

シリーズ特集

明日を支える資源 (159) <連載：資源供給のフロンティア①>

宇宙資源開発の現状と展望

Exploration and Utilization of Space Resources: Current Situation and Prospects

宮 本 英 昭*

Hideaki Miyamoto

1. はじめに

月や小惑星、火星を目指した宇宙開発競争が熾烈化していることは、新興国の宇宙開発への積極的な参画や、太陽系探査や開発を掲げる民間会社数の急速な伸びにもあらわれている。米国・欧州の投資家らは地球外天体の資源を利用する時代に既に入っていると考えており、米国では宇宙資源の利用を睨んだ宇宙法を成立させるなど、法的整備を急いでいる。ルクセンブルクは宇宙資源の国際拠点化を標榜し、民間企業への大規模な投資を行っている。

固体天体の利用は革命的に新しい資源獲得の道を開く可能性があり、将来の権利の確保も含め、我が国においても検討を進める必要がある。空想を膨らませて未来像を描くことは楽しいが、科学探査で獲得された太陽系に関する科学的知見に基づき、冷静に検討することも重要である。

2. 宇宙資源という言葉

有用な物質であっても、経済的な優位性が無ければ資源ではない。例として土星最大の衛星タイタンに存在する液化天然ガス (LNG) の巨大な海について考える。

タイタンの地表温度はマイナス180℃と低く、窒素を主体とした約1.5気圧の大気があるため、メタンが液体として存在できる。探査機カッシーニの観測によると、地表に見つかった液体メタンの総量は、地球の石油や天然ガス等による炭素の総埋蔵量の百倍以上とされる¹⁾。

しかしタイタンと比べると遥かに近い火星でも、人類はサンプル取得に成功していない。2030年代の実施を目指してNASAが進める火星サンプルリターン計画 (Mars Sample Return, MSR) ですら、5 kgのサンプルを入手するのに5千億～1兆円必要とされ、ごく微量の大気をタイタンから持ち帰るだけでも数千億円は必要とされる。地球でいかに化石燃料が枯渇しても、わざわざタイタンから地球へLNGを輸送する経済的意義を見出すのは難しそうだ。

しかしだからといって宇宙に資源と呼べるものは無い、

と考えるのは早計である。たとえば、エアロブレーキングという技術があるが、これは周回軌道へ探査機を投入する際に、対象天体の大気を利用して必要燃料量を削減するというものだ。また遠方へ探査機を送り込む際に利用されるスイングバイは、天体の重力を利用している。

つまり人類は、広い意味では地球外天体を既に利用している。これをさらに進めて月や小惑星など地球外の有用物質を「その場」利用することをISRU (In-Situ Resource Utilization) と呼ぶ。これは宇宙開発の現場では既にあたりまえの概念で、今後最も検討が進む分野と考えられる。将来的には「その場」だけでなく、産地と異なる場でも利用されるだろう。そのため多少概念的ではあるが、経済性の意味も含めた宇宙資源という用語が使われ始めた²⁾。

3. 輸送とコスト

3.1 問題点の整理

地球外物質を利用する際、地上の資源開発と異なる点が多い。たとえば地球外天体の多くは大気を持たず重力も小さいため、地球であたりまえに利用している機器は、そのままでは使い物にならない。低温・真空環境下では冷却や洗浄に水が使えないし、潤滑油や緩衝剤も性質が変わる。電力量は厳しく制限されるし、昼夜温度差も大きく機器の劣化は早い。また地球からの距離に応じて通信レートが低下し通信時間差は増大するため、高度な遠隔操作が必要となる。消耗品の交換や代替機の送付も困難だ。低重力・真空下での選鉱、精錬法は新規開発が必要だ。しかし現在はまだこうした議論の前の段階であり、そもそもどこまで行けて、どのような必要があるか、という点が本質的である。

といっても人類は既に5,000回以上のロケット打ち上げを経験し、最近10年の打ち上げ失敗率は5%程度しか無い。200機以上の探査機を約70個の地球外天体に送り込み、その中には、もうすぐヘリオポーズの先の星間空間へと到達するものもある。つまり技術的には太陽系の好きな場所へ輸送できる。問題は輸送コストと需要のバランスといえる。

3.2 強大な地球重力の壁

宇宙空間で人工物を輸送するには、地上と大きく異なる考え方が必要になる。宇宙では空気抵抗を受けず、慣性で

*東京大学大学院工学系研究科システム創成学専攻
〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1
E-mail: hm@sys.t.u-tokyo.ac.jp

移動を続けられるが、周囲にある天体の重力が支配的となるので、天体表面かごく近傍でない限り、物体は天体の重力に捉えられた周回軌道を持つ。この軌道は天体との相対速度に依存して決まるため、速度を変化させると別の軌道へ移動できる。そのため移動の困難さを表す尺度として、到達に必要な速度変化の総量 (ΔV) が良く使われる。

地表から宇宙ステーションのある地球低軌道 (Low Earth Orbit, LEO) までの距離を約400kmとしよう。地球のどこから打ち上げるかによっても異なるが、地表から到達するには約10km/sの ΔV が必要となる。一方で低軌道から月まで行くのに必要な ΔV は、約3 km/sでしかない。つまり地表から低軌道に到達する方が、直線距離でみると約1,000倍も遠い月へ行くよりエネルギー的に困難である。

地球は岩石質の天体として太陽系最大で、その巨大な重力に打ち勝つ困難さが、宇宙開発の足枷となっている。そのため地球外から物資を確保した方がエネルギー的に有利ではないか、というのが宇宙資源の基本的な発想である²⁾。

3.3 着陸が容易な天体もある

月の物質を利用するには着陸が必須であるが、それには減速が必要となる。そのため月に衝突させるより ΔV が3 km/sほど増え、低軌道から行くとき6 km/sが必要になる。これは火星に行くのに必要な ΔV (4.3km/s) よりも大きい。また月からの脱出に必要な ΔV (3.2km/s) を考えると、月から物資を低軌道に運ぶのは、さらに困難となる³⁾。

低軌道から地球の重力圏を脱出するのに必要な ΔV は3.2km/s程度で、地球に近い小惑星 (地球近傍小惑星) に相対速度がゼロとなるよう接近 (ランデブーと呼ぶ) するだけなら、月に着陸するより、はるかに小さな ΔV ですむ場合がある (対象天体が小さければ、そのまま着陸できる)。こうした小惑星は数百個見つかったので、小惑星は資源確保の対象として有望である。ちなみに火星の衛星であるフォボスは直径約20kmと小さいので、着陸に必要な ΔV は月より小さな5.6km/s程度で済む軌道もある。

着陸後に地球低軌道へ戻るには、対象天体が小さいほど有利となる。月から戻るための ΔV は3.2km/sであるが、地球近傍小惑星の中には、0.1km/sで地球に戻れるものすらある。こうした小天体は宇宙資源開発の最有力候補だ³⁾。

3.4 コストの考え方

宇宙ミッションの価格は、必要なエネルギーに左右される。物質を持ち帰る際には宇宙機の往復も含めた総エネルギーでコストが決まるが、それは ΔV のべき乗で増えるため、 ΔV の増加は大幅なコスト増を意味する。

ただし他の要素も大きい。たとえばフォボスから地球へ戻る ΔV は月より小さな1.8km/s程度で済むが、地球から遠いために、ミッション継続時間が増加し機器劣化の可能性が増えるし、通信効率や太陽電池の発電効率も下がるの

で、冗長性が必要となる。

これらを見込んだコストの計算は、かなりの知識と経験が必要である。安全率をどこまで見込むかなどは、計画の性質によっても異なるので、似た計画でも実施機関ごとに総額が異なる。そこでベンチャー企業の中には、リスクを取ることでコストを大幅に下げようとするものもある³⁾。

4. 太陽系に何があるか

4.1 太陽系の物質

人類の住む地球表層 (地殻) の組成は、太陽系全体の平均組成や地球全体の組成と大きく異なる。地殻はO, Si, Al, Fe, Ca, Na, K, Mgでほぼ99%が構成されるのに対し、太陽系全体は主にH, He, C, N, O, Ne, Mg, Si, S, Fe, Niでできている。つまり地球上で希少なものが、太陽系としては豊富に存在していることもあり、その逆もある。

太陽系の質量の99.9%は太陽に集中しており (その99.9%はHとHe)、残り0.1%の大部分が、HやHeを主体とするガスでできた木星型惑星である。つまり平均組成を持つ物質が均質に太陽系に散らばっているわけではない。

では太陽系内でどのような元素分布があるだろうか。太陽系は分子雲の一部が重力収縮して形成したとされる。初期太陽の形成後に残ったガスや微粒子 (宇宙塵) が冷却し、その凝縮物から微惑星が生まれたらしい。この時、岩石や金属などの難揮発性成分は太陽に近い側、揮発性成分は太陽から遠い側にほぼ分布した。

太陽に近い地球は、こうした主に難揮発性の微惑星が集積し作られた。地球質量の2/3はマントル (かんらん石 (Mg, Fe)₂SiO₄と輝石 (Mg, Fe)₂Si₂O₆およびこれらの高压相) で、残りのほとんどが中心核 (Niを含むFe) である。そのため地球質量の92%はFe, O, Si, Mgで構成されている。太陽から火星程度までに存在した物質は、これとほぼ類似していただろう。なお、月は原始地球に別の微惑星が衝突して形成したので、構成物は当時の地球と類似した限られた鉱物種しかないとされる。

小惑星は微惑星の名残と考えられており、その破片である隕石の多くは、このときに形成された鉱物が主な構成物である。そのため部分的には溶融や冷却、水との化学反応をしたものがあるが、隕石には300個程度の鉱物しか確認されていない。

木星以遠の領域は、いわゆる雪線 (太陽の影響が弱まり水が安定するほど低温となる距離、3AU程度) の外側に存在した物質の組成を反映している。太陽から遠方ほど低温で凝縮する物質 (氷や有機物) が増える傾向がある (実際には惑星大移動の影響も受け、多少混合された)。

4.2 魅力的だが未知な小天体

太陽による熱放射の影響は大きく、太陽に近いと揮発性

成分は安定して存在し得ないが、遠く離れば氷として存在しうる。火星と木星の間の領域はこの境界域に位置し、ここに小惑星帯が存在している。

小惑星は300万個以上あると言われており、軌道の知られているものだけでも約75万個（2018年1月現在）ある。主に小惑星帯に集中しているが、地球近傍など他の領域にも分布している（図1）。小惑星は、ケイ酸塩を主体とするもの、炭素や揮発性成分を含む炭素質と呼ばれるもの、それ以外のもの（金属を多く含むなど）の3種類に大まかに分類できる。小惑星帯においては、太陽寄り（内側）の小惑星は岩石質のものが多く、木星側（外側）は揮発性成分を多く含む傾向がある⁴⁾。

太陽系外縁部を起源とする彗星が内側太陽系に飛来することもある（天体内部に揮発性成分を保持したまま地球近傍に存在できる）。彗星は太陽の影響を受けて尾を持ち小惑星と区別されるが、表面の揮発性成分が消失すると、枯渇した彗星核なのか岩石質の小惑星なのか判断できない。そのため小惑星と彗星は小天体と総称される。小天体は黒い（反射能が低い）ことが多く、発見が困難であるため、多くの小さな天体が、まだ未発見であるとされる³⁾。

4.3 地球型惑星の特性

地球の鉱物種は太陽系の天体の中で格段に多い。逆に言うと、地球外に存在していて地球で見つからない鉱物はほとんど無い。これは地球の進化過程に由来する。

地球はその巨大さがゆえに放射性元素の総量が多く、その発熱量も多かった。そのため地球は激しい部分熔融／固化を繰り返し莫大な量の花崗岩を形成したが、その過程で鉱物に取り込まれにくい不適合元素が地殻に凝集し、数百種類の新たな鉱物が生まれた（類似したプロセスは恐らく

金星も経験したであろう）。さらに豊富な水との相互作用も経験した。これに関連してプレートテクトニクスが駆動し、高圧下の鉱物が地表に循環して地球の鉱物は1,000～2,000種となったようだ。さらに約30億年前から、生命活動の影響を受けた。地表では生命の多様性と共に複雑な生化学的反応が生じ、ついに太陽系で最大の鉱物種（5,000種ほど）を持つに至ったと言われる（そのうち2,500種は5か所以下の場所でしか発見されていない希少なものである）⁵⁾。

火星は地球のように水が豊富に存在していたが、地球よりその活動度は低かった。プレートテクトニクスの存在や、ごく単純な生命体の可能性も議論されているが、地球ほどにはこれらの影響を受けていない。そのため鉱物種という意味では、火星は金星と地球の間に位置するようだ。逆に言えば、太陽系の中で地球の次に多様な鉱物が存在しているような天体は、火星と考えられる。

5. 太陽系に資源はあるか？

5.1 宇宙資源の考え方

太陽系内に物質は不均質に存在しているため、有用な鉱物が濃集している場はある。地上から低軌道への輸送コストは20～50万円/kgもかかるため、こうした鉱物を利用し、打ち上げコストが低減できると良い²⁾。しかし天体ごとに到達するための困難度が異なる点に注意が必要である。

ある天体の資源を輸送する例として、科学探査が引き合いに出されることがある。しかし小惑星探査機はやぶさ2が300億円程度かけて地球近傍小惑星から3gのサンプルを取得するとはいえ、単純計算で10兆円/kgのコストがかかると考えるのは間違いだ。はやぶさ2のNASA版とも呼べるOSIRIS-RExも同程度以上のコストがかかるが、これは科学観測を行うための高額なサイエンス機器を搭載しているからだ。

同じNASAが2012年に発表した小惑星再配置計画(Asteroid Redirect Mission, ARM)は全く様相が異なる。この計画は500トンの小惑星を電気推進エンジンで移動させ月近傍の軌道に投入するというものだが、コストはたったの30億ドル。つまりおよそ60万円/kgで月軌道に小惑星物質を持ち込めるといふ。後に実現性を批判されたとはいえ、このコストは地球から月への輸送コスト（約数億円/kg）より桁外れに低い。資源の利用や移動に特化すれば、科学探査のコストより格段に下がることを示したと言える。

移動に必要な推進剤や、構造物を作るための構造材料などを宇宙空間で確保する需要は極めて大きい。人類が行きたいと強く思う場で活動を支える物質も、やはり大きな需要がある。地球に近く構造物を展開しやすい重力を持つ月や、生命の存在が示唆されるなど科学的に重要な火星は、

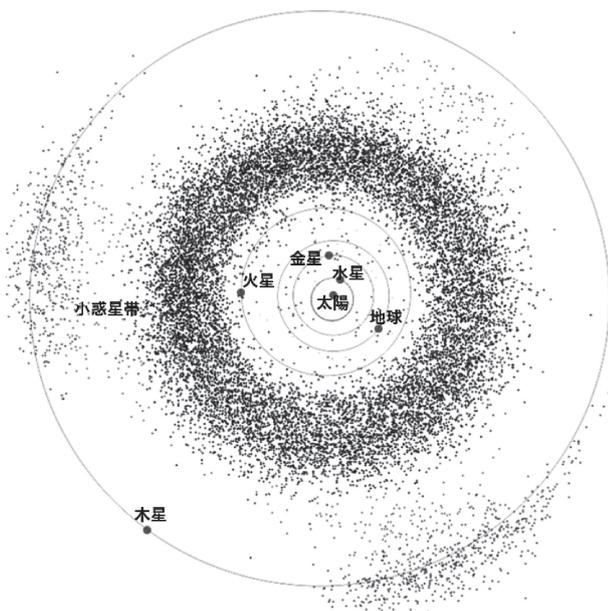


図1 内側太陽系における小惑星分布の概略図

長期間の有人滞在も含めてさまざまな活動が計画されており、現地での資源利用が進むだろう。さらに未知だが独特の進化が知られる木星衛星、やはり生命や惑星形成の鍵を握る土星衛星などは、遠方が故に到達が困難であるため、到達や現地活動に必要な物資を地球外で確保し、コストを落とした形で探査を行うことが望まれる。

以下ではこうした観点から、具体的にどの天体で何を使う可能性があるか、代表的な考え方を紹介する。

5.2 揮発性成分の獲得

宇宙で推進力を得るためには、炭化水素や水など揮発性成分の利用が最も単純である。4章で議論したように太陽系全体でみれば、H, He, O, Cは際立って多く、その組み合わせで形成されるメタンなどの有機物や水（氷）は、無尽蔵な量が存在している。問題は、どの場所が経済的に最も確保しやすいのか、という点に絞られる。

一般的な炭素質隕石には、オイルサンドやシェールガス生産が行われている頁岩と同様に数パーセントの炭化水素が含まれ、さらに10~20%程度の水も含まれる。こうした隕石の母天体である炭素質小惑星に行けば、揮発性成分が得られるだろう。小惑星帯の7割がこのタイプの小惑星だが、地球近傍小惑星にもこのタイプのものがある。枯渇彗星核と区別がつかない小惑星もあり、双方共に内部に揮発性成分を豊富に保持していると期待できる。

具体的にどの小惑星が最も経済性が良いか、という議論は少し難しい。というのも天体が小さいほど ΔV が小さくて済むが、そうした天体は発見が難しいので、人類にとって都合の良い天体が、まだ発見されずに多数存在している可能性があるからだ。広域赤外線探査衛星（WISE）が多くの小惑星を発見したが、こうした観測が今後も期待される。

地球近傍小惑星よりも ΔV が小さくてすむ天体もありそうだ。月よりも近い領域に、10年に1つ程度の頻度で1m以上の天体が数百日程度捕獲されると理論的に指摘されており、短期捕獲小天体（Temporarily Captured Object, TCO）などと呼ばれている⁶⁾。この種の天体は、低軌道からの ΔV が1~3 km/sで済むものも多いと予想されており、炭素質小惑星が一定数含まれるとも期待される。そのため揮発性成分獲得の候補として有望かもしれない。ただしまだひとつの天体（2006RH120）しか見つかっておらず、今後の研究が望まれる。

なお揮発性成分はその場で利用するだけでなく、地球周辺に保存し別の宇宙機に供給することで、革新的な輸送システムが生まれると考える研究者もいる。

5.3 構造材の確保

太陽光で発電を行う衛星を地球の静止軌道に大規模に建設し、莫大な電力を地球に伝送しようという宇宙太陽光発電と呼ばれる概念がある。他にも大規模な有人宇宙ステーションや深宇宙探査機の建設も議論されている。

大規模構造物の素材を地球から全て輸送するのは、地上から静止軌道への輸送コストが約100万円/kg程度であることを考えると困難だし、打上げ時の環境負荷も考慮する必要がある。そのため小惑星から資源を得て、その鉄化合物を構造体に利用の方が良い選択となる可能性がある。

宇宙空間では人間にとって有害な放射線や太陽からの高エネルギー粒子、高エネルギー宇宙線が飛来する。地球では大気や磁気圏が防いでくれるが、宇宙では大規模な防護壁が必要になる。これは質量さえ確保できれば実現でき組成は必ずしも重要ではない。そのため行きやすい地球近傍小惑星から大量の表面物質（レゴリス）や水を手に入して宇宙機の周辺に配置するのが有効と考えられている²⁾。

宇宙空間では人間にとって有害な放射線や太陽からの高エネルギー粒子、高エネルギー宇宙線が飛来する。地球では大気や磁気圏が防いでくれるが、宇宙では大規模な防護壁が必要になる。これは質量さえ確保できれば実現でき組成は必ずしも重要ではない。そのため行きやすい地球近傍小惑星から大量の表面物質（レゴリス）や水を手に入して宇宙機の周辺に配置するのが有効と考えられている²⁾。

5.4 重力天体での資源

月基地の建設においては、月面を覆うレゴリスが放射線遮蔽の防護壁や建築物の基礎として有望な資源となる。また月面で揮発性成分が手に入れば、推進剤や生命維持の意味で極めて意義深い。月は極度に乾燥しているが、過去数億年間に揮発性成分に富む小天体が幾度も月面に衝突し、大量の揮発性成分が持ち込まれたはずだ。その多くは消失したが、南極のクレーター内など常に影となる低温域に濃集したとする説がある。LCROSSミッションはここに衝突体を衝突させて、巻き上がったイジェクタを光学観測することで水が5w%存在したと報告したが⁷⁾、これと異なる結果を示す観測結果もあり、今後の詳細研究が待たれる。

火星やタイタン、木星の衛星エウロパには、生命が存在していた可能性があり、科学的な価値が極めて高い。将来はその場に存在している物質を利用した科学探査が行われるだろう。たとえば火星では水が広く分布しており、水を獲得することは比較的容易である。そこで水を推進剤や有人活動維持（酸素源、食糧生産や物資の生産など）に利用するだろう。またサバティエ反応でメタンを合成し、水や二酸化炭素起源の酸素とあわせて推進剤とする、などのアイデアもある。さらに多くの硫酸塩や塩化物など蒸発岩や熱水活動の痕跡が見つかったことから、精錬しやすい金属鉱石の確保が比較的容易とも考えられている。現地物質の利用は、火星への有人飛行のコスト削減の鍵を握る。

冒頭でタイタンにあるLNGの海を紹介したが、これは将来のタイタン探査で現地利用される可能性がある。タイタン着陸に必要な ΔV は15km/sを超え、探査は高コストとなる（カッシーニ・ホイヘンス探査機は、計画全体としては33億ドルかかった）。そこで今後は現地の炭化水素を推進剤として利用し、低コスト化を図るかもしれない。ただしLNG燃焼に必要な酸素の確保が困難なので、アセチレンの水素添加反応などの形で利用されるかもしれない⁸⁾。

6. 遠い将来の話

地球外物質が地球で経済的に優位性を持つには、原子力航法や宇宙エレベーターなど、革新的な技術が必要となる。しかし地球外物質の地上利用は、地球の諸問題を一気に解決する可能性すら秘めた重要な概念である。

地殻には長石 (Na, K, Ca, Ba) (Si, Al)₄O₈を構成する元素や、Mg (マンツルの主要な成分) よりもイオン半径が大きな元素 (UやThなど) が濃集しており、長石の主成分であるKとイオン半径の近いBaなども多い。PbやSn, Moなど原子数が大きく太陽系内での存在度が格段に少ない元素でも、地殻には比較的多く含まれるものがある。こうした元素は、今後も地球上で入手する以外に考えにくい。

一方で地球形成後に中心核が形成されたため、地殻には白金族など親鉄元素が欠乏した。そのため地球形成時の平均的な素材ともいえるコンドライト隕石には、白金族元素や金が地殻の数十～数千倍多く含まれている。

中心核と似た組成を持つ鉄隕石 (金属Fe・Niが9割以上を占める) は、さらに濃集度が高い。Ptだけでなく、Ru, Os, Irなどが数十ppmの濃度で含まれるものもある。こうした白金族元素を精錬して地球周辺に持ち込めば、価格競争力を持つかもしれない。ただし隕石中の濃集度は高く100ppm程度のため、白金族のみで原石の価値を考えると数百円/kg程度に留まる。しかしたとえば直径3 km程度のものを地球に持ち帰れば、実に200億トンの既に還元された金属鉄と1億トン以上の白金族が手に入ることになる。これは産業革命以来200年をかけて人類が生みだした金属鉄の生産総量を上回り、白金の総量の倍以上に匹敵する。

地球は酸化的環境下にあり、地上に存在する鉄は酸化鉄となっている。そのため人類は莫大なエネルギーコストと環境負荷をかけて金属鉄を作り出してきた。宇宙起源の金属鉄を地球に持ち帰れば、環境負担をかけずに莫大な量の金属素材を手に入れられるため、産業革命にも匹敵する大きな文明の転換期となるかもしれない。

7. 最後に

地球から到達しやすく、有用な構成物質を持つ小天体は

魅力的な天体である。はやぶさ探査機は世界に先駆けて地球近傍小惑星イトカワを調査したが⁹⁾、低重力下でも土砂の移動と重力偏析が生じていることを発見した意義は大きく、有用物が濃集している可能性も示唆された¹⁰⁾。こうした可能性は近接画像だけでも検討可能であり、小惑星に接近する探査をひとつでも多く実施することが望まれる。

地球近傍小惑星は年間1,000個程度も新たに発見されているし、地球重力に一時的に捕獲される小天体の可能性も指摘されている。小惑星の新発見を目指した宇宙望遠鏡の打上げや、軽量で安価な探査機を近地球型小惑星へ次々と送り込もうとするベンチャー企業もある³⁾。

宇宙資源の開発には、従来の衛星開発の現場ではあまり馴染みのない要素が加わる。理学的知見をベースとしながらも、土木工学、資源工学、建築学、ロボット工学、機械工学、経済学など幅広い関連分野を融合しつつ発展するに違いない。ひとたび経済的合理性に見合う物質・手法が見つければ、宇宙資源の利用は物資輸送や有人活動維持に革命をもたらすと考えられる。

参考文献

- 1) Lorenz, R. D. et al; Titan's inventory of organic surface materials, *Geophys. Res. Lett* 35 (2008), L02206.
- 2) McKay, M., McKay, D., Duke, M. (eds); *Space resources, Volume 1: Scenarios* (1992), 63pp.
- 3) Lewis, J.; *Asteroid Mining 101: Wealth for the new space economy* (2015), Deep Space Industries, 192pp.
- 4) DeMeo, F. E. and Carry, B.; Solar System evolution from compositional mapping of the asteroid belt, *Nature* 505 (2014), 629-634.
- 5) Hazen and Ausubel, On the nature and significance of rarity in mineralogy, *American Mineralogist*, 101, 1245-1251, 2016.
- 6) Granvik, M., Vaubaillon, J., Jedick, R.; The population of natural Earth satellites, *Icarus* 218 (2012), 262-277.
- 7) Colaprete, A., et al.; The detection of water within the LCROSS ejecta plume, *Science*, 330 (2010), 463-468.
- 8) Hendrix, A. R. and Yung, Y. L., *J. Astrobiology & Outreach*, 5, 2, 1000157, 2017.
- 9) Fujiwara, A. et al.; The rubble-pile asteroid Itokawa as observed by Hayabusa, *Science* 312 (2006), 1330-1334.
- 10) Miyamoto, H. et al.; Regolith migration and sorting on asteroid Itokawa, *Science* 316 (2007), 1011-1014.