名	国	打上げ月	種類	衛星名	国	打上げ月	種類
SMART-1	欧州	2003. 9	月周回, 着陸	Yutu 以後 2	中国	2013. 12	ローバー
ARTEMIS (THEMIS)	米国	2007. 2	ラグランジュ点での電磁計測等	Queqiao	中国	2018. 5	月周回、リレー衛星
SELENE (かぐや)	日本	2007. 9	周回、衝突	Danuri	韓国	2022. 8	月周回
Chang's-1 以後 2, 3, 4, 5	中国	2007. 10	周回、衝突	Artemis I	米国	2022. 11	側方通過 ラグランジュ点での観測等
Chandrayaan-1 以後, 2	インド	2008. 10	周回	Chandrayaan-3	インド	2023. 7	月南極に軟着陸
LRO	米国	2009. 6	周回	SLIM	日本	2023. 9	着陸、ローバー
LCROS	米国	2009. 6	衝突	IM-1	米国	2024. 2	着陸
GRAIL	米国	2011. 9	磁場計測	Chang's-6	中国	2024. 6	月裏面からサンプル取得
LADEE	米国	2013. 9	大気、塵計測				

2000年代以降は欧州、日本、中国、インドが月探査に加わり、米国はアルテミス計画を発表して観測内容は深化・多様化し、国際間の競争と協調の時代を迎える。



3. 月面探査の新時代

日本のSERENE「かぐや」

「かぐや」は初めて大型ロケットH-IIAで打ち上げられた科学衛星

2007年9月打上げの大型衛星「かぐや」には15種類もの観測ミッション機器が搭載されていた。

各ミッションには主任研究者の下で、研究者と技術者のチームが観測機器の設計・開発から機器の運用、観測データの処理・解析までの全作業を実施した。主な観測項目は次のとおり。

1. 元素分布の観測
蛍光X線とガンマ線の反射を分光測定することで発生源の元素の種類や量を測定。
2. 鉱物分布の観測
可視光や近赤外光を岩石に照射し、その反射光から吸収波長を調べて鉱物種類を特定。
3. 地形・表層構造
広い観測領域の高解像ステレオ画像を地形解析に最適な太陽光の照射条件下で撮影。
4. 環境
月面の磁気異常、月面放射α線、月周辺プラズマ、月の電離層、地球の磁気圏等を観測。
5. 月の重力分布
「おきな」「おうな」と共に地上間での測距信号ドップラー変動を計測し重力異常分布を計測。
6. 精細画像
(画角44°の広角と15°の望遠)カメラを使用して「満地球の出」などのHDTV映像を撮影。

「かぐや」の観測ミッション一覧

「最新・月の科学」、渡部潤一、NHKブックス”を元 to 作成

項目	観測機器	観測内容	項目	観測機器	観測内容
元素分布	蛍光X線分布	月面反射X線からAl, Si, Mg, Fe等の分布を調査	環境	月磁場観測装置	月面の磁気異常を調査
	ガンマ線分布	月面放射γ線からU, Th, K, H等の分布を調査		粒子線観測器	宇宙線、宇宙粒子線、月面から放射されるα線を観測
鉱物分布	マルチバンドイメージャ	9つの可視近赤外光帯から鉱物分布を調査		プラズマ観測装置	太陽風等による電子やイオンの分布を測定
	スペクトルプロファイラ	可視近赤外連続スペクトルから鉱物組成を調査		電波科学	「おうな」送信電波の位相変化から月電離層を観測
地形・表層構造	地形カメラ	高分解能(10m)ステレオ映像で地形データを取得	プラズマイメージャ	地球の磁気圏やプラズマ圏を観測	
	月レーダサウンダ	月面への電波反射から地下数kmまでの構造を調査	月の重力分布	おきな(リレー衛星)中継器	月裏側からの電波を地球に中継し、ドップラー計測で主衛星の軌道擾乱を観測
	レーザ高度計	月面へのレーザ光反射で高度を精密測定		衛星電波源	「おきな」「おうな」搭載のS, X帯電波源を用いて地球局で相対VLBI観測し、衛星軌道を精密計算。月重力場を精密観測
精細画像	高精度映像取得システム	地球と月をハイビジョン撮影			

過去の観測機器をほぼ網羅した「かぐや」はアポロ計画以来の大型プロジェクトであり、後の中国やインド等の月探査計画に大きな影響を与えた。

月着陸時はSLIM航行情報がリアルタイム中継された

2023年9月、JAXAは小型月着陸実証機(SLIM)を打ち上げ、2024年1月に日本初の月面軟着陸を誤差100mというピンポイントの精度で実行した。また、SLIMが月面に放出した変形型ロボット(LEV-2, 別名SORA-Q)は月面に逆さ立ちしたSLIMの画像を撮影・送信した。

ピンポイント着陸には「画像照合航法」と「自律的な航法誘導制御」の2つが使われた。画像照合航法は、探査機カメラで撮影した月面画像を月面地図と照らし合わせて一致する場所を特定することで現在位置を知る航法である。

しかし、地球と月は約38万kmも離れており往復通信時間は2.5秒にもなるため地上からの制御では間に合わない。そこで、SLIMは搭載装置内に記憶した詳細な月面地図との画像照合を自身が独立して行うことで瞬時に位置特定できるようにしている。

また、画像照合航法データとともに高度等の他センサーからの情報も参考にして軌道の修正を行う「自律的な航法誘導制御機能」も搭載している。更に着陸地点上空で障害物を検知した際は、これを回避して安全な場所を自ら判断できる。

SLIMの着陸時の映像は、1月19日の午後11時よりライブ配信されたため深夜であったが、全国(および世界?)の多数の視聴者が刻々変化する各種データをリアルタイムで確認できた。

小型月着陸実証機SLIM

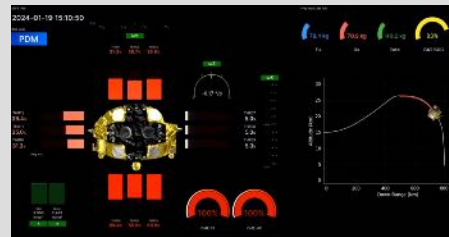
JAXAサイト等より



【上】 SLIMの外観

【右上】 LEV-2が撮影した月面画像

【右下】 リアルタイム配信されたSLIMデータ



JAXAのSLIMでは月面軟着陸時の各種データ(加速度、推進剤残量、計画軌道と実際軌道など)が刻々、リアルタイム配信された。

水の量や分布が鍵

米NASAは2022年8月、アルテミス計画での有人月面着陸候補地13カ所を発表した。

いずれも氷が存在する南極付近であり、山の上やクレーターの縁など多様な地形を含んでいる。候補地では飛行士の飲料水やロケット燃料などへの利用に向けて、水の量や分布を調査することが最大の目的となる。

これらの候補地は常に日陰になっていて寒いので氷があると考えられるのに加え、ソーラー発電に有利な日向に近いことも選定理由になっている。

また、地面の傾斜や地球との交信のしやすさも考慮されているとのこと。

月面基地の構造もいくつか考えられている。

下図は欧州ESAの構想であり、月面にて膨らますことのできるモジュールをロケットで運び、月面に設置後、月にある素材から3Dプリンタを用いて壁を作る。

この壁は宇宙放射線などから基地を保護する。

月面基地の候補



2022年にNASAが発表した
有人月面着陸候補地。
(四角で囲った部分)



ESAが発表した月面基地の概念図

水が氷の状態で保存されていると推定しており、飲料水、空気、燃料を作ることができる水の存在が鍵を握っている。

NASAはアポロ計画実施の経験を踏まえ、宇宙開発の次のステップを目論む

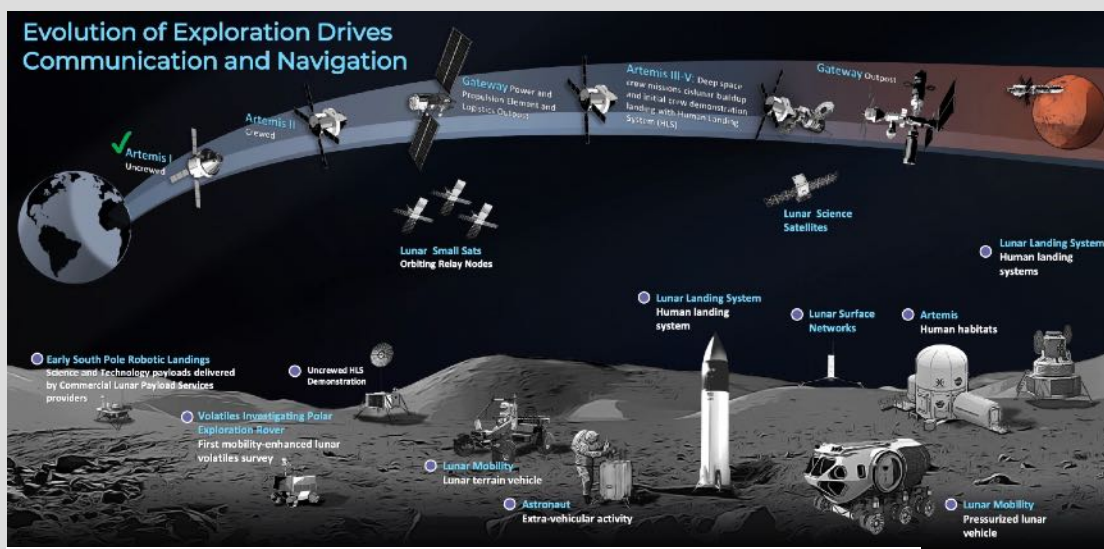
2019年5月、米国航空宇宙局(NASA: National Aeronautics and Space Administration)は、新たな有人宇宙飛行計画(アルテミス計画)を発表した。アルテミスはギリシア神話に登場する月の女神であり、アポロ計画の由来となった太陽神アポロンとは双子の関係にある。

2021年4月にNASAは月着陸船の開発・運用にスペースXを選定する。
2022年11月には無人のアルテミス1号をNASA開発のSLS(Space Launch System)により打ち上げた。SLSはスペースシャトルから派生した大型打ち上げロケットである。

当初計画では2024年までに、「最初の女性と、次の男性を」月の南極付近に着陸する目標だったが、その後、新型宇宙船開発に遅れが生じたため計画は遅延している。
2024年1月時点では、宇宙飛行士4名搭乗のアルテミス2号は2025年9月、3号は2026年9月としている。(初期ミッションクルー候補は男性9人、女性9人の計18人で全員米国人)
アルテミス3号は月南極付近に着陸後、着陸クルーは約1週間を月面に滞在予定とのこと。

アルテミス計画の遂行には、月のゲートウェイ建設支援、補給、各種観測機器やロボットの配備など多数のミッションが必要である。
そこで計画にはNASAとNASA契約の米国民間会社のほか、日本の宇宙航空研究開発機構(JAXA)、欧州宇宙機関(ESA)、カナダ宇宙庁(CSA)などがパートナー参加している。

アルテミス計画のビジョン



出典: "Lunar Communications and Navigation: Integrating Government, Commercial, and International Partner Solutions", R.Reinhart, NASA Space Comm. & Navi. Program, Global Satellite Serving Forum, 12 Oct 2023

月面調査や各種産業応用、更には火星探査に向けた基地の役割が期待される。

アルテミス計画での最初の有人飛行

2025年9月に打ち上げ目標のアルテミスII号には宇宙飛行士4名が搭乗する。そのうち3名は米国、1名はカナダ人であり、米国人のうち1名は女性である。

SLS (Space Launch System) ロケットにて打ち上げ後、先端部に取り付けた月宇宙船OrionのCM(司令船)とSM(機械船)は月に接近し、月を回った後に地球に戻る。地球対流圏に突入前にSMを切り離し、CMのみが地球に着水する。アルテミスII号は月面着陸する次のIII号に向けて各種航行試験を行うのが目的である。

次のアルテミスIII号では搭乗者4名のうち2名が月面の南極付近に着陸する予定である。残る2名は月を司令船Orionに留まり月を周回する。

月面に着陸するStarShipはSpaceXが製造しており、司令船Orionとは別に打ち上げられる。StarShipとOrionは軌道上で両者がドッキングして月に向かい、月周回軌道上で分離後にStarShipが月面着陸する計画である。2名の宇宙飛行士は月面に約1週間滞在する。

2024年6月時点でドッキングに関する地上試験が実施されている。アルテミスIII号ではStarShipによるドッキングや月面着陸など新規開発部分が多いため、打ち上げには相当の遅延が生ずるだろうとの懸念がある。

アルテミスII号



【搭乗予定の宇宙飛行士】 NASAサイトより

左から J.Hansen ミッションスペシャリスト
V.Glover パイロット
R.Wiseman 船長
C.Koch ミッションスペシャリスト

【アルテミスII号の予定軌道】

YouTube, 「Artemis Quarterly Update」より

- ①～④ SLSによる打ち上げ
- ⑥ 上段ロケット切り離し
- ⑪ 月接近
- ⑬ 着陸船切り離し



アルテミスII号には4名の宇宙飛行士(女性1名、男性3名)の搭乗が決まっている。

高速伝送用にX帯やKa帯の無線のほか光通信も利用する

米国NASAの通信と航行の統一プログラムであるSCaN (Space Communication and Navigation) は全NASA及びNASA外の機関が、地球周辺及び深宇宙の2つのネットワークを用いて月面探査や気候変動等に関わる各種のサービスを提供する。

初期のアルテミス計画では、地球、ゲートウェイ、月面などの相互間で次のような無線および光通信リンク経由で、4K映像伝送、機器の遠隔操作、宇宙飛行士の医療・健康・安全に関するデータ伝送を行う模様である。

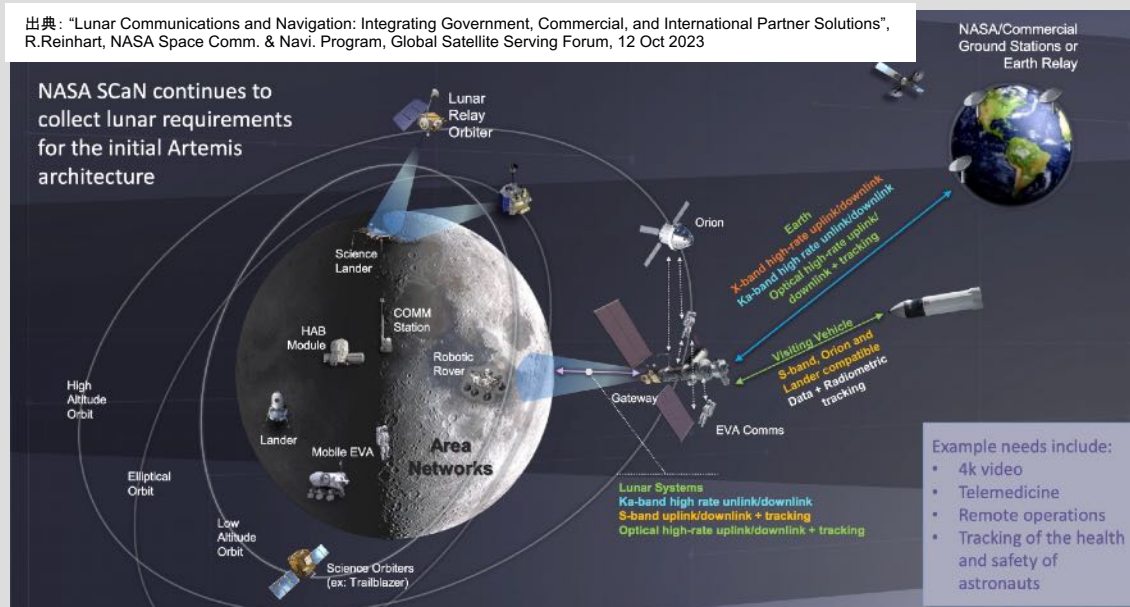
- ・ゲートウェイー地球間: X帯及びKa帯の高速回線用上下リンク、光通信リンク、追跡
- ・ゲートウェイー月面間: Ka帯の高速回線用上下リンク、光通信リンク、S帯上下リンク、追跡
- ・ゲートウェイー他の衛星間: S帯 (Orion, 着陸船規格準拠の) データ及び追跡

月面では次のシステムを構築する。

- ・3GPP準拠5G方式無線システムをARTEMIS V (5号機) のHLS, LTV, EVA間に導入を想定
- ・地球上GPSのような月面GPS (緯度経度は10m以内, 高度50m以内の精度) を導入
- ・光通信にて月と地球間に数Gbit/sの高速通信を提供。月面通信局は1m程度の大きさに。

NASAはこれらを統合運用する月面版インターネットとも言える LunaNet を構想している。

アルテミス計画で想定する通信リンク



月面からの通信やナビ方式等を規定するLunaNet仕様Ver.4は2022年に制定されている。

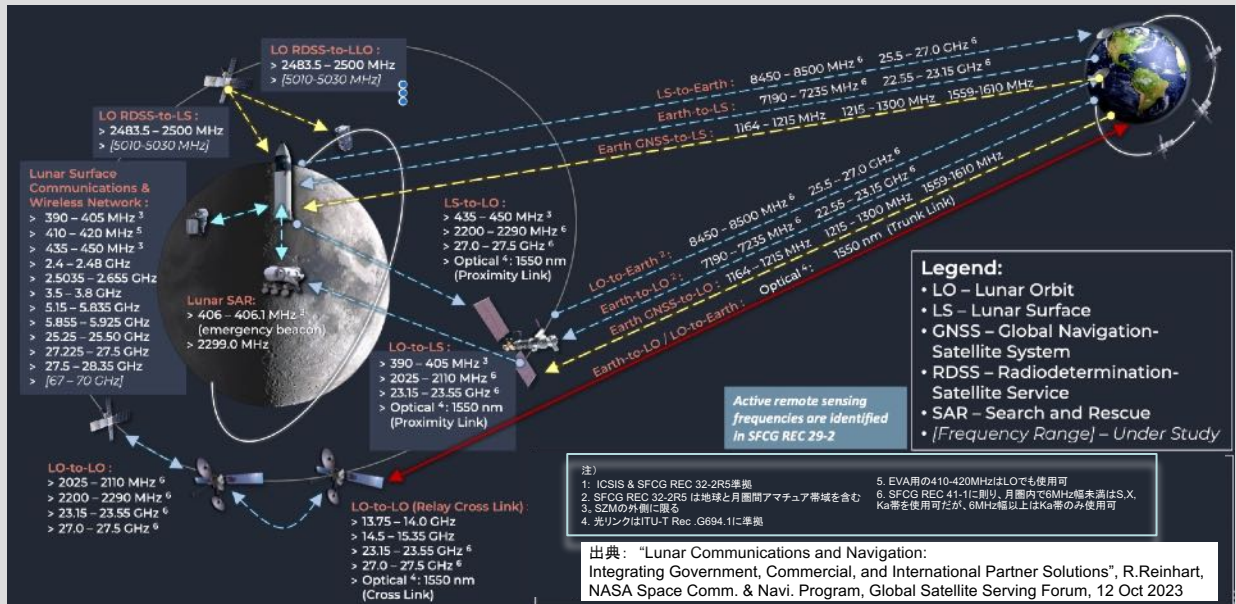
アルテミス計画で使用予定の通信・追跡用周波数は多岐にわたる

	周波数・光波長	Earth-LS	LO-Earth	LO-LS	LO-LO	LO-LO(Relay Cross Link)	Lunar SAR	LO RDSS - LLO	LO RDSS - LS	LS上
UHF帯	390-405MHz			→						≒
	406-406.1MHz						→ (緊急ビーコン)			
	410-420MHz									≒
	435-450MHz (S2Mの外側に限る)			←						≒
L, S帯	1164-1264MHz	Earth GNSS→LS	Earth GNSS→LS							
	1215-1300MHz	←	←							
	1559-1610MHz	←	←							
	2025-2110MHz			→	≒					
	2200-2290MHz			←	≒					
	2299.0MHz						→			
	2400-2480MHz									≒
	2483.5-2500MHz							→	→	
2503.5-2655MHz									≒	
C帯	3500-3800MHz									≒
	(5010-5030MHz) (研究中)							(→)	(→)	
X帯	5150-5835MHz									≒
	7190-7235MHz	←	←							
Ku帯	8450-8500MHz	→	→							
	13.75-14.0GHz					≒				
Ka帯	14.5-15.35GHz					≒				
	22.55-23.15GHz	←	←							
	23.15-23.55GHz			→	≒	≒				
	25.25-25.5GHz									≒
	25.5-27.0GHz	→	→							
	27.0-27.5GHz				≒	≒				
	27.225-27.50GHz									≒
27.50-28.35GHz									≒	
光	(67-70GHz) (研究中)									(≒)
	1550nm		≒	≒ (近接リンク)		≒ (クロスリンク)				

・LO: Lunar Orbit
 ・LS: Lunar Surface
 ・GNSS: Global Navigation Satellite System
 ・RDSS: Radiodetermination Satellite System
 ・SAR: Search and Rescue

月面探査に関わる通信の周波数

上表は下図を元に作成



UHF帯からKa帯の電波に加え、月-地球間的高速通信や月面活動に光通信を利用する。



【著者略歴】

田代 務

KDDIにて、衛星通信設備の設計や設備導入、研究開発計画の策定、人材育成、海外事業等に従事。ワシントン事務所長、KDDアメリカ副社長、IP事業企画部部長の後にKDDIを退職し、2003年に同僚と株式会社A2A研究所を設立。2023年の会社解散後も個人事業主として衛星通信やモバイル通信関係の調査や技術支援を行なっている。東大工学部電子工学修士修了。静岡県出身。

主な著書 「どこでもワーク、いつでもラーニング」、「携帯電話の仕組み」、「衛星通信のしくみ」など。
(以上、A2A研究所ウェブサイト www.a2a.jp にて公開中)