

# 宇宙輸送の非対称性に基づく将来輸送系形態について

JAXA宇宙輸送ミッション本部 平岩 徹夫  
hiraiwa.tetsuo@jaxa.jp

## Abstract

本論文は、宇宙輸送特に将来宇宙輸送を“輸送”の面から考察し、適切な輸送とはなにかを考えることを目的としたものである。地上から地球周回軌道への輸送が大部分を占め、軌道からの輸送は有人を除きほぼ存在しないという本質的な非対称性は、宇宙空間でのインフラ整備、エネルギーおよび資源サイクルが成立するまで当面変化はない。そのため、将来輸送でも軌道への一方向輸送を重視した形態を目指すべきである。また、形態や輸送の必要充分条件を見直す手段として、“輸送”を包括するロジスティクスマネジメントの視点を導入することを提唱する。その上で、この視点から導かれる非対称性を持つ将来輸送に適切な形態案を提示する。

## はじめに

近年の民間宇宙輸送機開発が進展するのに対応するように、将来宇宙輸送研究は再び活気を取り戻しつつある。JAXA宇宙輸送ミッション本部は2012年から宇宙科学技術連合講演会において将来輸送研究開発に関わる関係者によるパネルディスカッションをスタートさせた。2013年からは将来輸送ワークショップを開くようになり、将来輸送への取り組みをさらに強化しようとしている。また内閣府宇宙政策委員会でも、宇宙輸送に関する長期ビジョンの検討を開始している。しかしHOPE開発が進んでいたころのような求心力は戻っておらず、大規模な研究開発や実証への道のりはまだ見えてこない。また、現時点でもハードウェアやその実証を中心とした研究が中心であり、システム実用後の周辺環境や開発後の経営状況をも考えたような輸送自体の議論は未着手のままである。このような状況に至ったのは1980年ごろから将来輸送の研究が進められているものの、宇宙輸送の本質に関する議論がなされていないためではないかと考える。多種多様なシステムや要素提案が平行して進められているのは技術レベル向上という目的もあるが、将来輸送技術に対する評価軸、すなわち将来に適切な宇宙輸送とはなにか、が定められていないからにほかならない。輸送独自技術の優劣や成熟度以外の独立なパラメータが存在しなくては、実用性や将来性の評価はできないからである。

本論文は、既存輸送(現在日本が保有する宇宙への輸送手段と定義する)の先にある宇宙輸送とはなにかを、改めて原点から考えるための視点の導入を提案するものである。新たな視点は既存の視点を包括し輸送全体を俯瞰するものとならなくてはならない。また、その視点は想定される将来のユーザやカスタマの希望を叶えることに立脚されたものでなくてはならないだろう。すなわち、現在や現時点想定できる程度の輸送要求を前提とせず、将来生ずるであろう輸送要求を見越した検討を行うべきであると考え。本論文では宇宙輸送を再考する視点として、産業活動や軍事活動において戦略と同等に用いられているロジスティクスマネジメントの導入を計る。この視点をを用いて、既存/将来輸送系の立ち位置を評価したのち、宇宙輸送が持つ性質、すなわち非対称性構造を導く。立ち位置と宇宙輸送の特性を見つけることで、将来宇宙輸送として適切なベクトルとなる輸送形態案例を導出する。本論文の目的はあくまでも新たな視点を導入による将来宇宙輸送の再考にあるため、形態案を結論とするものではない。繰り返すが:

を行い、あるべき将来輸送の形態について考察を進めたいと考える。本来、将来宇宙輸送は地上と軌道との輸送に特化したものではなく軌道間輸送なども取り扱いべきものであるが、本論文では特に地上-軌道の輸送に注目して考察を行う。

## 1.輸送をめぐる視点とロジスティクス

クレフェルトが(19世紀には)“戦略は兵站術の一付属品となった”と分析した<sup>1</sup>ように、輸送や物流はわれわれの日常の業務や活動において決定的な位置を占めている。昨今では企業活動や企業戦略の中核をなすものと見なされるようになってきた。たとえば経済ニュースなどで耳にするサプライチェーンマネジメント(Supply chain management, SCM)という概念は、企業の活動全体、つまり製造業であれば原材料調達から配送までの輸送が絡む活動全体を一括して戦略に適した形態となさしめるものである。宇宙開発においては、これまで物流、SCMなど、モノヒトの移動に関する新しい概念が適用されたことがない。しかし、視点や概念がどうであれ、これまで宇宙輸送は宇宙戦略の要を担ってきた。宇宙利用や宇宙探査など宇宙空間での活動すべてが、宇宙へおよび宇宙空間での移動手段の存在を前提としているからである。宇宙輸送つまりロケットの開発が宇宙開発が始まった1950年代以降常にその中心にあったことから、その位置づけがわかる。したがって将来を考えるのであれば、宇宙開発の土台ともいえるべき“輸送”を抜本的に考え直す必然性がここにある。

宇宙輸送は当然であるが、輸送の一形態である。それゆえ、宇宙輸送を考えるには“輸送”自体の考察を必要とする。その“輸送”についての学問的な考察がはじまったのは、しかしそれほど昔ではない。20世紀初頭、マーケティングという概念が浮上した際に物的流通機能として定義されたことがきっかけである。近代的な“輸送”の考察は1960年代以降に成立したと考えて間違いはない。しかし輸送自体についてまとめた文献は多くはなく、ビジネス書などを紐解いてみても定義も不明瞭な場合が多い。JIS規格においては、物流用語としてのみ定義されている<sup>2</sup>。これによれば:

輸送: 貨物をトラック、船舶、鉄道車両、航空機、その他の輸送機関によって、ある地点から他の地点へ移動させること

すなわち地上二点間の移動行為を輸送と定義している。この定義に従えば、サブオービタルなどの地上に戻る宇宙観光は基本的に輸送には分類されない。

輸送に類似の言葉に、物流とロジスティクスがある。これらもやはりおなじJISの物流用語に収録されており、以下のように定義されている。

- 1) ロジスティクスマネジメントの視点の導入
- 2) 既存/将来輸送系研究の立ち位置の評価
- 3) 宇宙輸送の非対称性についての考察

物流： 物資を供給者から需要者へ、時間的及び空間的に移動する過程の活動

ロジスティクス：

物流の諸機能を高度化し、調達、生産、販売、回収などの分野を統合して、需要と供給の適正化を図るとともに顧客満足を向上させ、併せて環境保全、安全対策等をはじめとした社会的課題への対応を目指す戦略的な経営管理

すなわち、a)輸送とは物流の手段である、b)物流とは、輸送を巡る活動たとえば輸送手段の調達、効率的な配送の手配などをまとめたもの、c)ロジスティクスとは物流を包括する戦略的な管理方法、であることを意味している。これを図式化すると図1のように考えることができる<sup>3</sup>。この図には“輸送”が含まれていないが、輸送は物流(管理)の中にある点(手段)として考えればよい。

輸送の上位にある物流とロジスティクスだが、管理とマネジメントとあって、両者の違いがわかりにくい。これは文献<sup>4</sup>によれば表1にあげるように、物流は配送移動に関する管理機能、ロジスティクスは生産、移動などの機能やその情報も制御するマネジメントと定義されている。物流の目的が、コストや効率に特化していることに注意を払いたい。一方のロジスティクス(マネジメント)は移動させるものや移動させる側(オペレータ側)の視点ではなく、移動してもらう側(マーケット側)を中心とした視点であり、コスト削減や効率向上を目的ではなく手段として扱う経営管理である。複雑になる物流において単に効率化やコスト低減を局所的にめざすと他部門の非効率化を招き、全体の効率を阻害することがある。これをさけるためのマネジメント<sup>5</sup>である。したがって、地上の経済活動から軌道上の活動も包括した宇宙利用や宇宙戦略を考えるのであれば、ロジスティクスマネジメントは最低限獲得しておかねばならない視点であると言える。

輸送からロジスティクスに至るには、実際の輸送の仕組みの変化があって成立してきたとされている。輸送において最も大規模で長距離の移送を行ってきたのは、海運である。陸上での輸送が人馬に頼らざるを得なかった19世紀まで海運は輸送の中核をなしていたといつてよい。この海運は、コンテナ輸送が導入された1950年代から大きな変化が生じている。このコンテナ輸送と呼ばれる輸送形態は、原材料輸送(原油、鉄鉱石など)を除く海運運送量の40%を占めている<sup>6</sup>。コンテナ輸送はハードウェアとしてのコンテナの発明が重要ではなく、コンテナを船舶、鉄道、トラック輸送などと共通化し一元化したコンセプトによる流通の革命であった<sup>7</sup>。この革命を元に、輸送は物流(physical distribution)、ロジスティクスマネジメント、サプライチェーンマネジメントとその視野とコンセプトを拡大、発達してきた。

ロジスティクスという概念が発達、浸透するまでには、表2のような歴史があったとされている<sup>8,9,10</sup>。60~70年代は、輸送の効率化とコストダウンが重要であるとする“物流”という考え方が一般的であった。これを支えたのが、コンテナ、コンベア、立体倉庫、フォークリフトなどの新技術による大量処理と省力化である。そのため物流=輸送技術、保管技術、荷役技術だという意識を生み出したと言われている<sup>11</sup>。宇宙輸送においても、70年代はスペースシャトルという再使用宇宙機が実現したことで、新技術が輸送を変えるイメージが広がった時期と言えるだろう。しかしその後の右肩上がりの成長は終わり、単なる効率化やコスト低減をめざすだけでは生き延びられない厳しい競

争の時代となる。そのため90年代以降は、顧客要求や市場に適用するために生産や輸送、在庫全体を適正化を計るマネジメントへと変化していった。2000年代以降は原料調達から消費者配送までを全体で考え経営戦略を支えるSCMへと成長してきている。

このように輸送を巡る視点、概念は第二次世界大戦以降急速に発達、拡張してきたと言える。本論文では、軌道上での生産や経済活動が行われていないことを考え、SCMではなくロジスティクスマネジメント的視点の適用を以降考えていく。

## 2.宇宙輸送開発の歴史と将来輸送の立ち位置

このように輸送を巡る視点は、世界的な経済活動を支えるべく視野を拡大させマネジメントへと発達してきた。実際の輸送や物流の活動を分析し、改善する過程において視点は成長してきたと言えるだろう。宇宙輸送も、上記の輸送、物流のコンセプトの変化と時期を同じくして成長、拡大してきた。しかしながら宇宙“輸送”自体についての検討は、まだ成長途上でもあるため、地上輸送ほどの考察は行われていないのが実情である。NASAのテクニカルサーバにおいても、“transportation”の定義から宇宙輸送を解析した文献はほとんど見当たらない(Appendix 1参照)。また、これまで約40年ほどの歴史を持つ宇宙輸送シンポジウムにおいても、輸送自体の考察はいくつかの例<sup>12</sup>を除きなされたことがなく、ほぼ一貫して輸送手段のシステムとそれを構成するコンポーネント(推進系や機体)の検討に終始している。したがって、既存および将来宇宙輸送の研究開発が抱える視点について、その根本から考察するのは有意義であると考えられる。ここでは将来輸送系や既存輸送系と分類してそれぞれの立ち位置、つまり“輸送”をどのように定義しているかを検討してみたい。

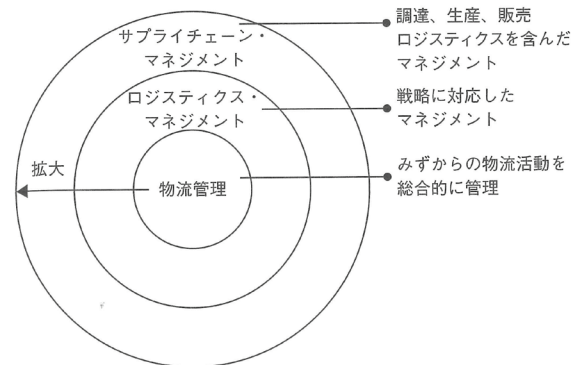


図1 物流、ロジスティクス、サプライチェーンマネジメントが対象とする領域(視野)

表1 物流管理とロジスティクスマネジメントの違い

	物流管理	ロジスティクスマネジメント
管理目的	物流活動の効率化 …必要能力の確保とコスト削減	市場適合化 …戦略に基づく効果と効率のバランス
管理対象	商品の流れに求められる活動 …仕入れ、生産から顧客まで	商品の流れの全体系 …原材料調達から販売まで
管理領域	自社領域	調達から市場までの流過程全体
その他	戦術重視 求心的指向 プロダクトアウト 定性的モノ中心	戦略重視 拡散的指向 マーケットイン 定量的移動量中心

\*資料3も参照し簡略化している

表2 輸送、物流を巡る概念の成長

年代	時代の要請、傾向	内容
'50s	生産量と輸送量のアンバランス	急速な生産性向上に追従できない非効率な流通の問題が顕在化
'60s	物流の流通の改善	物流の問題点把握、概念化 コンテナによる流通の一元化開始
'70s	新技術による物流技術革新	コンテナ船などによる技術革新 大量物流の実現
'80s	多頻度小口物流への要求	石油危機後の経済停滞 小口物流に関わる物流管理方策の登場
'90s	戦略的物流への拡張	ロジスティクス、マーケティング、経営戦略との統合

表3 宇宙輸送機の世代と変化

時期	世代	代表的な形態	内容
～1965	1	ミサイル転用輸送機	黎明期 打ち上げ能力を重視
～1972	1.5	部分新開発宇宙輸送機	実用期 月探査向け大規模投入能力をめざした
1972(～2011)	2	スペースシャトル/再使用輸送機	再使用 再使用による商業利用を考慮 コスト削減には失敗
1980～	3	宇宙輸送専用輸送機	商業利用 本格的な宇宙輸送専用機 コスト、効率重視

## 1) 宇宙輸送と輸送機開発の歴史と分類

まずはじめに、ロジスティクスの発達と比較すべく、宇宙輸送機開発の流れをまとめてみたい。Ballardがロシアの宇宙輸送機を第一、第二世代とまとめた<sup>13)</sup>のになら、整理してみる。

1950-60年代は第一期宇宙開発競争の時代であり、とにかく軌道へ打ち上げる能力の向上を短期に目指した時期とまとめられるだろう。そのために既存のミサイルを輸送機に仕立てあげることから始まった。SoyuzやRedstone、Atlasがこれに相当する。これを第一世代宇宙輸送機としよう。1960年代中盤以降は、ミサイル転用の輸送機に限界が見えてきたため、宇宙輸送専用の機体の開発が始まった。ProtonやSaturn系ロケットがこれに相当しており、過渡期ということで1.5世代輸送機とする。コンセプトとしてはその後の第三世代と似通ったものではあるが、商業打ち上げを考慮していない点を考えれば過渡期のロケットと分類するのが適切である。なお第三世代輸送機は第二世代に相当する1970年代の再使用輸送機開発(事実上実用化できたのはスペースシャトルおよびブランのみ)を経た後の1980年代に登場する。たとえばZenit、AtlasIII/V、DeltaIV、Ariane4/5、H-II/IIAがこれに相当する。軍事用打ち上げの減少が見えてきたため、商業打ち上げを考慮コスト低減や効率向上を重視した。

このようにみれば、60年代までは実用化を、70年代からはコスト、効率を考えた輸送機の開発となっているとみてよいだろう。70年代は潮目の時期に相当しており、単なる実用から一歩踏み出し、まずは新技術を導入してコスト、効率を向上させることを目指した。80年代以降はそれに加えて商業打ち上げが可能な機体を開発してきていると考えればよい。整理すると表3の通りとなる。大きくまとめると実用化を目指した60年代->再使用を目指した70年代->商業活動考えた80年代以降と三世代に分類できると考える。これは表2のと3を比較してわかるように、輸送の視点の成長、すなわち物流という視点が成立する60年代、新技術導入による効率化を重視する70年代、コスト、効率が重視される80年代と、よく符合していることがわかる。

## 2) 将来宇宙輸送研究の位置と視野

将来宇宙輸送研究がいつ生まれたかは明確ではないが、ミサイル転用ではない再使用宇宙輸送の形態を構想したvon Braun<sup>14)</sup>により、1950年代からスタートしたとして間違いはないだろう。このときより、将来輸送≒再使用宇宙輸送というイメージが出来上がったとみてよい。一方、日本において将来宇宙輸送研究というものがはじまったのは1980年代である。70から80年代に第二世代機となるスペースシャトルやオリオンエクスプレス構想が登場したことにより、HOPE、HIMESやスクラムジェットエンジンなどの検討研究が始まったのが嚆矢である。以

来40年近く研究開発が行われてきており、現時点進められている将来輸送系研究は表4のようにまとめられる。

2014年2月には、このような活動の将来方針を定める構想案が宇宙政策委員会より公開された<sup>15)</sup>。この資料は将来輸送系の技術開発項目を取り込み、将来宇宙輸送システム実現への三つのルート:単段式再使用ロケット、エアブリーザを使用する単段もしくは二段式、を考察、将来構想として提案したものである。一貫して、使い捨て型機体の正常発展形態とする再使用輸送機を重視し、そのハードウェア、システムの実現をめざしているのが特徴である。輸送やロジスティクスの評価つまり輸送の質、量などに関する考察はなく、将来宇宙活動の簡易なイメージのみとなっている。打ち上げコストの考察は含まれているものの、基本的に1994年や1998年の古い海外の資料に基づくものであり独自の調査、検討や考察は行っていない<sup>16)</sup>。このように、将来輸送系研究開発の視点はハードやシステム近傍に限られていることがわかる。これを図示すると図2のようになる。新技術(=再使用能力)による輸送のコスト低減、効率化を重視する第二世代機つまり70年代的視野を今なお保っていると言えよう。

## 3) 既存宇宙輸送の位置と視野

1980年代以降に開発、運用された第三世代輸送機の特徴は、商業打ち上げを考慮したコスト低減、効率向上を全面に押し出したところにある。ソビエト連邦崩壊の前後から打ち上げ需要が世界的に急減したため、商業打ち上げ市場というものが登場するようになったのはよく知られている。この時期に登場した第三世代

表4 現在進行中の将来輸送系研究

機体系	
有翼:	再使用宇宙往還機(JAXA輸本) 有翼ロケット実験機(九州工大)
垂直離着陸:	再使用観測ロケット(JAXA宇宙研)
エンジン系	
エアブリーザ:	RBCC(JAXA輸本) PCRJ(JAXA航本) PDE(名古屋大学など)
ロケットエンジン:	再使用エンジン(JAXA)
その他	
軌道エレベータ(日大、静岡大など)	

注)

RBCC: rocket-based combined cycleエンジン...ロケットと空気取り入れ型エンジンの複合エンジン PCRJ: pre-cooled ramjet engine...流入気流を燃料で冷却し極超音速でも使用可能にしたラムジェットエンジン PDE: pulse-detonation engine...アトネーションを利用したエンジン



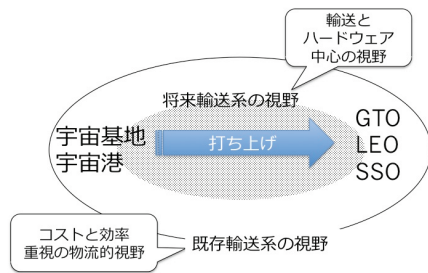


図2 将来輸送系と既存輸送系の視野

機は、第二世代の再使用輸送機スペースシャトルのコスト削減、効率向上という目的を色濃く持っていることに特徴がある。またシャトルの運行費の高騰に対して再考した機体になっている。そのため新技術(再使用)は使わずに旧来の技術(使い捨て)をベースとした、運行上のコスト削減、効率向上をめざしたものになった。したがって、既存輸送系は図2にあるような“輸送”の周辺領域を含めた視点を元に開発、運用されているとみてよい。既存輸送は、時代背景上も“輸送”における80年代の物流概念とシンクロしていると言えるだろう。コスト削減や効率向上を目標とするのはこの視点が理由であり、まだそれらを手段として扱うロジスティクスマネジメント的視点には立っていないことを示している。だが、ヨーロッパではこの視点、枠組みを越えようとする動きがみられる。その一例がAriane6であるので次に検討してみたい。

#### 4) Ariane6の立ち位置と視野

Ariane6(以下A6)は、1、2段を固体推進薬とした2020年就役予定の新型機である。A6は“Triple7”...7年という短期の開発期間で、GTO最大7トン(実際は6.5トンを狙う)、価格は€70Mをターゲット...をキーワードとした機体である。2013年10月のPRRに向けたPhaseA検討が終わり、2014年秋のEU閣僚級会合で予定されるA6開発決定に向けてのPhaseB検討が進められている<sup>17</sup>。この検討でA6の形態、オペレーション、射点構成を決定し本格開発を目指すこととしている。

A6は、既存のAriane5(以下A5)の形態とは上段を除き大きく異なっている。エンジンはロケットの最重要デバイスであるため、その性能向上は常に重要視されてきた。その結果、一段目用として水素やケロシンなどの液体燃料を用いるエンジンが採用されてきた。しかし、A6では1-2段に比推力で液体系に劣る固体推進薬を選んでおり、DLR長官自ら業界紙上で、産業界や環境への影響を考えると正しい選択だとは納得できないと主張するまでに至っている<sup>18</sup>。そのようにEU内部でも強行な反対意見があるようなA6形態をなぜ選んだのか。これについては、A6開発を主導するCNESが自らの広報誌CNESmag<sup>19</sup>にて説明を試みている。この冊子によればA6開発に際して以下の二点に注目したとする：

Ariane5の近い将来における競争力低下：

A5はGTOへのデュアルローンチ能力により競争力を確立、維持しており、現在の商業衛星打ち上げ市場において約半分のシェアを持つ。しかし、この長所は衛星のトレンドが変わってきているため、今後短所になる。

#### 衛星需要の変化：

今後10年で電気推進が商業衛星でも主力になり、現在の4~5トンクラスでも質量が最大半減、だいたい3トンクラスへと低下するパラダイムシフトが生ずると予想。商業衛星市場では小型衛星が今後1/3を占める。また打ち上げ需要は低下傾向にあると判断する。

以上の分析より、CNES/ESAは時代の変化に対応し採算が取れる打ち上げシステムへと転換する必要があると判断した。機体はトレンドを最大限カバーできるように、デュアルからシングルローンチへ、GTO投入量も最大6.5トンと削減する。また全体のコスト半減を目指し1~2段めは固体を選択する。すなわち共通形態の固体ブースタを量産することによる製造コスト削減、ブースタの作り置き+射点での機体組み立て(plug & play)により射点設備を簡略化し維持コスト削減を行う。液体ロケットエンジンは工数手間が多く、射点近傍の供給設備も必要でありコスト低減には適切な形態ではないと判断している。このような改革を実施するためA5向けサプライチェーンの全面改訂を計る。このような競争力維持方策をまとめると表5のようになる。

このようにA6は、マーケットシェア確保のために打ち上げ機の構成、サプライチェーンと産業構造全体を組み替えた、EUの宇宙輸送としての最適化を目指した輸送機といえる。戦略と市場を重視し、ロジスティクスマネジメント上適切な形態を目指したものといえよう。ロジスティクスではコスト低減や効率向上よりも、目的、戦略に適切かカスタムにとって適切かが重視される。その視点から見れば、エンジン性能は多少下がってもかまわないし、不要となるVulcan2エンジンや一段目製造組立のサプライチェーンやインフラ、研究開発能力を切り捨てるのも適切なこととなる。CNESによれば、既存のAriane5製造に関連する150社のうち、100社を切り捨て残りの50社でAriane6を製造する予定である<sup>20</sup>。Ariane6の背後にある視点を図示すると図3のようになる。

以上の分析より、A6のそれを除けば、基本的に宇宙輸送を巡る視点/視野は地上輸送や産業構造を巡るそれと比較して遅れをとっており、将来存在するであろう要求や期待される輸送量を考え

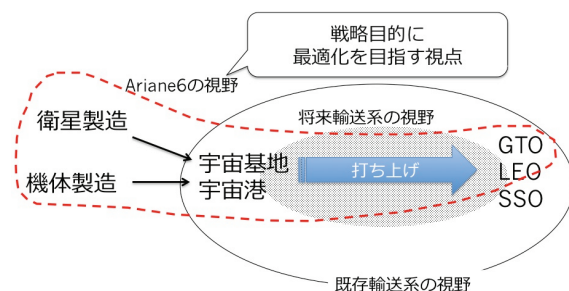
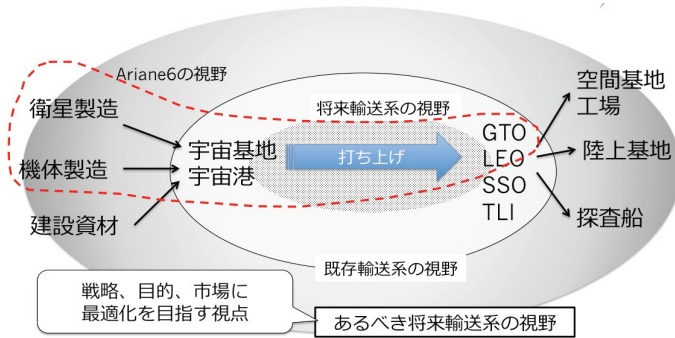


図3 Ariane6開発におけるCNES/ESAの視野

表5 Ariane6開発で計画されている競争力維持対策と目標

対策	目的目標
サプライチェーン全面刷新	EU内ロジスティクス最適化 研究開発資源集約
シングルローンチ化	市場適合 競争力維持
固体主推進系	生産効率向上 研究開発費、射点インフラ削減
主推進系作り置き	生産効率向上 量産効果 打ち上げ即時性向上
射点での機体組み立て	作業効率向上 打ち上げプロセス簡易化 射点インフラ削減



る視点ではなく、狭い範囲での最適化しかなされていないことがわかる。既存輸送ではサプライチェーンやインフラ、需要を引き続き満たさねばならず、容易な変換は難しい。しかし将来輸送研究は制約は少ないため、時間的にも空間的にも大きく見据えた視点をもった検討が可能である。そもそも、輸送系研究開発とは輸送、つまり二地点間の移動に関することすべてを担うものであり、ハードウェアに特化した研究では本質からしてあり得ない。また将来輸送系の研究は、既存輸送の将来の方向性を見いだすブレカーサの役割も果たさねばならないことから、それを包括する研究領域を持たなくてはならない。この二つを実現するためには、将来輸送系が見るべき領域を地球上のサプライチェーンから軌道上や月、惑星上存在する(と仮想する)カスタマへのモノ、ヒト、情報の移送全体とする見方を取るべきである(図4参照)。こういう視点からすれば、長期ビジョン案にてわずかな記述に終始している軌道間や惑星間輸送も将来輸送の重要な項目となることが理解できる。

では対象となる将来の輸送にはどのような特質があるかを、次に考察してみたい。

### 3. 宇宙輸送の本質と非対称性

ロジスティクスマネジメントを導入するか否かにかかわらず、宇宙輸送が輸送としてどのような“性質”を持っているかがわからなければ、適切なマネジメントもシステムも構築できない。輸送においては、どのようなものを、どの程度の量を、どのような場所に、どのくらいの期間に移動させるかが問われる。宇宙輸送においては出来るだけ短時間に、地上から宇宙へ、宇宙から地上へもしくはある軌道や星から別の軌道や星へと移動させることを意味する。後者の惑星間もしくは軌道間は現在軌道間輸送という名称で国際的に議論が進んでいるのでここでは議論せず、もっぱら地上と軌道との輸送を考える。既存輸送においては、直径4m程度、質量3~6トンの衛星をGTOやLEOなどへ適切な時間に投入することが要求されており、既存宇宙輸送におけるモノと量への要求は明確であるといえる。しかしながら将来予測がはなはだ難しい事もあり、資料15の宇宙輸送長期ビジョンからもわかるように日本において将来の宇宙輸送の質と量についての検討や議論は少ない。だが、この点を全くの仮定なしで考えることは危険である。そこで蓋然性が高い輸送量と形態を考察してみたい。

#### 1) 将来輸送に要求される輸送量と期間

将来輸送で必要とされる輸送量は、現状よりも遥かに増加していると仮定する。この仮定は自明である。輸送量が今後も現状と同程度もしくは減少するのであれば、既存輸送のみで賄えるわけであり、将来輸送をそもそも考察する必要はないからである。

ではどの程度まで増加するかが次の問題になる。表6に2013

年に打ち上げられた輸送機とLEOに対する年間最大投入可能量を示す。実際に打ち上げられたペイロード質量ではなく、ロケットが搭載できる最大量から概算したものである。それぞれの機体の公称LEO最大投入量を代表値としており、軌道傾斜角や投入軌道高度による差異は無視している。この結果から、現時点でも年間に1000トンを超えるペイロードをLEOに投入できることがわかる。各ロケットの年間最大供給可能基数は資料がなく不明だが、二倍としても現在年間2000トンは投入できる(射場や推進薬の供給などの周辺状況は無視している)と考えられよう。

一方、火星向けの有人探査には約400トンから1200トンの投入量が予定されている<sup>21)</sup>ので、将来輸送はこの輸送も担わねばならない。もちろん非常にラフな数値であるが、将来輸送が必要となるときの年間輸送必要量は既存輸送の1000トンに探査は年一回行われるとして約1000トン、計最低2000トンあると考えればよい。

もう一つの問題は、現時点から比較すれば圧倒的な輸送量をどのくらいの頻度でこなすのかという輸送の時間にある。軌道上や他惑星などでのプロジェクトは、地上の環境以上に厳しく多量の補給物資が必要となる環境での作業となる。放射線や太陽風の影響も最小限になるようにしなくては、作業期間中の投入機材の劣化の恐れも出てくる。したがってプロジェクトの工期短縮、工程低減は死活的な要求になる。このような要求に対し輸送に必要とされるのは、輸送期間の短縮と輸送の即時性になろう。地上のプ

表6 宇宙への輸送能力(Earth to Orbit、以下EtO)

Rocket	Country	Launches	Successes	Payload capacity [kg]	Total capacity [kg]
Antares	USA	2	2	5000	10000
Ariane 5	EU	4	4	21000	84000
Atlas V	USA	8	8	29400	235200
Delta IV	USA	3	3	22560	67680
Dnepr	UKR	2	2	4500	9000
Epsilon	JPN	1	1	1200	1200
Falcon 9	USA	3	3	13150	39450
H-IIA	JPN	1	1	15000	15000
H-IIB	JPN	1	1	19000	19000
Kuaizhou	CHN	1	1	1500	1500
Long March 2	CHN	5	5	8400	42000
Long March 3	CHN	3	3	5500	16500
Long March 4	CHN	6	5	2800	16800
Minotaur I	USA	1	1	580	580
Minotaur IV	USA	1	1	1735	1735
Naro	KOR	1	1	100	100
Pegasus-XL	USA	1	1	443	443
PSLV	IND	3	3	3250	9750
Proton	RUS	15	13	20700	310500
Soyuz	RUS	16	16	7800	124800
Vega	Europe	1	1	1500	1500
Zenit	UKR	2	1	13740	27480
sum		81	77		1034218

表7 地上への輸送能力(Orbit to Earth、以下OtE)

Capsule/ Vehicle	Country	Reentry	Successes	Payload capacity [kg]	Total capacity [kg]
Soyuz	RUS	4	4	500	2000
Shenzhou	CHN	1	1	1000	1000
Dragon	USA	1	1	2500	2500
sum		6	6	4000	5500

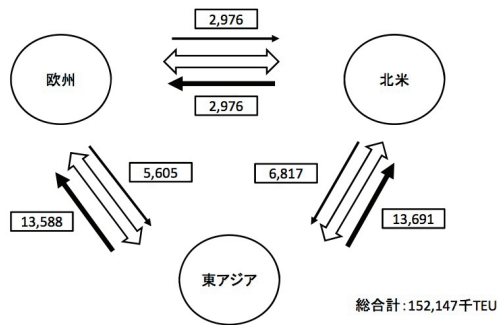


図5 2010年時のコンテナ輸送のインバランス

ラントや工場より特定の日に特定の空間、場所に、多量に輸送されてはじめて、プロジェクトが望む工程削減、工期短縮が可能となる。したがって、宇宙空間上への将来輸送は年間2000トン以上の物資を、できるだけ短期に、適切なタイミングに輸送するものと結論されよう。

## 2) 宇宙輸送の非対称性

表7に2013年の軌道から地上への輸送量をまとめている。ここでも各機体、カプセルの搭載量は最大可能量として換算すると、年間約5.5トンの輸送量となる。表6の結果と比較すると、EtOは1000トン、OtEは5.5トンであり180倍にも達する極端な非対称性をもっていることがわかる。日本の宇宙輸送も同様で、これまで日本が投入してきた輸送量(実績ベース)をまとめる<sup>22</sup>と以下の通りになる。

EtO	250トン*
OtE	6トン

\*IGS、国外の機体による国産商業衛星を除く

こちらでも約40/1という比率になっており、EtOが宇宙輸送の大部分を占めていることがわかる。

この輸送量の非対称性は、特に検討されておくべきである。通常輸送においては、往復での輸送量が適切であることが効率上好ましいからである。しかしこのような非対称輸送はめずらしいものではない。特に明瞭なのは原材料輸送である。たとえば原油、LNG、鉄鉱石などのエネルギー、鉱物資源輸送では、往復の不均衡ははなはだしい。コンテナ輸送でも非対称性は大きな問題である。なぜなら、このような非対称性はぎりぎりまでしぼられた輸送のコストに大きく関わってくるからである。このコンテナなどにおける非対称性はインバランスとよばれている。図5に2010年の領域間コンテナ移動量(TEUは20ftコンテナ相当数を示す単位)を示す<sup>23</sup>。北米と欧州間は双方均衡がとれているものの、製造拠点や資源を有する東アジアとでは北米、欧州からを1とした場合、アジアからの輸送量は2倍近く多い。空のコンテナを移送することはコスト上の負担も少なくなく、全世界のCO2排出量の3%を占める海運でもこのような非対称性による環境への影響が懸念されている。

宇宙輸送において輸送量の非対称性が緩和されるのは、軌道上からの輸送量が増える場合に限られる。軌道上から地上への輸送量が増えたとすれば、軌道上もしくは他惑星上などでの資源、エネルギー、生産物を移動させる要求が生じた場合であり、そのためには宇宙空間でのエネルギー、原材料調達やその消費、加工などの産業インフラが構築されている必要がある。その実現には、よりいっそうのEtO輸送が必要となろう。したがって、非対称性は相当の長期間に渡って解消されないものと考えねばならない。

表8 軌道との往還に必要な機材への要求にある非対称性

	EtO	OtE
推進系サイズ、能力	大型	微小
必要推進薬量	80%以上	微小
熱防御能力	一部	ほぼ全面
揚力	不要	好ましい
射点	必要	不要
回収	不要	必要

またもう一つ考慮しなくてはならないのは、EtO、OtEの輸送行程の非対称性である。軌道間の輸送では基本的に加減速だけで、飛行環境には差はない。しかし軌道―地上間輸送では事は単純ではない。単純に考えても表8のような相違がある。

スペースシャトルで明らかになったように、このような性質を兼ね備えた機体は非常に複雑なものとなる。とりわけ両者を兼ね備えた大量輸送用の大型機体は技術的に成立が可能であっても、開発するのが適切か否かは別問題である。古い例では、空/海軍共用化をめざしたアメリカのF-111戦闘爆撃機という例がある。空/海軍の共通しない種々の要求をかなえようとしたためF-111の機体は大型化しコストは高く、当初予定していた共用による開発、製造などのコスト削減と運用の効率化という意図は達成できなかった<sup>24</sup>。宇宙空間という地球上では考えられないほど厳しい環境との輸送を考えるのであれば、できるだけ機能は単純であるべきであり、環境に適した輸送機を使用するのが適切であると考ええる。

以上のように将来宇宙輸送研究が考えねばならない“輸送”とは、輸送量上も要求機能上も非対称であることを前提とし、その上で年間2000トン以上の多量なモノを短期に適切なタイミングに軌道上や惑星などへ運ぶ事と結論される。

## 4. 将来宇宙輸送に必要な輸送形態

これまでの議論で、ロジスティクスマネジメントの観点や将来の宇宙輸送の視点や内容を概観した。その結果をここでまとめる以下のようになるう：

- 1) 輸送を考察する視点を考える必要性
  - 輸送自体のコスト削減、効率向上を目的とするだけでは、適切な輸送形態を考えるには不足
  - 将来の市場やカスタマの視点から輸送形態を考察
- 2) ロジスティクスマネジメント視点による宇宙輸送の再考
  - 地上の活動から惑星などまでを全体を見通す視野の必要
  - 既存宇宙輸送も包含できる研究領域
- 3) 宇宙輸送の本質と非対称性
  - 特に地上―軌道輸送では、輸送量および輸送機の形態に著しい非対称性
  - 大量のモノ、ヒトを短期かつ即時性移動できる輸送システムが必要

したがって、宇宙での将来マーケット、すなわち空間や惑星上などでのプロジェクトや開発に対応して、将来宇宙輸送はカスタマが必要とする工程削減や工期短縮をかなえることが必要であり、

軌道上への一方向に、大量に輸送できる輸送機

がもっとも好ましい形態であると結論される。この結論に対して適切な輸送系は、シャトル、SSTOなどにみられる完全再使用で



きる機体を利用したものではない。これらの機体は軌道上投入総量(injected mass to low earth orbit, IMLEO)に対してペイロードが少なく、また軌道上に投入した大部分の質量を輸送にほとんど役立てる事なく、エネルギーを散逸させてしまう。大きな機体を軌道上にあげておくことは、軌道上から地上への輸送に使用しないときは単なるエネルギーや資源の損失でしかなく、それはコスト増、環境破壊につながっていく。完全再使用機が優位になるのは、1)OtoE輸送がEtO輸送と同程度となる、2)人的輸送のように軌道からのペイロードが貴重なもの、脆弱なもので、地上への軟着陸のような運用能力を活かせるとき、とになる。したがって当面、完全再使用機は将来宇宙輸送に対する主要な要求を満足するものとは言えない。

EtOの大量輸送を満たす形態例を挙げるとすれば：

#### A) 非再使用輸送系

(Recyclable, reducible launch vehicle, RRLV)

- 地上から軌道への輸送により特化した機体、たとえば軌道上で捨てることのない[recyclable]機体
- 軌道への無駄な投入量がすくない[reducible]機体など

#### B) 部分再使用輸送系

(Partial reusable launch vehicle, PRLV)

- 軌道に乗らない部分を再使用するフライバック/フォワードブースタなど
- 上段は、軌道上に投入されたのち投棄することがない再利用機(RRLV)

以上の結論は、しかしすでに第一世代RLVたるスペースシャトルの運用でほぼ明らかにされていると考えてよい。2011年に完工した国際宇宙ステーションに対する輸送について、論文21がまとめている。これによれば、約400トンのISSを建造するに際し、28回におよぶスペースシャトルによるIMLEOは約2800トンとなった。図6に年毎の軌道投入量の推移を示す。シャトルの場合、ペイロードは最大18トンなのに対し、軌道まであがる機体の質量は94トン程度、IMLEOは112トンにもなる。ペイロードは軌道に投入された全質量の内約15%でしかない。図に示すように、一部Protonで投入した分を無視しても、ISSの質量とIMLEO総量の比は400/2800~14%となり、IMLEOの大部分がシャトル自体の質量であったことを示している。論文21ではこの例を示し、今後計画される火星探査ではこのような無駄な質量投入はコスト削減にはつながらないと警告を発している(注)。たとえばIMLEO約130トンのSaturnVであれば4回程度の投入で済むわけで、シャトルのような少量輸送機は好ましくないとしている。

注： 実質の輸送コストについてはしかし、スペースシャトルは悪いものではなかったことをここで示しておく。Pielkeらがまとめたところによれば、1991年から2010年までのシャトルの打ち上げ費用は平均\$1000Mであった<sup>25</sup>(1990年代では一回あたり\$600M<sup>26</sup>)。この値を対ペイロード質量で換算すると、\$55M/tonというきわめて高額な金額となる。しかし対IMLEOであれば、一桁小さい\$8.9M/tonとなりELVと比較に足る値となる。たとえばH-IIBでは16.5トンのHTVを投入するのに対し140億円<sup>27</sup>が費やされており、8.75億円/トンとなる(H-IIB二段目の空虚質量3.4トンも含めると7億円/トン)。したがって、シャトルもIMLEOでみればELVと大差なかったし、(ペイロード輸送の)コスト増大を招いたのは再使用形態を選択したためであると言える。

以上の議論では将来には大量輸送が必要であり、小口多頻度輸送となる再使用輸送機では将来の需要を満たせない可能性を示した。この検討はラフなものであるため今後詳細な検討を実施しておく必要があるが、将来輸送では大規模輸送を想定した上で、輸送の非対称性を前提とした片道大型輸送機形態が好ましいと考

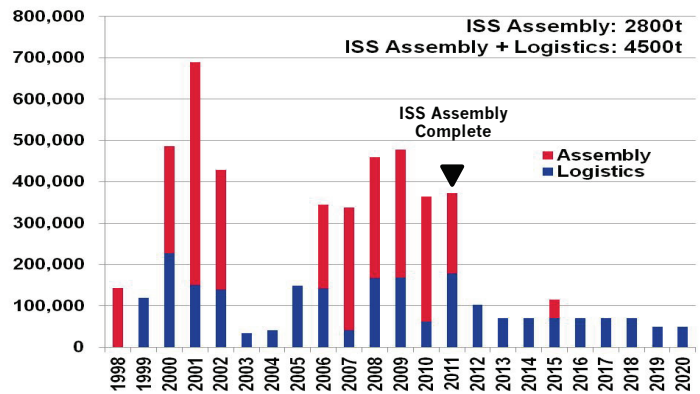


図6 ISS建設に要したIMLEOの年度別推移

えられよう。この方針を持つことではじめて、将来誕生するであろう新たな顧客要求に対しても答えられる信頼に足る輸送形態を作り出せることになるだろう。

## 5. 将来宇宙輸送の待ち受ける未来

ここまでは、輸送や地球-軌道上間の輸送に内包される質を検討する事で、将来輸送で本来必要とされるであろう輸送形態の考察を行ってきた。その上で資料15で主張するように低コストな輸送を望むのであれば、それが実現された場合にはどのような経営環境となるかも考えておかねばならない。既存の海運、航空会社と同様に持続可能性、商業採算性などの運用を巡る条件は、マネジメント上常に考えておかねばならないものだからである。

この検討には、地上輸送の実例を比較対象として考える。ヒト、モノの二地点間の移動という輸送の本質は、地上も宇宙もなにも異なる事はない。これまで宇宙輸送のアナログもしくは比較対称として選択されるのは、航空輸送であることが多かった<sup>28</sup>。有翼の再使用宇宙輸送機は一般に航空機と同様の運用がなされるはずというここでもハードウェア中心の視点より、航空輸送が選択される事が通例であった。しかし、地上輸送の世界平均で見た場合航空輸送の寄与はたかだか0.25%(重量ベース、金額ベースでは15%)しかなく<sup>29</sup>、輸送形態上も特殊で地上輸送の代表として取り上げるには難がある。一方地上輸送の代表である海上輸送は、全世界をみても金額、重量ベースで8割越える規模を持つ基幹輸送システムである。海運では海運会社各々が独自に船舶の形態、サイズを考え調達する<sup>30</sup>点でも、宇宙輸送との相似点がある。将来の宇宙輸送は、軌道以遠での人類の活動を支える基幹的な位置づけになるはずであり、この点海上輸送を対照と考えるのは妥当であろう。

### 1) コンテナ輸送というgame changing

海上輸送には、大きく分けて三つのシステムがある:大規模貨物を取り扱うバルク、エネルギー輸送を担うオイル、ガス輸送とコンテナ輸送である<sup>31</sup>。コンテナ輸送はいま地球上で輸送に関してもっとも大掛かりでかつシステムチックに運送されているものであり、1960年代革新的な変化がコンテナ化によって達成された<sup>32</sup>とされている。そこでこのコンテナ輸送について注目したい。

containerizationと呼ばれる輸送の革命がおこったのは1950年代のことである。フェニキアやローマ時代からこのころまでは、海運輸送における運送形態や、積載方法には基本的に変化がなかった、つまり貨物の集約と人力を中心とした荷役である。海上輸送したい荷物はまず埠頭に集約され、保管される。船がくればパレットに乗せられ船倉に送られ、適切な場所へとおかれていくというやり方である。たとえばローマ時代でも港湾を新設し荷を集

表9 コンテナ輸送を巡る動向とコスト変化

年代	事項	輸送コスト
1956年	コンテナリゼーション・輸送革命 船だけでなく港クレーン倉庫などシステム全体の改変 ただしコンテナ利用だけではコストダウンにはならず 内陸輸送のコストダウン+荷主によるコンテナ荷役	コンテナにより在来の39~74%減と推算 1950年代USからGER輸送 荷役費37%船賃12% 計95日内船の行程11日 輸送費は製品価格最大25%
1965年	工業の地理的条件変化が進む 輸送コストの低減による港湾から郊外への移転	
1966年	国際輸送にもコンテナ投入 ←コンテナ、金具類の規格化完了	2~2.5ドル/トン (1950荷役16ドル...84%減)
1968年	日本からアメリカへのコンテナ輸送開始	
1974年	コンテナ船輸送能力は6年で14倍に →能力過剰 価格競争港湾の投資も大型化(コンテナ輸送は規模依存 港湾設備も規模が必要...主要港湾のみが拠点となる)	
1986年	輸送コスト最低ラインへ ただし輸送コストの地域不均衡生ずる	USからAsia 40ftコンテナ輸送コスト \$41(79年)が\$2.4に低下...94%減

約、人力のクレーンなど使用して荷役<sup>33</sup>しており、基本的な手法は時代を超えて共通していた。

このような荷役を中心とした輸送は大きな問題があった。荷物が一定量集約されないで荷役されないことから、港湾での待ち時間が長いこと、それから荷役はベテランの沖仲仕によるいわば手動による作業で、ここでも搭載に長時間かかり人件費が高くつくという問題である<sup>34</sup>。1960年医薬品をシカゴからフランスへ輸送する運賃の内、この荷役費用は実に49%だった<sup>35</sup>。この埠頭における高コスト、非効率を解消したのがコンテナである。ただコンテナを導入したことが、革命的であった訳ではない。コンテナ化を最初に進めた企業は:

海運業は船を運航する産業ではなく、貨物を運ぶ企業である

と気がついて<sup>36</sup>。すなわち、コンテナと海上輸送を中心に地上輸送全体を再構築したところにある。その結果1970年代には、アジアから北米向け運賃はそれまでの40~60%低下した<sup>37</sup>という。このような輸送コスト低減と効率の向上は、在庫コストの削減と正確な輸送時間を生み出し、グローバルサプライチェーンの成立につながった。コンテナ輸送を巡る時系列変化を表9に示す。1980年代にはコストは94%削減されたともされており、概算ではあるが1960年代の約1/100まで輸送コストが低下したと考えられる。このような輸送コストの低減は産業構造をも変え、それまで港湾や海岸に位置していた工場の立地条件は様変わりし資材、部品の調達を海外に求めることができるようになった。非常に安価な製品まで海外製造のものが身近に流通するようになったのも、このような改革により輸送コストがほぼ無視できるほど小さくなったがためである。輸送(物流)コストは1956年では価格比25%もあったものが、現在では食品や小売りで10%内外のほかは、機器類、製造物ではおよそ4%近辺<sup>38</sup>であるのが一般的になっている。

このようにcontainerizationは、輸送のみならず製造や貿易、流通の形態を大きく変化させ統合的な改革を導いたという点で革命的とされている。ここで注意しなくてはならないのは、トラック、鉄道、船(コンテナ船とはなったが)のいわゆる“輸送ハードウェア”や“システム”が、革新したのではない点にある。将来輸送では再使用などの新技術がとく注目されるが、マネジメントの視点があってはじめて新技術が有効となることだが、この例からもわかる。

## 2) 輸送費低下によるgame changing

では実際に輸送コストが劇的に低下するとどのような事態となるかを、コンテナ輸送の現在をみることから想定してみたい。先にまとめたようにコンテナにより海上輸送コストは20-30年で約1/100まで低下した。コンテナは規格化されているので海上陸上を問わずシームレスに移動させることが可能であり、途中で中身を取り出すこともないのでコンテナを配送できる業者であれば結果に違いはない(コンビニにおける宅配便と同じ状況)。そのためコンテナ輸送は一気にインフラ化、コモディティ化してしまい、輸送事業者は価格決定権を失うことになった。このような状況でも利益を出すには、輸送方式、物流方式の絞り込みのみしか残されていない。そのため、

- コンテナ船の大型化<sup>39</sup>
- 荷物が集まりやすいところのみ頻繁に寄港する
- 大規模港湾設備を使用する

といった大規模輸送手段が取られるようになった。このため大規模資本が必須となり、かつまた競争過多で多数あった海運業者は大手四社へと集約(日本においても80年代6社が、現在3社<sup>40</sup>)、この四社のみで世界全体のコンテナ輸送量の65%ほどを占めるような寡占状態になっている<sup>41</sup>。売上利益率は国内外ともに2003年頃は2~4%となっていた<sup>42</sup>。近年では資料41でわかるように2007年の+32%から2010年には-14%、2013年では+2%ほどという

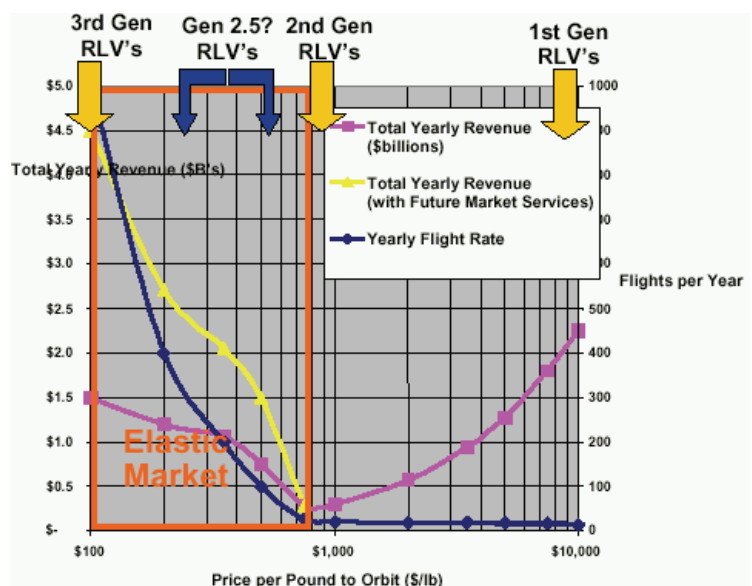


図7 1990年代後半に想定されていた多頻度将来輸送におけるマーケット構造



急激な変動が起きている。一般に製造業では10%程度は確保している<sup>43</sup>(アメリカの場合、日本では5%<sup>44</sup>)ことを考えれば、低価格が勝負となる大規模輸送事業はそもそも利益は少なく、浮き沈みが極端という事業経営の困難さがみえてくる。小口多頻度輸送を行っているヤマト運輸は海運業よりは安定してはいるが、この10年、4~5%という利益率である<sup>45</sup>。このように輸送コストが低減した結果、世界的に輸送や海運業者は厳しい経営環境にあると言えるだろう。

では宇宙輸送において、たとえば1/100までコストが下がった場合の利益はどのような状態になるか。将来の宇宙輸送における将来の収益予測としてはNASA CSTS(Commercial Space Transport Study、NASA主導でメーカが協力した将来輸送予測検討)データを元にAndrews Space, Incが発表したグラフ<sup>46</sup>(図7)が有名である。この図は1994年に実施されたCSTSの将来予測<sup>47</sup>を元に2000年に発表されたもので、横軸には輸送費、縦軸には想定される予測収入を示している。きわめて古いデータであり現時点からみれば信頼性は低いが、この図によれば\$100/lbのとき、年間1000フライトで\$5.0B、一回の飛行あたり\$5Mで運行できるとしている。最近の海運における売上利益率2%で考えた場合、一フライトあたりの利益は\$100000、1ドル100円換算で1000万円程度となる。このときの輸送量は22.7トン、1kgあたりの利益は\$4.4となる。打ち上げ費用における推進薬費用は打ち上げ費の約5~10%程度であるから、この数値が極端に変化しない限り約2500~5000万円となる。したがって利益は推進薬費にも全く達しない程度のもとなると予想される。

以上の簡易な見積もりからわかるのは、宇宙輸送業は海運やコンテナ業界よりも遥かに厳しいポトフォリオを持つ可能性である。打ち上げ機や将来輸送機は最終的にインフラとなり機体間の能力差はなくなるため、航空業界のようにサービスで競争力を保たねばならなくなる。また輸送コストと収益の低さからすれば、海運と同様に大規模資本でなくては事業を維持できないことになろう。すなわち宇宙輸送業界は海運と航空業界の悪いところを組み合わせた状況になると予想される。特に、既存EtO輸送はすでにインフラ化、コモディティ化の予兆が現れている(Appendix 2 参照)。

宇宙輸送は宇宙戦略を決める主要因である、特に軌道上への輸送は、その重要性を考えればとことん現実的な予測と判断が必要とされる。その上で、将来構想を考えていかなければならない。ただし、近い将来のコモディティ化や厳しい競争環境が見えていてもなお投資を行うか否かは別問題で、日本の宇宙戦略オプション上の自在性を確保するためにあえて投資はしないという選択もありうる。原材料の確保と同様に、自在性確保の考え方にも汎用輸送機の備蓄で対応するなどの考え方も選択肢として浮上しよう。つまり、将来の大規模宇宙輸送が実現した場合に対して、現時点の考え方、すなわち自在性確保=自国開発輸送機運用という図式の改訂も視野に入れておくべきと考える。

## 6.まとめと今後の研究

本論文は、将来輸送系が本来担わねばならない輸送とはなにかと問いかけることで、定義を再確認し将来必要とされる輸送形態はどのようなものかを考え直すことを意図したものである。これまで議論されてきたハードウェアやミッションの検討のかわりに、輸送の本質である非対称性とロジスティクスをキーワードとして考察を加えた。本稿は、問題提起と現時点での考察結果を示したものであり結論を求めてはおらず、また考察の不備、不足やロジックが不明瞭な部分は多数ある。しかしながら、あえてまとめれば今時点での検討結果は以下のようになろう。

1) ロジスティクスマネジメント的視点を与えることで、宇宙輸送と戦略に対して新たな視点からの考察が可能である。

2) 将来地球外部にて産業、エネルギーサイクルが成立し自立するまで、地球から軌道への非対称宇宙輸送が持続する。したがって、地球-軌道間の双方向対称輸送を前提とする再使用輸送系形態は望ましくなく、非対称性を前提に置いた部分再使用や再利用輸送形態を中心に考慮すべきである。

3) 大規模宇宙輸送が実現した場合、航空や海運同様の寡占化や過当競争が生ずるだろう。これに対応できる構想を当初から想定し、戦略をもって将来輸送を考える必要がある。

今後の研究では、本論文で不足する部分を賄うよう、たとえば、a)将来輸送実現時に想定される業界状況の想定と地上輸送業界との相関、b)収益率から考えた場合の日本の競争力保持の可能性などを考察する必要があると考える。

## Appendix 1 宇宙輸送の由来とコンセプト

Space Transportationの和訳である“宇宙輸送”という語の定義は、明確にはなされていない。たとえばAIAAのペーパーを検索しても、キーワードとして使用されているだけで内実は機体形態、運用形態についての議論となっている。ではこのコンセプトはいつ生まれ、どのような議論がなされてきたのであろうか。space transportationという語はいつ誰が使いだしたかは明確ではないが、AIAAのほか、JBIS(Journal of British Interplanetary society、NASA/NTRS(NASA technical report server)を検索した限りでは、NASAのW. Escher<sup>48</sup>およびH. Koelle<sup>49</sup>が最初とみられる。将来のアポロ計画が浮上する状況下、Koelleは月と地球間の輸送を考察するこの論文中で、space transportation systemという言葉を使用している。つまり地球-月間の物資などの移送を担う輸送形態全体を意味していた。

1960年代後半になると、後にスペースシャトル構想となる検討の中で多様されるようになる。当初は、Space transportation system (STS)は宇宙との輸送に関わるサイクル全体を説明するものであった。しかしポストアポロが本格的に考慮され始めると、STS = space shuttle orbiterと扱われるようになる<sup>50</sup>：

A space transportation system that will:

- Provide a major improvement over the present way of doing business in terms of cost and operational capability.
- Carry passengers, supplies, rocket fuel, other spacecraft, equipment, or additional rocket stages to and from orbit on a routine aircraft-like basis.

すなわちSTSとはコストや運用能力を高めたもので、航空機的な運用ができるものという定義が作られているのである。ニクソン大統領もシャトル開発を進めるにあたって以下のようにコメントしている<sup>51</sup>：

This system will center on a space vehicle that can shuttle repeatedly from earth to orbit and back.

このように当初の定義から70年代に変化した後、space transportation = 宇宙輸送は、orbiterやそれに類似する再使用輸送ハードウェアをイメージする語彙として使われるようになったと言える。このように定義が変化してきたこと自体が、宇宙へもしくは宇宙から輸送することの本質は議論されてきていないことの傍証であると言える。

## Appendix 2 既存宇宙輸送系の動向と次世代機

使い捨てロケットを巡る世界は、今後10年以内に大きく変化しようとしている<sup>52</sup>。キーとなるのは、1) 打ち上げビジネスの民間商業化、2) 新興国の参入と3) 本格的な第三世代機体の導入である。これは軌道上への輸送が一般化、コモディティ化する予兆と考える。

ロシアは1980年代に第二世代へ乗り遅れ(Zenitはウクライナの機体になったため)、また1.5世代の主力機Protonのあいつぐ失敗により、第三世代機Angaraへの移行を急いでいる。打ち上げ基地も他国依存を脱却し国内への移行を急いでいる。アメリカでは、第三世代当初に出現したEELVが価格高騰で停滞する一方、SpaceX、Orbital Sciencesなどが開発した新型機が投入され状況が一変している。ヨーロッパでは本編で述べたように、革新的なAriane6の開発が予定されている。中国では第三世代となる長征5、6、7、11を並行して開発し、既存の長征2、3、4を代替する。またアメリカのSLS相当になる長征9の開発計画も進行しており、大幅な改革が行われる予定である。新興国などの新規参入も増えてきており、ブラジルのCyclone-4も間もなく商業打ち上げへ参入する。この機体は第一世代のCycloneの改良型である。第一世代の生き残りもまだコストでは競争力があり、ロシア-ウクライナ間で打ち上げ費用分担を巡りトラブルがあったDneprも再度打ち上げが始まっている。この機体は残存が少ないとされているが、長期の保存を巡る腐食などに対応するなどにより打ち上げ可能基数を増やすことが計画されている。ほぼ同程度の能力を持つRockotも同等のプライスタグ(10億円前後/トン)をつけて、シェア拡大を狙っている。このような状況下で、日本も輸送の自立性および競争力を維持すべく基幹ロケットH-IIA/Bに代わる新型基幹ロケットの開発に着手する。この機体は実用的で利用ニーズに適したものとし、柔軟な打ち上げ能力、高効率な推進系、機体/射点の最適化を目指す事になっている。そのためには打ち上げ費用、運用/維持コストを共に半減することを目指している。

このように今後10年以内にはアメリカを含めEU、ロシア、日本、中国の主力機はすべて更新され、投入能力も大幅に向上する。新興国を中心に小型機や民間機も参入することにより、ロケットは急速に一般なモノ、つまりコモディティ化することになる。その一方で、COMSTACその他の予測からもわかるように衛星需要は大幅な増加は見込めない。これまで宇宙開発には関与してこなかったトルコ、南アフリカ、ベトナムなどの諸国が衛星発注を行っているが、マーケットの様相を大きく変化するほどのパワーはない。したがって、宇宙輸送は今後大幅な輸送能力の供給過剰状態になると予想される。このようなインバランスは、輸送費に対する強力な引き下げ圧力として働く事になるだろう。

## 参考文献

- <sup>1</sup> クレフェルト, M. V., 補給戦、中公文庫BIBLIO、pp.388、2006.
- <sup>2</sup> JIS規格、JIS Z 0111 物流用語、2006.
- <sup>3</sup> 中田信哉、ロジスティクス入門、日経文庫、pp.82、2012.
- <sup>4</sup> 中田伸哉ほか、現代物流システム論、有斐閣アルマ、pp.114、2003.
- <sup>5</sup> “物流管理の常識とは大違い ロジスティクスの手引き”、月刊ロジスティクスビジネス、2003年6月.
- <sup>6</sup> 一般社団法人日本船主協会、“主要品目別海上荷動量”、海運統計要覧2013.
- <sup>7</sup> レビンソン、M., コンテナ物語、pp.21、2007.
- <sup>8</sup> 中田信哉、ロジスティクス入門、日経文庫、pp.51-74、2012.
- <sup>9</sup> 中田伸哉ほか、現代物流システム論、有斐閣アルマ、図4-2、pp.100、2003.
- <sup>10</sup> 日本物流学会ロジスティクス研究会、物流・ロジスティクス・SCM概念について、日本物流学会、2008.
- <sup>11</sup> 中田信哉、ロジスティクス入門、日経文庫、pp.62、2012.
- <sup>12</sup> 長友、貨客分離を基底とする宇宙輸送システムの考え方、宇宙輸送シンポジウムpp.69、昭和56年、など.
- <sup>13</sup> R. O. Ballard, “Engineering development trends in CIS liquid rocket engine technology,” AIAA 1995-2542, July 1995.
- <sup>14</sup> Stuhlinger, E. and Ordway III, F. I., “Wernher von Braun Crusader for space,” pp. 108, 1996.
- <sup>15</sup> 宇宙政策委員会 宇宙輸送システム部会、宇宙輸送システム長期ビジョン素案、平成26年2月17日.
- <sup>16</sup> 宇宙政策委員会 宇宙輸送システム部会、宇宙輸送システム長期ビジョン素案 参考資料集その4、pp.29-30、平成26年2月17日.
- <sup>17</sup> Guy Pilche, MM, et al., “Ariane6 the future European launcher,” IAC-13-D2.1.6, 2013.  
Schmitt, D., et al., “Arianespace launcher family status,” IAC-13-D2.1.3, 2013.
- <sup>18</sup> Space News, “DLR’s Woerner remains unconvinced just-unveiled Ariane6 design is right way to go,” pp.1, July 12, 2013.
- <sup>19</sup> CNES, CNESMAG, No.57, April 2013, <http://www.cnes-multimedia.fr/cnesmag/interactif/index57.html>
- <sup>20</sup> Space News, “Europe to consider radically streamlined supplier base for Ariane6,” Vol. 25, issue 2, Jan, 13, 2014, pp.7.
- <sup>21</sup> M. Raftery, and K. SHireman, “The transition from ISS to deep space exploration,” IAC-13-B3.1.7, China, 2013.
- <sup>22</sup> JAXA宇宙教育センター、Space guide 2013、2013年3月.
- <sup>23</sup> 鈴木ほか、“コンテナ輸送によるインバランスの解消およびバルク貨物の片荷輸送の抑制によるCO2排出量の削減効果の検証に関する研究”、日本航海学会講演予稿集、1巻1号、2013.
- <sup>24</sup> Triplett, W., “The Plane with No Name,” Air & Space magazine, Mar. 2002, Smithsonian institute.
- <sup>25</sup> Pielke Jr., R. and Byerly, R., “Shuttle programme lifetime cost,” Nature, 472, 38 (07 April 2011).
- <sup>26</sup> Jenkins, D. R., “Broken in midstride, Space shuttle as a launch vehicle,” To reach the high frontier, pp.409, University of Kentucky, 2002.
- <sup>27</sup> JAXA、H-IIIBロケット3号機打ち上げ前プレスブリーフィング、2012年7月19日.
- <sup>28</sup> たとえば、宇宙政策委員会宇宙輸送システム部会、中長期的な観点からの宇宙輸送システムの在り方に係る総合的検討(長期ビジョン)の具体的な検討の進め方等、第8回会合資料4、平成25年9月2日.
- <sup>29</sup> 石倉ほか、輸送機関分担と単価に着目した国際貿易の品目間類似性および異質性に関する分析、国土技術政策総合研究所資料、第422号、ISSN 1346-7327、平成19年10月.
- <sup>30</sup> 小坂ほか、東アジア物流の現状と国際海上輸送に関するデータベース開発、海上技術安全研究所報告、Vol.7、No.4、pp.7-21、2008.  
増森ほか、海上コンテナ輸送における船社戦略についての検討、東京海洋大学卒業論文、平成14年.
- <sup>31</sup> 日本造船工業会、造船関係資料、2013年9月.
- <sup>32</sup> 山本、国際会場コンテナ輸送における輸送サービスと輸送システムに関する研究、神戸大学、博士論文、2013.
- <sup>33</sup> Biesty, S., ROME In spectacular cross-section, pp.21, 2003.
- <sup>34</sup> 東京冷蔵倉庫協会、港湾物流の歴史の変遷について、2012/06/01.
- <sup>35</sup> レビンソン、M., コンテナ物語、pp.23、日経BPマーケティング、2007.
- <sup>36</sup> レビンソン、M., コンテナ物語、pp.80、日経BPマーケティング、2007.
- <sup>37</sup> レビンソン、M., コンテナ物語、pp.338、日経BPマーケティング、2007.
- <sup>38</sup> 日本ロジスティクスシステム協会、2011年度物流コスト調査報告書(概要版)、p.4、2012年3月.
- <sup>39</sup> 浦野ほか、世界のコンテナ船動静及びコンテナ貨物流動分析(2013)、国土技術政策総合研究所資料、第755号、Sep. 2013.
- <sup>40</sup> 高橋、日本の海運会社の定期航路部門とコンテナ化、赤門マネジメントレビュー、2巻2号、2003年2月.
- <sup>41</sup> 川崎汽船、Fact book、pp.9-12、July 2013.
- <sup>42</sup> 石黒ほか、“船舶大型化と船社の経営状況との関連分析”、第27回土木計画学研究発表会講演集、2003年6月.
- <sup>43</sup> 内閣府、平成25年度年次経済財政報告、第2章第一節 製造業企業の収益性、第2-1-4図、2013.
- <sup>44</sup> 財務省 財務総合製作研究所、法人企業統計 調査年次別調査結果、平成24年度 <http://http://www.mof.go.jp/pri/reference/ssc/results/index.htm>
- <sup>45</sup> クロネコヤマト、ファクトデータ 財務ハイライト(連結)、2013. <http://http://yamato-hd.co.jp/investors/library/fact/>
- <sup>46</sup> Andrews, J., “RLV design issues for future commercial space applications,” AIAA 2000-5104, 2000.
- <sup>47</sup> NASA and Boeing, et al., Commercial Space Transport Study final report, April 1994.
- <sup>48</sup> Escher, W. J. D., “On the utility of the moon in space transportation -the lunatron concept,” NASA technical report server, 19630028178, 1963.
- <sup>49</sup> Koelle, H. H., “Trends in earth-to-orbit transportation systems,” NASA technical report server, 19630023429, 1963.
- <sup>50</sup> Space Task Group, “The Post-Apollo Space Program: Directions for the Future,” September 1969.
- <sup>51</sup> Launius, R. D. and Jenkins, D. R., “To reach the high frontier: A history of U.S. launch vehicles,” University press of Kentucky, pp.375, 2002.
- <sup>52</sup> IAC13-D2.1セッション各種文献参照