

小型衛星による月探査衛星の可能性：

今、月で新規性のある科学ミッションは可能か？

齋藤靖之, 高原卓也
東大理、総合研究大学院大学

要旨

本提案は小型衛星による LTP(Lunar Transient Phenomena) や月面衝突発光といった月観測ミッションの実現を検討するものである。近年、搭載機器の小型化や高効率化により小型衛星でも十分新規性のある観測ミッションが実現されている。現在のところその活動範囲は近地球に限られているが固体モータを搭載した 150kg 級衛星であればピギーバック方式による月軌道ミッションも可能であるとの検討がなされている。LTP 現象の記録は古く、16 世紀から報告されているが科学観測がほとんど行われてこなかった。近年になってようやく地上での観測体制が整えられつつある。月面での流星衝突発光はしし座流星体の衝突に伴うものが 1999 年 11 月に初めて観測され、2004 年 8 月に日本のグループ (一宮高校地学部、小川村天文台 etc.) によって初めてペルセウス座流星群に伴うものが観測された。しかし LTP や流星群による月面衝突発光といった“低頻度な現象の観測”は人工衛星による科学観測ミッションとして取り上げるにはリスクが高く、これまで積極的な観測が行われてこなかった。本提案はコスト的なリスクが低いピギーバック方式による小型衛星を用いることで、小型衛星の活動範囲を月軌道まで拡大させることと、低頻度な現象の観測を狙うものである。

1 Introduction

近年、1) 低価格・低リスク・短期開発で技術開発サイクルの短縮化、2) 高機能・大型衛星でなければ実現不可能なミッションがある一方、それほど機能的でなくても実現可能なミッションが存在すること、3) 宇宙というテーマ性、宇宙環境に対する信頼性や複雑な機器構成を構築するシステム開発の点で将来の技術者を育成する教育効果が期待されること等を背景に小型衛星が注目されている。しかしながら科学観測目的のものは多くない。

近年、搭載機器の小型化や効率化が発達し、打ち上げを控えた INDEX を含め、MOST[2] や Proba[3] のように小型衛星でも十分新規性のある本格的な科学観測ミッションが実現されている。現在のところその活動範囲は近地球に限られているが、INDEX2 号機の構想では固体モータを搭載した 150kg 級衛星であればピギーバック方式による月軌道ミッションも可能であるとの検討もなされている。[4]

150kg 級衛星のピギーバック打ち上げはリアンロケット [1] ではすでに実現されている他、H2A においても検討されており、2002 年の打ち上げでは 50kg 級小型衛星 3 機の同時ピギーバック打ち上げを実現していることから重量としても現実的である。

一方、月はこれまで多くの探査が行われており比較的観測データが豊富である。そこで本章冒頭で述べた 1) の利点を生かし、月の“低頻度な現象”に注目した。本提案では、A) 過去 500 年にわたって観測例があるにもかかわらず、その科学的な評価がほとんど行われてこなかった LTP 現象、B) 1999 年に初めて確認された、流星の超高速月面衝突発光現象について焦点を当てて、その観測提案を行うものである。観測対象とするにはリスクの高い“低頻度な現象”に焦点をあてるには小規模なミッションを低コスト・低リスクで実現可能である長所をもつ小型衛星という手段は適したプラットフォームであると考えている。

2 観測意義

1999 年以来、しし座流星群に伴うものが 20 個ほど観測されてきたが、2004 年 8 月に、一宮高校・地学部と小川村天文台のグループが初めてペルセウス座流星群に伴う月面衝突発光を観測した [6]。このことは、他の流星群でも月面流星衝突発光が起きていることを示唆するものと考えられる。

流星群は、その母彗星が形成したダストトレイルの軌道と地球軌道が交差して発生する。しかしダストトレイルが、どのようなサイズ分布、数密度のダストから構成されているのかこれまでの

地上観測ではわかっていない。また地上からの発光現象観測では地上の天気、月の位相、地球軌道とダストトレイルの軌道が交差する条件に依存する。月周回軌道上からの観測によって観測数が増加し、統計的な議論が可能となれば上述の議論が可能となる。

さらに地上での高速衝突実験によって、衝突に伴いマイクロ波放電が発生する [8]。少なくとも 300 MHz、2 GHz、22 GHz のマイクロ波が確認されており、周波数が高くなると信号強度が強くなる傾向が示唆されている [7]。しかしその物理メカニズムは明らかでない。地上衝突実験の最高速度は 10km/sec には届いておらず、地上実験では作り出せない超高速での衝突発光現象の観測は、高速衝突現象の物理を理解する上で興味深い。

月面発光現象 LTP(Lunar Transient Phenomena) は月表面が発光する現象の総称で、赤み、あるいは青みがかって見えることが報告されている。ここでは流星体の衝突発光を除いたものと定義する。LTP 現象の報告の記録は古く、16 世紀から 500 件以上報告されているが偶発的な現象であるため、科学的に議論されることが多くなかった。

Camerin (1972)[9] によって多くの過去の観測がまとめられた。LTP が起きる場所には特徴があり海と高地の境界付近で起こることが多いこと、火山性地形を示す地点に集中していることが報告された。たとえば LTP 全体の 60% は Aristarchos creater、Alphonsus creater など 7 地点に集中しており、特に全体の 30% が Aristarchos creater に集中している。このことから、何らかの内部構造に起因したメカニズムによって発生すると考えられる。Dollfus (2000) は月内部からのガス噴出によってレゴリス粒子が舞い上がり、太陽光が散乱するメカニズムを提唱している。このガスとして考えられるものに ^{222}Rn があげられる。 ^{222}Rn は ^{232}Th の放射壊変によって発生すること、 α 線分光観測から Aristarchos creater 付近で多くの ^{222}Rn が検出されていること [10]、Aristarchos creater 付近は実際 Th に富むことから月内部により Th に富んだ層が存在し、 ^{222}Rn が生成された可能性は高い。

一方、Kozyrev (1959)[5] は分光観測の結果、470 nm から短い波長にかけてバンドが見られることから、 C_2 スワンバンドであると報告している。この波長は可視光で青にあたることから、多くの肉眼観測結果とも一致する。しかし月リターンサンプルの元素分析結果からは、有機物は炭素はほとんど見つかっていない。したがって LTP の分光観測をきちんと行うことの意義は高い。

3 観測コンフィギュレーション

前章で述べた理由から、観測内容として 1) 発光の検出、2) 発光現象の分光観測、3) マイクロ波の検出、を行う。発光現象はその位置特定をする必要がある。およそそのクレーター位置を特定する必要性から空間分解能は 1 度 (30 km) 四方以上が要求される。分光観測は Kozyrev (1959) に基づき 470 nm 付近で行う。また赤みがかって観測される例もあることから 600-700 nm での分光もあわせて行う。高速度での衝突で、より高周波数帯での信号強度が強くなる傾向があることから地上実験で確認されている 2GHz、22GHz 周波数帯に加え、地上の電波観測との相補観測を期待して 43GHz の観測も行う。

高速衝突現象及び、LTP はカメラによる画像処理から現象の検出を行う。観測軌道はなるべく広視野を確保するためにも 100km からそれ以上を検討している。また制御の容易さ、燃料の節約等を考慮するとスピン制御が一般的に有利であるが、観測機器面を月面に向け続けることが出来ないために、衛星構体 Z 軸に対し垂直な方向に 360 度の視野を持つような観測機器構成とし、Z 軸にスピンさせることで常時監視を行う。また Z 軸は軌道方向に垂直とする。

観測機器としては 43GHz、22GHz、2GHz の各バンドに対応するアンテナ、バンドパスフィルタ、信号処理回路が搭載されるほか、CMOS カメラと分光器を搭載し、光学観測を行う。

各バンドのアンテナパターンはなるべく 180 度の視野で均等な利得を得られるよう設計するが、43GHz といった帯域はロスが大きくなることが予想されるため、アンテナの選定を含めて今後の検討事項である。これらのアンテナは正対するパネル面に設置することで、機軸に対して 360 度の視野を確保し、スピン制御を行いながら常時監視を実現する。

各バンド強度のサンプリング周期は 1ms から 10ms 程度とする。発光現象が 100ms の時間長さで観測されているのでサンプリング周期としては十分であると判断しているほか、観測の S/N 向上にも供すると考えている。

CMOS カメラは 470nm、及び 600 から 700nm の波長で分光を施す。CMOS カメラ素子はすでに軌道上実証されたデバイスを用いるとし、 480×640 pixel の解像度、視野は 90[deg] に設計する。軌道高度を 100km とした場合、位置分解能は 0.5km/pixel となり要求仕様を十分満足する。カメラは正対する 4 面に搭載され、各々視野 90 度により、スピン軸に垂直方向に 360 度の視野を構成する。

CMOS カメラの露光時間については、10ms から 20ms 程度になる。サンプリングレートは「露光時間+輝度検出時間」で決定されるが、CCD カメラを用いた地上観測にあわせ 33ms を目標とする。画像処理は可能であれば計算機で行うが、機器間の転送速度や処理速度を考慮すると専用ハードウェアを FPGA 等で構築したほうが有利であると考えられる。なお、露光時間 10ms、高度 100km とした場合、4rpm 以下であればスピン制御による撮像へのブレの影響は無い。

4 衛星概要

ここで提案する衛星は八角柱を基本構造とし、中心部に固体モータと 1 液式 RCS を搭載する。各側面には太陽電池セルを貼り付けるほか、ミッション機器である各バンドのパッチアンテナや CMOS カメラの開口面が設置される。運用時の姿勢制御はスピン制御とし、その中心軸は固体モータの軸線と重なる。スピン衛星であるため、スピン軸を最大慣性軸にあわせる必要があるが、中心は固体モータが占めるため、重心面となるパネル中心付近に搭載機器を集中する。

搭載バス機器は固体モータ等から構成される推進系、姿勢制御機器として ACM、TSAS、ND、RW、FOG を搭載し、計算機は各 I/O インターフェースを統合した ICU で集中的にまかなう。通信系は SRX、STX、パッチアンテナから構成されるほか、電源系としては SAP、PCU、バッテリーを搭載する。

図 1 に衛星構体概要、表 1 に搭載機器重量見積もりを示す。

打ち上げは静止衛星のピギーバックを想定し GTO まで運ばれる。GTO の近地点から衛星は搭載された固体モータ #1 によって月軌道へ遷移し、姿勢を反転させた後、固体モータ #2 によって傾斜角 25 度の月周回軌道へ投入される。

画像処理による位置特定がオンボードで行われること、サンプリング周期が比較的大きい、短時間の現象でまた発生頻度もさほど多くないことが予想されることから、観測データ量は非常に少ないと思われる。一度の観測で得られる情報が、位置情報(緯度・経度)が 4byte、各バンドをサンプリング周期 1ms、データ長 2byte で取得すると 600byte、CMOS カメラによる輝度変化を 10ms、2byte 長でサンプリングしたとしても 20byte、合計 624byte である。衛星のヘルスチェックと観測データを含めたとしても地上との通信は 8kbps から 16kbps で十分であると予想される。観測データ

Table 1: 搭載機器重量見積もり

サブシステム	重量 (kg)	備考
推進系	103.4	固体モータ、燃料タンク、配管等
構造系	21.0	MINT を含む
姿勢軌道制御系	3.9	TSUS、ND、RW、FOG 等
統合化制御系	5.0	OBC、IOP、コマンドボード等
通信系	2.6	SRX、STX、S-HYB、BPF 等
電源系	14.7	SAP、PCU、CNV、SHNT、BAT 等
理学観測系	10.0	CMOS カメラ、アンテナ (43GHz、22GHz、2GHz)、信号処理機器等
電気計装	6.0	
熱計装	1.0	
探査機合計	167.6	

が非常に小さくて済んでいるのは多くをオンボード処理していることによるが、ヘルスチェック等についてもオンボード処理させることによって、地上での運用数を更に少なくでき、なおかつ通信電力も削減できる可能性がある。

地球間通信は送受別にした S-Band パッチアンテナで行う。臼田局を利用した場合、過去の衛星の例から考えると送信電力 5[W] で 8kbps を実現していることから、本提案もこれと同等の通信電力、通信速度が利用可能だと考える。発生電力がおおよそ 50[W] と予想されることから、十分実現可能であると思われる。

5 まとめと今後の課題

本提案は小型衛星によって月探査ミッションの実現を検討し、近年注目されつつある小型衛星の活動範囲の拡大と、月面衝突発光現象や LTP のような低頻度現象の観測にも焦点を当てていく気運を期待するものである。

ミッション実現には小型衛星に対する固体ロケットモータの搭載や、電波観測機器といった新規開発を要する要素もあるが、極力現在の小型衛

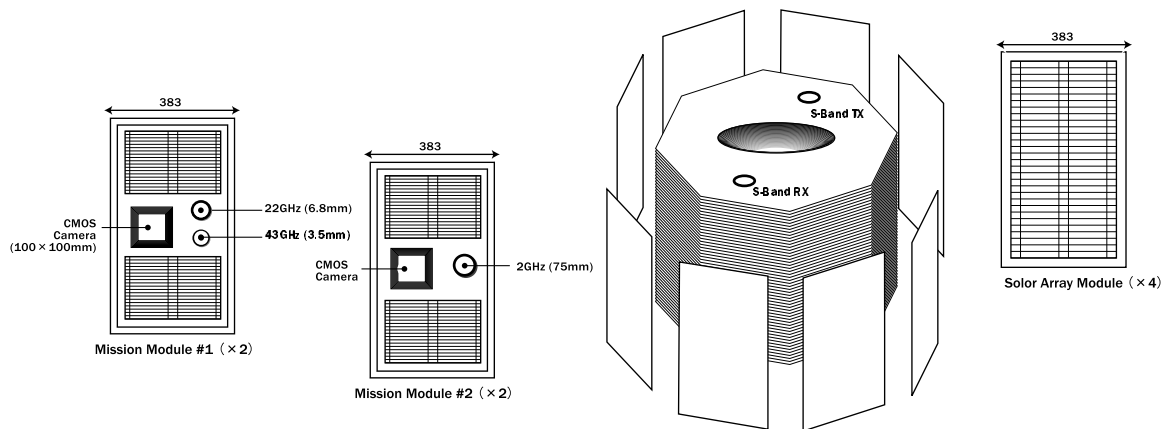


Figure 1: 衛星概要

星技術・開発済み搭載機器を採用することで実現性を考慮したつもりである。

ミッションとしては3軸姿勢制御による常時監視を実現したいという要求があるが、これが可能かどうかは重量及び電力と軌道擾乱を考慮する必要があり、今後の検討事項である。

6 謝辞

本検討は宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部で行われてる教育プログラム『君がつくる宇宙ミッション』がきっかけとなり始まった。ここにおけるすべての出会いとプログラムを支えるTA各位及び各方面から援助を賜った小山教授に心から感謝する次第である。

References

- [1] arianespace, "<http://www.arianespace.com/>"
- [2] Gordon Walker, Jaymie Matthews et al. "The MOST Asteroseismology Mission: Ultraprecise Photometry from Space" *Astronomical Society of the Pacific* (Vol.115, pp 1023-1035) 2003.
- [3] ESA, "<http://www.esa.int/esaCP/index.html>"
- [4] 斉藤宏文他, "INDEX2 号機の構想" 宇宙科学シンポジウム, 2003.
- [5] Kozyrev, N.A., "Observation of a Volcanic Process on the Moon" *Sky & Telescope*, 184-186, 1959
- [6] 月面衝突発光, "<http://www.ice.uec.ac.jp/yanagi/Japanese/ImpactFlash.html>"
- [7] 牧 謙一郎, "超高速衝突に伴うマイクロ波放射の観測及び放射メカニズムの考察" 博士論文, 東京大学, 2004.
- [8] Takano T. et al. "Microwave Emission Experiment with Hypervelocity Impacts and Applications of its Results" 3rd European Conference on Space Debris, 2001.
- [9] Cameran W.S. "Comparative Analyses of Observations of Lunar Transient Phenomena." *Icarus*, 16, 339-387., 1972.
- [10] Lawson, S. L. "Maps of Lunar Radon-222 and Polonium-210" *Lunar and Planetary Institute Conference Abstracts*, pp. 1835., 2002.