

# スペースガードと宇宙資源探査

中村良介<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> 産業技術総合研究所

## Spaceguard and future asteroid mining

Ryosuke NAKAMURA<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> National Institute of Advanced Science and Technology

### Abstract

The collisions of Near-Earth Asteroids (NEAs) are serious threat to the civilization on the Earth. On the other hand, volatile-rich NEAs will initiate a new space era by providing us with life sustaining material and transportation fuel. The total cost of space resource mining can be significantly reduced if we can tow volatile-rich NEAs to the Earth-Moon system. In this article, I review several methods to change NEA's orbit proposed in spaceguard and NASA's Asteroid Redirect Mission (ARM). It is found that spaceguard-based technology produces too low delta-V, while ARM-like missions are unaffordable. Recent models of NEA's orbital evolutions, however, predict the presence of many Mini-moons (temporally captured objects around the Earth-Moon system), which could be ideal targets for space mining. The size and geocentric distance of Mini-moons lie between those of Earth-orbiting space debris and NEAs. By filling this gap, we can effectively discover Mini-moons.

Key Words: Space resource, utilization, asteroid, mining

### 1 はじめに

地球近傍小惑星の衝突は、文明の破局を引き起こす可能性があり、これを未然に防ぐことがスペースガードの大きな目的である。一方で、一部の始源的な地球近傍小惑星に含まれている水や有機物は、将来的に人類が宇宙空間に生息域を拡大していくための貴重な資源となりうる。こうした揮発性物質は、人間自身が摂取したり、食物となる植物を栽培するために利用できるだけでなく、宇宙空間を移動するための推進剤としても利用できる<sup>1)</sup>。

本稿では、人類の最初の宇宙拠点が、地球=月系(地球周回低軌道からラグランジュ点の間の宇宙空間)に築かれることを想定する<sup>2)</sup>。現在の国際宇宙ステーションは、定常的に地上から物資の補給を受け、再利用できなくなったものは地球へ廃棄している。将来的に、現在よりもはるかに高い効率で水や食物を循環させることが可能になったとしても、一定量の補給は不可欠である。宇宙空間に滞在する人間の数が増え、滞在領域が遠方に広がるにつれて、ますます多くの水・有機物が必要とされ、地球からの輸送コストは高くなる。

そこで、まず2章では、揮発性物質の補給源となりうる地球外天体についてまとめ、宇宙資源探査のターゲットとしてはC型の地球近傍小惑星が最も有望であることを示す。ついで3章では、地球近傍小惑星を地球=月系に曳航するための軌道変更技術およびそのコストについて検討する。4章では、地球=月系に一時的に捕獲される微小天体、いわゆる Mini-moons を紹介し、この天体が将来的な宇宙資源探査の理想的なターゲットであることを述べる。

### 2 資源供給元となる天体の条件

地球=月系で利用される揮発性物質の供給元として、最も適切な地球外天体はなんだろうか? その天体は、当然ながら、揮発性物質を多量に保持している必要がある。最近の LCROSS探査機による衝突実験などから、地球の月でも、極域の永久影には水氷が存在する可能性が強く示唆されている<sup>3)</sup>。しかし、月の水氷の全存在量や分布にはまだまだ不定性が大きいいため、月を主な供給元と想定することは現時点では難しい。一方、やはり最近の探査によって、火星の表層近くに多量の水氷が存在することはほぼ確実にようになってきた<sup>4)</sup>。しか

し、火星表面から地球＝月系へ物質を輸送するためには、火星の脱出速度（～5km/s）を与えたあとで、さら地球＝月系へと運ぶ必要がある。十分な量の水や有機物を保持していることが確実な天体としては、彗星がある。彗星のサイズは火星に比べてずっと小さく、せいぜい数十kmであるため、脱出速度も月や火星よりはずっと小さい。しかし彗星は一般的に非常に離心率が大きい軌道を持つため、彗星で採取した物質を地球＝月系に輸送するためのコストが非常に高くなってしまふ。まとめると、宇宙資源探査対象となる天体は

1. 表面付近に多量の揮発性物質を保持している
2. 脱出速度（～サイズ）が小さい
3. 地球＝月系への輸送コストが小さい（～軌道離心率や傾斜角が小さい軌道を持つ）

という3つの条件を併せ持つ必要がある。月は1/2を、火星は2/3を、彗星は3を、それぞれ満たすことができない。地球近傍小惑星は2/3の条件を満たす。また、今後数年の間に「はやぶさ2」や Osiris-ReX 探査機が、（広義の）C型小惑星に到達しサンプルを持ち帰る。その結果、C型小惑星と炭素質隕石が同じものであることが証明されれば、C型小惑星には炭素質隕石と同程度の炭素（～数%）と水（最大で約20%）<sup>5)</sup>が存在することが確実となる。つまりC型をターゲットとすることで、1の条件も満たされることになる。

### 3 既存の小惑星軌道変更技術と資源探査への応用可能性

ある物質が有用な「資源」になりうるかどうかは、それを採掘・精錬し、利用現場に届けるまでのトータルコストに依存する。月や火星表面に恒久的に人間が滞在するようになれば、その場で採取・利用できる揮発性物質は立派な資源となりうる。しかし、地球＝月間の宇宙空間での利用を考えると、地球から運び上げる物質に対する優位性はない。

前章で述べたように水や有機物はC型小惑星質量のかなりの割合を占めるため、現地に採掘・精錬設備を設置し定常的に運用したとしても、輸送質量を劇的に減らすことはできない。むしろ採掘・精錬のためにかかるコストのほうが大きいと考えられる。そこで、ここではC型小惑星自体を地球＝月系に曳航することを想定し、技術的フィジビリティとコストを検討する。その際に、最も参考になるのが、過去のスペースガード研究である。スペースガードでは、地球に衝突する可能性のある小惑星の軌道をずらすために様々な

検討が、長年にわたって積み重ねられている<sup>6)</sup>。また最近では、NASA の Asteroid Redirect Mission (ARM) が、小惑星の軌道を変更して地球＝月系へと移動させるための技術検討をすすめている。ここでは、これらの検討結果を概観し、資源探査への応用可能性についてまとめる。

#### 3.1 スペースガードの軌道変更技術

スペースガードで検討されている代表的な軌道変更技術のひとつが、小惑星に人工物体を高速（～数km/s）で衝突させ、その衝撃によって軌道を変更する Kinetic Impactor である。過去に行われた Kinetic Impactor 類似ミッションとしては、NASA が Temple 第一彗星に対して行った Deep Impact 探査が挙げられる。また現在、ESA と NASA は共同で Kinetic Impactor の実証ミッション AIDA (Asteroid Impact and Deflection Assessment) の検討をすすめている<sup>7)</sup>。NASA が衝突機 DART を製作し、バイナリ小惑星 Didymos に衝突させる。一方、ESA が担当する AIM (Asteroid Impact Mission) は、DARTが衝突するより前に Didymos に到着し、天体の表面状況や自転状態を詳しく観測する。衝突の瞬間には、放出物との衝突を避けるために遠方に退避し、安全が確認された後で再度近傍に戻って観測を継続する。表面にできたクレータの体積、放出物の広がり、衛星の軌道変化などを観測することにより、衝突による小惑星への運動量移行効率を定量的に見積もることが AIDA の最大の目的である。仮に、この運動量移行効率が完全非弾性衝突と同じだとしよう。半径 100 m、密度 2000kg/m<sup>3</sup> の小惑星に、10<sup>3</sup> kg の探査機を 10 km/s で衝突させたとすると、速度変化はおよそ 1.25x10<sup>-2</sup> m/s となる。一方、衝突の T 年前に衝突を回避するために必要な速度変化は、0.07/T m/s 程度であることが知られている<sup>6)</sup>。つまり、上記のような小惑星を考えた場合、地球衝突の約6年前に Kinetic Impactor を衝突させられれば、衝突を回避することができる。

衝突の一瞬に大きな運動量変化を引き起こす Kinetic Impactor に対して、比較的小さい摂動を長期間にわたって与えることで軌道を変更する方法として提案されたのが Gravity Tractor である<sup>8)</sup>。探査機が小惑星近傍に存在している時、探査機は小惑星の重力によって小惑星に引きつけられている。この時、作用反作用の法則から、小惑星も探査機の方に引き寄せられている。つまり探査機に小惑星重力と拮抗する推力を与え、長期にわたって一定の位置にホバリングさせれば、小惑星自体の軌道を徐々に変化させることができる。さきほどと同様に半径 100 m、密度 2000kg/m<sup>3</sup> の小惑星

を考えると、 $2 \times 10^4$  kg の探査機を衝突の20年前に小惑星に到達させ、小惑星表面から数百mの位置に1年にわたって保持し続けられれば、地球に衝突する軌道を変えられる<sup>8)</sup>。ARMでは、この Gravity Tractor の技術実証試験が予定されている。

Kinetic Impactor にせよ Gravity Tractor にせよ、基本的に小惑星と地球との衝突を避けることが目標である。地球の直径程度の軌道変化を引き起こすのに必要とされる  $\Delta V$  は、せいぜい cm/s オーダーでしかない。一方、小惑星を地球=月系に資源として持ち帰るためには、相対速度を十分に低減させる必要がある。こうした地球=月系への「曳航」に必要な  $\Delta V$  は、地球から小惑星に到達する時と同程度、つまり数 km/s となるだろう。つまり、スペースガードの軌道変更技術を、そのまま資源探査に応用することは困難であることがわかる。次章で述べるように、資源利用目的の場合、数十mサイズの小惑星でもターゲットとなりうる。この場合、Kinetic Impactor のサイズを大きくすることで、より大きな  $\Delta V$  を実現することが原理的には可能である。しかし、数km/s の速度変化を与えるほどの衝撃を与えると、核爆弾を用いた時と同様に小惑星自体が破碎されてしまう可能性が大きい<sup>6)</sup>。

### 3.2 ARM の軌道変更技術

スペースガードとは異なり、NASA のARM では地球=月系で捕獲できるレベルまで相対速度を下げる。つまり、その軌道変更技術を資源探査に直接的に応用できる可能性はより高いと期待される。検討の初期段階においては、探査機が小惑星本体の自転をとめて捕獲・曳航するという形態を想定していた (Option A)。しかし2015年になって、探査機が小惑星表面に着陸して、数m規模の岩 (ボルダー) を捕獲し、高効率の大型イオンエンジンによって地球に持ち帰るという案 (Option B) に変更された。これは Option A の技術的なフィージビリティが十分でないと判断されたためであろう。そもそもARM の提案当初から、持ち帰ることのできる質量には限界があることが指摘されていた。

一方、Option Bが技術的には可能だとすると、次の課題は、地球から水・有機物を供給するよりもコストが低くなるかどうかである。はやぶさ2級の科学ミッションを想定し、およそ300億円の予算で3gの水・有機物を含むサンプルを地球=月系に持ち帰ったとしよう。この場合、サンプル物質の価格は1kgあたり1兆円となる。次に ARM option B の予算総額をおよそ1兆円とし、 $10^4$  kg のボルダーを持ち帰ったとする。水・

有機物の割合が10% だとすると、kgあたりの価格は10億円となり、科学ミッションに比べてコストは 1/1000 となる。しかし地球からの打ち上げコストは現状 100万円/kg のオーダーであり、同じ量の水や有機物入手するなら、地球産のほうが1000倍安価である。しかも今後Falcon 9 や Blue Origin といった再利用ロケットの開発が順調に進めば、地球からの物質供給のコストがさらに低下する可能性も十分にある。

発想を逆転させ、どの程度のサイズのものをどのくらいのコストで持ち帰れば、地球から供給される水・有機物よりも安くなるかを考えてみよう。半径10m、密度  $1000 \text{kg/m}^3$  で揮発性物質を10%含む球形の小惑星を捕獲し、完全利用できたとする。含まれる揮発性物質は40万トンであり、同量を地球から100万円/kgのコストで打ち上げた場合の価格は4000億円となる。つまり、4000億円よりもずっと低い価格でこの小惑星を捕獲・曳航できるミッションをデザインすれば商業的に成立する可能性がある。ARM で想定されているような半径 1m 程度のボルダーであれば質量が1/1000になるため、地球産物質と競争するためには4億円以下のミッションを設計する必要がある。いずれにせよ、宇宙資源利用の鍵を握るのは、非常に低い  $\Delta V$  で到達できる、比較的小さな (<数十m) C型小惑星の存在である。

### 4 Mini-moons の探査・観測戦略

衝突によって、人類の文明あるいは地球生命圏全体に壊滅的な影響を及ぼすと考えられる 1km以上の地球近傍小惑星は、すでにほとんど (約1000個) が発見されている。しかし、100m~1km のサイズレンジでは、2万個程度の天体の半分以上がまだ見つかっていないと考えられている<sup>9)</sup>。実際、2015年の10月31日に地球に最接近した 2015 TB45 (~600m) が、そのわずか 20日間ほど前に発見されたことは記憶に新しい。こうした観測的な不定性はあるものの、最近の小惑星の軌道進化モデルは、「非常に低い  $\Delta V$  で到達できる、比較的小さな (<数十m) 小惑星」が多数存在することを予測している。なかでも重要なのは、地球=月系の重力圏に一時的にトラップされる微小天体 Mini-moons (Temporarily-Captured Objects=TCOs と呼ばれる) である<sup>10)</sup>。これまでに実際に発見されたのは 2006 RH 120のみだが、理論モデルからは数m以上の Mini-moons が、地心距離で数十~数百万kmの範囲に常時ひとつは存在すると予測されている<sup>10)</sup>。また、チャリャピンスク隕石の落下は、数十m級の天体についての総数が従来のモデルよりも桁で大きいことを示唆している<sup>11)</sup>。だとすれば、Mini-moons の数も、現在の理論

モデル予測よりもさらに多い可能性がある。

Mini-moonsは、一時的にはあるが、地球=月系の重力圏に捕獲されている。その間に、探査機をランデブーさせられれば、ごくわずかの $\Delta V$ を与えてやれば、安定な軌道に遷移させることができるだろう。ただし地球=月系の重力圏にとどまっている期間は非常に短いため、ラグランジュ点などにあらかじめ探査機を打ち上げておき、適当な Mini-moons が発見されたら、即座にそこへ向かわせる必要がある<sup>12)</sup>。つまり常時 Mini-moons の到来を監視している地上観測網と、軌道上の探査機の緊密な連携が必須となる。

地球近傍小惑星は、これまで比較的地心距離の大きいところでしか観測されていなかった。しかし最近では、カタリーナスカイサーベイが、2008 TC3 や 2014 AAが地球に落下する直前の観測に成功している。このように地球のごく近傍を通る時に観測すれば、数m~数十mサイズの天体でも十分なSN で捉えることができる。しかし移動速度が大きいために、通常とは異なる観測・解析手順が必要となる。一方、地球周回中に発見され、その後落下した人工物体としては J002E3 (アポロ12号を打ち上げたサターンVロケットの第三段)、6Q0B44E、WT1190F などがある。こうした物体の明るさや移動速度は Mini-moons にかかなり近いため、スペースデブリ観測システムをMini-moons サーベイに応用することも可能だと考えられる。

Mini-moons のサイズ (数m~数十m) と地心距離 (数十~数百万km) は、ちょうど地球近傍小惑星とスペースデブリの間にある。今後スペースガードのための地球近傍小惑星観測網と、スペースデブリ観測網が連携して、両者の観測ギャップを戦略的に埋めていくことで、Mini-Moons の観測が飛躍的にすすむはずである。また現時点で、Mini-moons を発見する観測効率の最も高い装置が、広視野・高感度を併せ持つ「すばる」望遠鏡のHyper Suprime-Cam (HSC)であることは、日本の大きな利点であると言えよう<sup>10)</sup>。

## 5 まとめ

地球=月系 (地球静止軌道から地球=月系のラグランジュ点の間の宇宙空間) での利用を想定した場合、地球近傍C型小惑星は月・火星・彗星といった他の天体に比べて効率的な揮発性物質の供給元となりうる。しかし現在のスペースガードや Asteroid Redirect Mission で検討されている小惑星の軌道変更技術をそのまま資源探査に転用するだけでは、商業的には成立しない。鍵となるのは「非常に低い $\Delta V$ で到達できる、

数十m以下のC型小惑星」であり、その総数や軌道分布を明らかにすることが喫緊の課題である。なかでも地球=月系に一時的に捕獲されるMini-moons は、比較的小規模なミッションでも探査が可能な、宇宙資源探査の理想的なターゲットである。スペースガードのための地球近傍小惑星観測網と、スペースデブリ観測網との連携は、Mini-moonsの総数や軌道分布のみならず、組成や自転といった詳細な特性を明らかにする上でも、今後重要な役割を果たすことが期待される。

## 参考文献

- 1) Lewis, J. S., "Asteroid Mining 101: Wealth for the New Space Economy", Deep Space Industries (2014)
- 2) Kawaguchi, J. "On the Deep Space Port Utilization Constructed around L2 for Outer Solar System Transportation", 54th International Astronautical Congress of the International Astronautical Federation, (2003)
- 3) Bibring, J. et al., "Mars Surface Diversity as Revealed by the OMEGA/Mars Express Observations", *Science*, 307, 1576-1581 (2005)
- 4) Colaprete, A. et al., "Detection of Water in the LCROSS Ejecta Plume", *Science*, 330, 463 (2010)
- 5) Elvis, M. "How many ore-bearing asteroids?", *Planetary and Space Science*, 91, 20-26 (2014)
- 6) Ahrens, J. and Harris, A. "Deflection of near-Earth asteroids", *Nature*, 360, 429-433 (1992)
- 7) Cheng, A. F., Reed, C., Carnelli, I., Michel, P., and Ulamec, S., "AIDA: Asteroid Impact and Deflection Assessment", *Lunar and Planetary Science Conference*, 46, 1386 (2015)
- 8) Lu, E. T., and Love, S. G. "Gravitational tractor for towing asteroids", *Nature*, 438, 177-178 (2005)
- 9) Mainzer, A. et al., "NEOWISE Observations of Near-Earth Objects: Preliminary Results. *Astrophysical Journal* 743, 156 (2011)
- 10) Bolin, B., et al., "Detecting Earth's temporarily-captured natural satellites-Minimoons", *Icarus* 241, 280-297 (2014)
- 11) Brown, P. G. et al., "A 500-kiloton airburst over Chelyabinsk and an enhanced hazard from small impactors", *Nature* 503, 238-241 (2013)
- 12) Chyba, M. et al., "Designing rendezvous missions with mini-moons using geometric optimal control", *Journal of Industrial & Management Optimization*, Vol. 10 Issue 2, p477 (2014)

(2016年2月7日受付, 2016年2月20日受理)