

宇宙におけるマイクロマシンの夢

航空宇宙技術研究所
松本 甲太郎

宇宙のダウンサイジング

国産初の大型ロケット H-2 や宇宙ステーション実験モジュール JEM などの超大型宇宙開発が着々と進められているが、それと並行して最近のマイクロエレクトロニクスの進展を背景に、宇宙開発の小型化の研究が進められている。

宇宙開発の小型化の検討は米国において盛んであり、2000年頃を目標に総重量 5 kg 程度の衛星を開発する構想がある。今までに重量 16 kg 程度の試験機が作られ、重量 110 kg 級の冥王星探査計画が始められている、など宇宙開発のあらゆる計画において小型化が追求されている。

ここでは、月惑星協会の“宇宙におけるマイクロマシンの利用”検討分科会において、そのような小型化宇宙開発の極限の理想像として語られた、マイクロマシンによる宇宙開発への期待とその効果や課題あるいは可能性について、月/火星探査マイクロマシン・ローバー（以下 MM ローバー）を例に紹介してみたい。

マイクロマシンの特徴

マイクロマシンに集約される最近のメカトロニクス、ロボティクスの大きな特徴は、小型化、マルチ/群化、自律化、及び人との協調の4つと考えられる。マイクロマシンでは、特に、機器の小型化を始め、小さなものを数多く投入するマルチ/群化、小型の頭脳を持徴とする自律化などが強調されてくる点が大きな特徴であろうか？

月/火星探査マイクロマシン・ローバー “軽さ”こそ最大のメリット

マイクロマシンにより構成される MM ローバーの最大の特徴/インパクトは“軽い”と言う点である。地球から月・火星へ飛んでいくためには大量のエネルギー（燃料）が不可欠である。この点

で“軽い”と言うことにより MM ローバーは絶対的な優位にたてる可能性がある。一般に宇宙システムでは観測機器等のミッション機器の重量比は静止軌道のミッションの場合でも高々 1/300 程度に過ぎない。打上時に 260 トンある H-2 を用いても月周回軌道には高々 1 トン弱しか運べず、その内ミッションに直接関連する機器重量は 3 割程度に過ぎない。従ってミッション機器を“軽く”することにより、周辺の通信の通信/制御/電源/支持構造など衛星全体を超軽量化出来れば、全く新しい概念の宇宙システムが産み出される。

“たくさんのマイクロマシン”

MM ローバー概念の次の特徴は、マルチ化/群化の可能性である。従来の宇宙の概念では重量の点から 1~2 台のローバーに全てのミッションを託す概念しか考えられなかった。このため、ローバー機能は 2 重、3 重の冗長構成を取り、どこか 1 ケ所が故障してもローバーとしての機能を維持し続けるような 1 フェイル・オペラティブ設計が最低限必要と考えられてきた。しかし、マイクロマシン化により多数のローバーの投入が可能になるならば、1 システム・フェイル・オペラティブ、即ちどれか 1 台のローバーが故障しても残りのローバーでミッションが達成できるという概念が可能になる。さらにローバーの数が数十、数百にもなると、ミッション達成の考え方もオール・オア・ナッシングでなく、故障の発生と共に徐々にミッション機能が失われていくような graceful degradation の概念を取入れた MM ローバー・システムが可能になろう。

“頭脳の小型化”

頭脳のマイクロ化による MM ローバーのメリットは何であろうか？頭脳を構成する素子（計算機？）自体のマイクロ化と頭脳の知的マイクロ化に分け

て考える必要がある。素子自体のマイクロ化はローバー全体をマイクロ化する中で必然的に出てくるものであるから新たなインパクトは生じない。しかし、知的マイクロ化、すなわち制御や自律機能などのソフトウェアのマイクロ化、がローバー概念に与える影響は大きい。例えば、頭脳のマイクロ化に伴い地球との直接交信機能が削除され/あるいは縮小された場合、地球からの頻繁な支援無しで探査ミッションを達成するような高度な自律機能が必須となる。ブルックスが提唱しているリアクティブ・コントロール理論が有効性を示したので MM ローバーの成立性は高まっているが、ローバーに必要なその他の試料採取/分析機能などのマイクロ化は今後の検討に待つ必要がある。

宇宙用マイクロマシンの大きさ

マイクロマシンの定義では、cm 級のマシンからミリ、マイクロ級あたりがマイクロマシン本来のターゲットと考えられているようであるが、宇宙開発の小型化あるいはマイクロマシン化によりどこまで小さくできるのであろうか。

火星探査では、MM ローバーは着陸船の周囲を少なくとも 100 m、出来れば数 km 以上移動し、岩石標本を採取し、探査基地である着陸船まで運んでくる必要がある。このためには、MM ローバーには長距離の走行性と岩石を砕く堅牢性、及び重たい標本を運ぶための運搬性が求められ、それらの要求から自ずと大きさが決まってきた、最低でも 10 cm 程度は必要となるのではないだろうか？

NASA の小型化への努力

ここでは、NASA-JPL が進めている火星探査小型ローバーを紹介する。JPL ではブルックスの“単機能な小型昆虫型惑星ローバーを多数用いて故障に強い探査ローバーシステムを軽量に作る”という提案を受けて、それまでの大型火星探査ローバー路線から超小型ローバーへと研究を移している。96 年 12 月に打上を計画している MESUR

(火星環境探査ミッション) では、それまでのロッキー 3/4 を元に重量 7~9 kg 程度、全長 65 cm の小型ローバーと着陸船のペアを作り、着陸地点周囲 10~100 m の範囲を探査する予定である。

ブルックスの提案している「多数の単機能超小型ローバーによる故障に強いシステム」の概念は、従来の全ての機能を高信頼に作成し全体を 1 つの大型探査システムに組み上げると言う、NASA の伝統的宇宙開発手法からは大きく外れる新しい開発手法として注目される。

マザー・マイクロマシン

マイクロマシンによる超小型宇宙開発の先に、さらに進んだ構想としてマイクロマシンによる自己増殖システムが考えられている。

月・惑星の開発では、最終的には地球に依存せず、現地での資源、エネルギーなどの自給自足による自立が極めて重要である。そのひとつの形として自己増殖するマイクロマシンの構想が月面開発に向けて提案されている。

複雑な超大型宇宙システムを自己増殖させることは困難であるが、単機能で頭脳も簡単なマイクロマシンであれば自己増殖システムあるいは現地再生産システムも十分に期待できるのではないかと特に IC 技術によるマイクロマシン製造が可能になると、このシステムの実現性は一気に高まる。この場合にはマイクロマシン化作業機は、前述の MM ローバーよりはるかに小型で、殆んど蟻/昆虫程度の大きさになり、必要な作業量を数でこなすことになろう。

さらに、自己増殖システムの究極の形態としては火星/金星などの惑星改造を目指す「マザーマシン」構想がある。現在考えられている「マザーマシン」構想はかなり大規模な自己完結型の増殖マシンであるが、マイクロマシン化マザーマシンの働くイメージは、火星や金星の表面で蟻のような作業マシンがせっせと土壌を改良し、岩石から酸素や水を生産し空中に放出するとともに、残滓を女王マシン（マザー・マイクロマシン）に食べ

させ、仲間の作業マシンを増やしていく。初期には地球から多数送りこまれた女王マシンも中期以降には現地再生産が行われるようになり、100年～200年後にはマイクロマシンにより気候改良された火星と金星が人類を待っている。

マイクロマシンの課題

MM ロバーなどの超小型宇宙システムを現実のものにするためには、マイクロマシン実現への努力の中でも特に次の3点が重要な課題であろう。

- (1) 小さくても馬力があるマシン。
- (2) 集って統一体として何かタスクを実行できるマシン。
- (3) 再生産性のあるマシン。

マイクロマシンへの努力として、超小型機械の可能性を追及するとともに、その実用化、特に宇宙開発での実用化を考え、超小型化とは若干異なる側面の課題の解決も期待したい。

