

大型ロケットによる商業衛星打上げ市場の分析

—HⅡA ロケットの基盤維持の観点から—¹

各務公将²

森脇悠貴³

2012 年 2 月 14 日

要旨

宇宙航空研究開発機構(JAXA)によると、HⅡA ロケットの基盤維持のためには、年間 4 機程度の HⅡA ロケットの打上げが必要であるという。しかしながら、近年の HⅡA ロケットの打上げ実績を見ると、年間に 2 機程度の政府衛星の打上げがあるのみであり、HⅡA ロケットの基盤を維持するためには何らかの政府の支援が必要な状況である。そこで我々は、中長期的な方針として、HⅡA ロケットの基盤維持を図るために日本政府が負担する必要がある費用について分析した。我々の分析では、年間 4 機の HⅡA ロケットの打上げを確保することを目的として、年間 2 機の商業衛星の打上げをおこなうためには、現在交付されている補助金(技術の維持、射場の維持のために約 150 億円)に加えて、商業衛星の打上げによって発生する赤字補填のために 107 億円程度の費用を日本政府が援助する必要があることが明らかになった。このことから HⅡA ロケットの基盤維持のために、日本政府は計 250 億円程度の費用を負担する必要がある。

しかしながら、この結果は各種の仮定の変化によって変わりうることに注意が必要である。なかでも我々の分析では、ロケット打上げの需要曲線を線形で傾きは -2 であると仮定したが、傾きを変化させることによって日本政府の負担する費用は大きく変わりうる。また、本稿では年間 4 機の HⅡA ロケット打上げを確保するための方策として、年間 2 機の商業衛星の打上げをおこなうことのみを想定したが、政府衛星の打上げを増やすなどの他の方策も考えられるであろう。

国の方針としては、HⅡA ロケットを中心とした宇宙輸送システムの維持は不可欠としており、欧米ではすでに基盤維持のための同様の補助金政策を行っていることから、基盤維持に向けた補助金政策を今後一層検討していく必要があると思われる。

¹ 本稿は、東京大学公共政策大学院の 2011 年度事例研究「ミクロ経済政策・問題分析／解決策分析Ⅲ」で行われた研究である。(担当教官：東京大学社会科学研究所・松村敏弘教授、東京大学公共政策大学院・戒能一成非常勤講師)

² 東京大学大学院公共政策学教育部公共政策学専攻経済政策コース 専門職学位課程 2 年

³ 東京大学大学院公共政策学教育部公共政策学専攻経済政策コース 専門職学位課程 2 年

目次

| | | |
|--------|-----------------------------|----|
| 1章 | はじめに | 4 |
| 2章 | 各国の宇宙輸送システム | 5 |
| 2.1. | 米国 | 5 |
| 2.2. | 欧州 | 6 |
| 2.3. | ロシア | 6 |
| 2.4. | 中国 | 7 |
| 2.5. | 日本 | 7 |
| 3章 | 大型ロケットによる商業衛星打ち上げ市場 | 7 |
| 3.1. | 各国の大型ロケット | 8 |
| 3.2. | 打ち上げ状況 | 11 |
| 3.3. | 打ち上げ費用と補助金 | 12 |
| 4章 | 分析 | 13 |
| 4.1. | 分析の目的 | 13 |
| 4.2. | 分析における仮定 | 14 |
| 4.3. | 費用関数、需要関数の推定 | 16 |
| 4.3.1. | 分析 1 | 17 |
| 4.3.2. | 分析 2 | 17 |
| 4.3.3. | MHI の費用関数の推定 | 18 |
| 4.3.4. | まとめ | 19 |
| 4.4. | MHI の商業受注について | 19 |
| 4.4.1. | 分析 1-A | 19 |
| 4.4.2. | 分析 1-B | 20 |
| 4.4.3. | 分析 2-A | 20 |
| 4.4.4. | 分析 2-B | 21 |
| 4.4.5. | まとめ | 21 |
| 4.5. | Arianespace へ打ち上げを委託する場合 | 22 |
| 4.5.1. | 分析 1-C | 22 |
| 4.5.2. | 分析 2-C | 23 |
| 4.6. | HIIA ロケットの基盤維持のために政府が負担する費用 | 23 |
| 4.6.1. | 分析 1-B と分析 1-C の比較 | 23 |
| 4.6.2. | 分析 2-B と分析 2-C の比較 | 24 |
| 5章 | 結果の解釈と政策提言 | 24 |
| 5.1. | 結果の解釈 | 24 |
| 5.2. | 政策提言 | 25 |

| | |
|-------------------------|----|
| 6章 今後の課題..... | 27 |
| 謝辞..... | 28 |
| 参考文献..... | 29 |
| 補論..... | 31 |
| 補論 1：分析 3（妥当でない分析）..... | 31 |
| 補論 2：感度分析..... | 32 |
| 分析 1..... | 32 |
| 分析 2..... | 33 |
| 分析 B と分析 C との比較..... | 34 |

1章 はじめに

我が国の宇宙開発の歴史は 1955 年、東京大学生産技術研究所の糸川英夫教授が「ペンシルロケット」と呼ばれる超小型ロケットの開発に成功したことから始まる。1958 年に東京大学宇宙科学研究所(ISAS: Institute of Space and Astronautical Science)が発足、さらに 1963 年には航空宇宙技術研究所(NAL: National Aerospace Laboratory of Japan)が、1968 年には宇宙開発事業団(NASDA: National Space Development Agency of Japan)が誕生し、現在の宇宙開発を中心となって行う宇宙航空研究開発機構(JAXA: Japan Aerospace Exploration Agency)を構成する 3 組織が 1960 年代に整い、それぞれが技術開発を中心として宇宙先進国にキャッチアップすることを目標に我が国の宇宙開発は進んでいった。その結果、1970 年には ISAS が日本で初めて人工衛星「おおすみ」の打上げに成功して世界で 4 番目の人工衛星打上げ国となり、1977 年には NASDA が日本初の静止衛星⁴「きく 2 号」の打上げに成功した。こうしてキャッチアップに成功した日本は 1980 年代以降国産ロケットの開発に注力し、国産ロケットである HII ロケットが完成、1994 年に初めて上げられた。このように、欧米のような「社会インフラとしての宇宙」ではなく、「技術力の象徴としての宇宙」という側面を強く持ち続けてきた日本の宇宙開発は、1998 年に北朝鮮より打上げられたテポドンにより安全保障の問題が浮上し「宇宙の利用」という側面を意識せざるを得なくなった。そうして「宇宙開発を『社会インフラ』として評価しなおし、日本がもつ技術を国内外の問題解決に用いるべきである」⁵という発想に突き動かされた形で宇宙基本法が 2008 年に公布、施行された。宇宙基本法は、平和的利用、国民生活の向上、産業の振興、人類社会の発展、国際協力等の推進、環境への配慮を基本理念として、宇宙利用を中心とした宇宙開発の推進を目指したものである。宇宙基本法の趣旨を踏まえ、今後 10 年間を見通して 2009 年度～2014 年度の基本的な方針と実施すべき施策を取りまとめたのが宇宙基本計画である。

宇宙基本計画に基づき、施策を実施していくことが現在の我が国の宇宙開発において重要であるが、その中で、我が国の宇宙輸送システム⁶は、安全保障上不可欠な情報収集衛星や自然災害の予防・危機管理に有効な気象衛星、地球観測衛星、測位衛星などを確実に軌道上に運ぶために必要なインフラであり、「独自に宇宙空間に打上げる能力を将来にわたって維持することは、宇宙開発利用の基本方針である」とされており、維持することが望まれている。我が国の宇宙輸送システムの中核を担う HIIA ロケットの基盤⁷を維持するため

⁴ 静止衛星とは、静止軌道（地球の自転と同じ周期で公転する円軌道）上に上げられる衛星を指す。

⁵ 鈴木（2011）

⁶ 宇宙輸送システムとは、地上から衛星などを打ち上げるロケットなど宇宙への打ち上げ・輸送を行うシステム全般を指す。

⁷ 宇宙輸送システムの基盤とは、そのシステムの生産基盤、技術基盤を指す。

には、年間 4 機程度の打上げが必要とされている⁸が、表 1 でも見られるように、HIIA ロケットは運用開始から現在まで最大で年に 3 機しか打上げを行うことができていない。

表 1 直近 11 年の HIIA ロケットの年度別打上げ実績⁹

| 2001 | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 2 | 3 | 1 | 1 | 2 | 3 | 2 | 1 | 1 | 2 | 3 |

その原因は、我が国の政府衛星が少ないということのほか、商業衛星打上げ市場における競争力に欠けるために商業衛星打上げの受注を獲得できていないことにある。HIIA ロケットは低価格化・信頼性向上により輸送システムの国際競争力を高めることを目的として開発されたものの、競合する ProtonM ロケットや Ariane5ECA ロケットと比較するとまだ打上げ価格が高く、日本がこれまで商業衛星打上げの受注に成功したのは 1 件のみで、現状、国際競争力がない。そこで、HIIA ロケットが商業衛星打上げ市場においてシェアを獲得できるような政策を行い年間 4 機の打上げを可能にした場合のシミュレーションを行い、我が国の宇宙輸送システム政策に対する提言を行いたい。そのために、第 2 章で各国の宇宙輸送システムの現状を概観し、第 3 章で、宇宙輸送システムの中でも HIIA ロケットが分類される大型ロケットに焦点を当て、その性質を比較するとともに、大型ロケットによる商業衛星打上げ市場の現状を把握する。第 4 章で HIIA ロケットに対する政策分析を行い、最後に政策提言を行う。

2章 各国の宇宙輸送システム

本章では、独自の宇宙輸送システムを持つ米国、欧州、ロシア、中国、日本について、それぞれどういった宇宙輸送システムを持っているのか、また、宇宙輸送システムに対してどう考えているのかを概観する。

2.1. 米国

静止軌道¹⁰(GSO: Geostationary Orbit)に打上げられる衛星や大型の地球観測衛星の打上げを担当するのは、DeltaIVおよび AtlasVであり、それらは米国の基幹ロケットとして米

⁸ 『我が国の輸送システムについて』(宇宙開発戦略本部事務局、平成 23 年 3 月)

⁹ FAA ”Commercial Space Transportation: Year in Review 2004~2010”より筆者作成

¹⁰人工衛星の打上げは、低軌道(LEO: Low Earth Orbit)、中軌道(MEO: Medium Earth Orbit)、静止軌道(GSO)のいずれかへおこなわれることが主である。LEO、MEO、GSOの順に地球からの距離が近く、より遠い軌道へ打上げるためには多くの燃料が必要であるため、大型のロケットが用いられる。また、GSOへ打上げる際には、人工衛星を静止遷移軌道(GTO: Geostationary Transfer Orbit)へ一時的に投入した後 GSO まで運ぶ手順を取ることが普通である。

国防総省(DOD: Department of Defense)が管理責任と固定予算の拠出を行っている。また、低軌道 (LEO)への打上げや重量のない衛星の打上げは、Delta IIや Athena、Taurus、Pegasus などで行われている。

米国が最も特徴的なのは、有人の宇宙輸送システムであるスペースシャトルを持っていたことである。先に挙げたロケットはすべて使い捨て型で、1機で1回の打上げしかできないが、スペースシャトルは再利用型であり、「コロンビア」、「チャレンジャー」、「ディスカバリー」、「アトランティス」、「エンデバー」の5機種で1981年の初飛行から2011年の退役までに合計135回打上げられた。使い捨て型よりコストが小さいと期待されていたスペースシャトルは、実際は修繕費などのために使い捨て型よりも大幅にコストがかかり退役に追い込まれた。現在は、米航空宇宙局(NASA: The National Aeronautics and Space Administration)の資金・技術援助により、民間による有人輸送ロケットの開発を促進する政策を進めており、SpaceX社のFalcon9、Orbital Sciences社のTaurus IIが選定されている。米国は有人輸送を商業化させることで宇宙産業を活性化させるとともに政府予算の削減に努めている。

JAXA(2011)によると、米国は、米国宇宙輸送政策骨子(2005)に「宇宙へのアクセスを保証する米国宇宙輸送能力の維持のために、米政府は強固な宇宙輸送産業および技術基盤が発達するような環境整備に向けて十分かつ安定した資金を提供する必要がある」と明記しており、そのため上記のようにDODやNASAによる資金援助は十分に行われている。

2.2. 欧州

欧州の宇宙輸送システムは大型のAriane5シリーズが基本である。商業衛星打上げ受注を通じて年間の打上げ数を確保することでAriane5の基盤を維持している。中型にロシアのSoyuz、小型にVegaを持っているが、それらの打上げはまだ回数が少ない。中型にロシアのSoyuzを導入したのは、「衛星の中には、ロケットに1機しか搭載できないうえ、重量も比較的軽いものがあるが、それを大型の「Ariane5」で打ち上げるとコストの採算がとれないため」¹¹であるという。

Ariane5シリーズに対する補助については第3章で詳しく述べるが、Ariane5の基盤維持のための補助金政策がなされているし、JAXA(2011)によると、そうした既存のロケットの維持だけでなく、欧州宇宙政策骨子(2007)で「新たな打上げシステムを開発するための投資が行われるべきである」とされており、Ariane6の開発計画も進行している。

2.3. ロシア

現在、ロシアの宇宙輸送システムを担っているのは有人用及び大型衛星用のSoyuzと大

¹¹ジャンルイ・クロードン(Arianespace社東京事務所代表)に対するJAXAのインタビューより

型衛星用の ProtonK、ProtonM、中型衛星用の Kosmos-3M、小型衛星用の Rockot などである。どのロケットもミサイルを人工衛星打上げに転用したものである。Soyuz は米国、欧州でも利用されており、有人としての Soyuz はスペースシャトルの退役後に有人輸送が唯一可能なロケットとして活躍している。

JAXA(2011)によれば、ロシアは、「2020 年までの宇宙政策の優先度付けにおいて、1 番目に宇宙空間への自由なアクセスを確保するためのボストーチヌイ (Vostochny) 宇宙基地の建設作業の加速、2 番目にアンガラロケット (Proton シリーズの後継機) の開発を挙げている」とのことであり、自律的な宇宙輸送システムのさらなる強化を進めているようだ。

2.4. 中国

中国は、長征シリーズで小型から大型までのロケットを開発している。中国はロシアの Soyuz の技術を導入して独自に改良した、有人宇宙船である神舟 5 号を打上げており、世界で 3 番目に宇宙へ有人飛行に成功している。JAXA (2011) によると、軽量級から重量級まで、打上げサービス市場や宇宙ステーション用の大型補給機の打上げなどに柔軟に対応できる長征 5 号の開発を進めている。長征 5 号の開発は国内ロケット技術開発能力維持等の目的も達成できるとのことである。

中国の独自の宇宙ステーション構築や月への着陸、火星探査など様々な面で宇宙開発に力を入れており、今後の動向が注目される。

2.5. 日本

日本の宇宙輸送システムは、大型ロケットである HIIA と HII B が基幹であり、中型ロケットはなく、小型ロケットに M-V を持っていたが 2006 年に退役し、現在その後継機となる Epsilon を開発中である。各国と比較してロケットの種類が少なく、幅広い衛星打上げ需要に効率的に対応できていないといえる。また、有人の宇宙輸送システムの開発は今のところ予定がない。

日本は、ミサイル開発や安全保障目的の宇宙開発をもとにした宇宙開発の始まりでなかったのが他国の宇宙開発との大きな違いである。2008 年の宇宙基本法で「非軍事」の利用が認められるようになったものの、軍事関係の衛星の打上げが少ない。

また、1 章で述べたとおり、日本は宇宙輸送システムを不可欠な技術としているが、その基盤維持のための政策が不十分である。

3章 大型ロケットによる商業衛星打ち上げ市場

2 章で扱った各国の宇宙輸送システムのうち的大型ロケットは、自国の大型衛星を打上げているが、欧州の Ariane5 や日本の HIIA など、自国の衛星打上げ需要だけでは基盤が維

持できないものもある。それらのロケットは、商業衛星打上げによって、年間の打上げ本数を一定数以上確保し、基盤を確保しようとしている。そこで、本章では大型ロケットによる商業衛星打上げ市場の現状を概観し、HIIA がシェアを獲得できていない原因を把握する。

ここで、大型ロケットとは、『我が国の宇宙輸送系の現状と今後の方向性』（JAXA、平成23年）に大型ロケットとして記載されているものを指すこととする。

また、商業衛星打上げとは、Federal Aviation Administration (FAA) の定義に基づき、以下のいずれかの条件を満たすものを指すこととする。

- ①FAA/AST（商業宇宙輸送部門）に認可を受けた打上げ
- ②主衛星の打上げ契約が国際的に競争に付されたもの
- ③打上げが国の支援なしに民間資金で実施されたもの

3.1. 各国の大型ロケット

上記の大型ロケットは、表2にまとめた7種類である。各ロケットを詳しく説明する。

| ロケット名 | Ariane5ECA | ProtonM | Zenit3SL | DeltaIV | Atlas V | 長征3C | HIIA |
|--------|--------------|--------------|-----------|--------------|------------|-----------|--------------|
| サービス企業 | ArianeSpace | ILS | SeaLaunch | ULA | | 長城工業公司 | 三菱重工業 |
| 射点 | ギアナ | バイコヌール | 赤道直下海上 | 米国フロリダ州 | | 中国 西昌 | 種子島 |
| 打上げ能力 | 10.5t | 5.5t | 6t | 4.2~13t | 5~9t | 3.8t | 4.1t~9.5t |
| 打上げ開始年 | 2002年 | 2000年 | 1999年 | 2002年 | 2002年 | 2008年 | 2001年 |
| 打上げ成功率 | 96.6%(28/29) | 95.3%(41/43) | 100%(5/5) | 93.8%(15/16) | 96%(23/24) | 100%(3/3) | 94.4%(17/18) |
| 開発費 | 9000億円 | 不明 | 不明 | 2750億円 | 2420億円 | 不明 | 1802億円 |
| 打上げ価格 | \$220M | \$100M | \$100M | \$170M | 不明 | 不明 | 不明 |

※・ILSは、International Launch Service、ULAはUnited Launch Allianceの略。

- ・打上げ能力は、GTOまでの打上げ能力。Federal Aviation Administration (FAA) のYear in Review 2009による。
- ・打上げ成功率は、2011年月2月28日時点。括弧内の数字は、成功した打上げの回数/打上げた回数。
- ・Ariane5ECAの開発費は、Ariane5全体の開発費。
- ・打上げ価格は、商業衛星打ち上げにおける価格で、FAAのYear in Review 2009の推定値。

① Ariane5ECA

Ariane5ECAは、人工衛星打上げ、特に商用静止衛星の2機同時打上げのために製造された欧州のロケットであるAriane5シリーズのひとつで、Ariane5の主流ロケットとして活躍している¹²。開発費が他のロケットと比較して非常に高いのは、Ariane5がAriane1~4の改良型ではなく、全く新規の開発であったためである。

Ariane5シリーズの運用が開始されたのは1996年で、1997~1998年に相次いで起

¹² 他シリーズはAriane5ESATV (ATV (国際宇宙ステーション欧州補給機)の打上げに利用されるロケット)以外運用を終了している。

こった米国の打上げ失敗により Ariane5 シリーズは商業衛星打上げのマーケットシェアを伸ばし始めた。1990 年代までは米国射場から打上げた場合の軌道投入条件が市場の標準であったが、現在では Ariane5 による軌道投入条件（赤道付近からの軌道投入）が標準となっている。

また、マーケットシェア拡大の背景には、手厚い政府補助もある。Ariane5 シリーズの打上げには 2004 年以降 ESA（欧州宇宙機関）より価格低減のための補助政策がおこなわれている。European Guaranteed Access to Space（EGAS）といわれるその政策は、2005 年から 2009 年にかけて、Ariane5 に係る固定費（人件費など）をカバーするように補助金を支給し競争力のある価格設定を可能にすることで Ariane5 の毎年最低 6 機の打上げを目標にしている。毎年最低 6 機を打上げることで、欧州の自立的な宇宙輸送システムの維持が可能とされている。EGAS は 5 年間で 9.6 億ユーロが支給され、2011 年から 2012 年の 2 年間は毎年 1.35 億ユーロが支給される予定である。

② ProtonM

ProtonM は、ロシア政府が開発費を全額出資して完成した Proton ロケットシリーズのひとつで、ProtonK、ProtonBlockDM の改良版である。Proton シリーズはもともと大陸間弾道ミサイル(ICBM: Intercontinental Ballistic Missile)として開発が開始されたがその後月探査計画などのために改良され、さらにそうした計画が中止になったあとは国際宇宙ステーション(ISS: International Space Station)打上げなど低軌道(LEO)への打上げに利用されてきた。1997 年に官需の衛星だけでなく商業衛星打上げ事業への参入を決定し、低軌道(LEO)への打上げを担当する ProtonK を改良して ProtonM が静止衛星など大型衛星の打上げのために製造された。このように ProtonM は新規開発ではなく過去のロケットの改良を重ねて製造されているため、開発費は不明となっているが他のロケットに比して小さいものだと考えられる。

ProtonM は 2008 年のリーマンショック以降のルーブル安の影響で、商業衛星打上げ市場においてプライスリーダーとなっている。

③ Zenit3SL

Zenit3SL は ProtonK の改良版である Zenit3 から派生したロケットで、ロケットの 1 段目、2 段目がウクライナ製、3 段目がロシア製で、3 段目は ProtonBlockDM にも用いられているものである。ロシア政府が開発を行った。

Zenit3SL を打上げる SeaLaunch 社は、米国の Boeing 社、ロシアの Energia 社、ノルウェーの Aker Solutions 社、ウクライナの SDO Yuzhnoye 社の 4 社で立ち上げたベンチャー企業で、Boeing 社が筆頭株主であった。しかし、2007 年に起きた打上げ失敗が原因で Sealaunch 社は 2009 年に破産、再生法の適用を受け、2010 年に ILS 社 (International Launch Services)の株主でもあるロシアの企業、Energia Overseas

Limited 社が筆頭株主となり 2011 年よりロケットの打上げを再開する。

④ DeltaIV、AtlasV

DeltaIVは1960年から打上げが継続されているDeltaロケットシリーズの最新型で、2002年に商業衛星打上げ市場に参入したが、一時期高コストなどを理由に商業衛星打上げ市場から撤退し、その後も商業的な打上げはほとんど行われておらず、官需、軍需の打上げが多い。DeltaIVはミディアム、ミディアム+(4,2)、ミディアム+(5,2)、ミディアム+(5,4)、ヘビーの5種類がある。

AtlasVもDelta同様歴史が古く、1960年代から打上げが継続されているAtlasロケットシリーズの最新型である。AtlasVは400系、500系、HLVの3種類があり、ペイロードの規模と重量によって使い分ける。打上げ以降高い成功率を維持しているが、商業受注は少なく、政府の衛星打上げに利用されることが多い。

米国は自国の政府衛星（特に空軍用衛星）により打上げ本数を確保する方針で、さらに打上げ本数が確保できなければ基盤維持のための費用をすべて補てんする政策をとっているため¹³、商業衛星打上げにこだわっていない。

⑤ 長征 3C

長征3Cは中国が静止軌道(GSO)に衛星を送るために開発した長征3号シリーズのひとつである。2008年に打上げが開始された新しいロケットであり、データが少ない。長征3Cよりブースターの数が多いだけの長征3Bの打上げ価格はFAAの推定値によると5000万ドルと他のロケットに比べて安価であることから、長征3Cの打上げも安価であると考えられる。しかし、米国のミサイル技術拡散防止の法律により、米国製部品を用いた衛星の中国への輸出が禁止されていることから、実質的に海外からの受注は困難な状況にある。

⑥ HIIA

HIIAは、日本初の純国産ロケット「H-II」で培われた技術をもとに、人工衛星の打上げ・国際宇宙ステーションへの補給などの多様な輸送需要に、高い信頼性を確保しつつ、低コストで対応するために開発されたロケットである。しかし、開発がすすめられてきた1990年代後半以降、上げる衛星の大型化、価格競争の激化などの市場の変化があり、実用段階に入った2001年にはすでに需要に対応できない面が多く、2011年現在までの商業受注は1回のみである¹⁴。HIIAは打上げ能力が異なる6シリーズが存在するが、今後三菱重工業株式会社(MHI: Mitsubishi Heavy Industry)はH

¹³ 浅田 (2009)

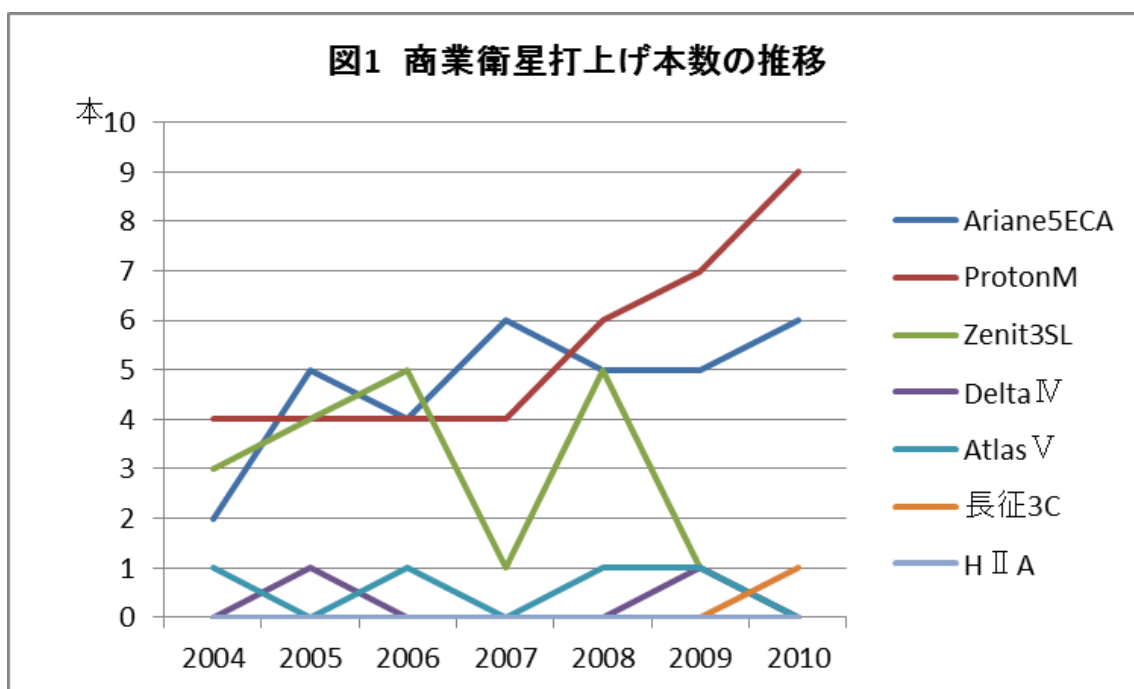
¹⁴ 韓国の衛星で、日本の水循環観測衛星「しずく」と相乗りで打上げる。2012年度打上げ予定。

IIA202 (GTO への打上げ能力は 4.1t) と HIIA204 の 2 つのシリーズに打上げを絞るとしている。

また、HIIA ロケットの増強型である HII B ロケットも大型ロケットであるが、国際宇宙ステーション補給機 (HTV: H-II Transfer Vehicle) 打上げのみに使われているのが現状であるため、今回の分析の対象としない。

3.2. 打上げ状況

2.1.で紹介したロケットの直近 7 年の商業打上げ機数は、図 1 のようになっている¹⁵。



※・2004年、2005年の Ariane5ECA の打上げ機数には Ariane5G (GTO への打上げ能力 6.2t) の打上げ機数を、2007年、2009年の Ariane5ECA の打上げ機数には Ariane5GS (GTO への打上げ能力 6.1t) の打上げ機数を含む。

図 1 を見ると、Ariane5ECA と ProtonM が他のロケットと比べて毎年 3 機から 4 機以上打上げ機数が多いことが分かる。以下の 3 つの理由から他のロケットより有利な条件にあるためだと考えられる。

理由① 価格

上位の 3 ロケットは他のロケットに比べ打上げ価格が安い。Ariane5ECA は価格低減補助を受けており、ProtonM や Zenit3SL より若干価格は高いが対抗できる価格設定が可能である。また、これら 3 ロケットや HIIA は打上げにより開発費を回収することを

¹⁵ FAA "Commercial Space Transportation: Year in Review 2004~2010"より筆者作成

考慮に入れていないが、DeltaIVや Atlas Vは打上げ費で開発費を回収する方式をとっているため、価格が高めになっている。

理由② 信頼性

衛星打上げ需要者は信頼性の高いロケットによる打上げを好む。特に商業衛星の打上げは商業衛星打上げ実績の差が大きく影響する。さらに、リスクをカバーするため保険をかけるのが通例であるが、保険はこれまでの打上げ実績、成功率に大きく依存するため、例えば中国の長征 3B/E は、打上げ価格は安いですが打上げ実績に乏しく、保険料が高つくと考えられる。

理由③ 射場

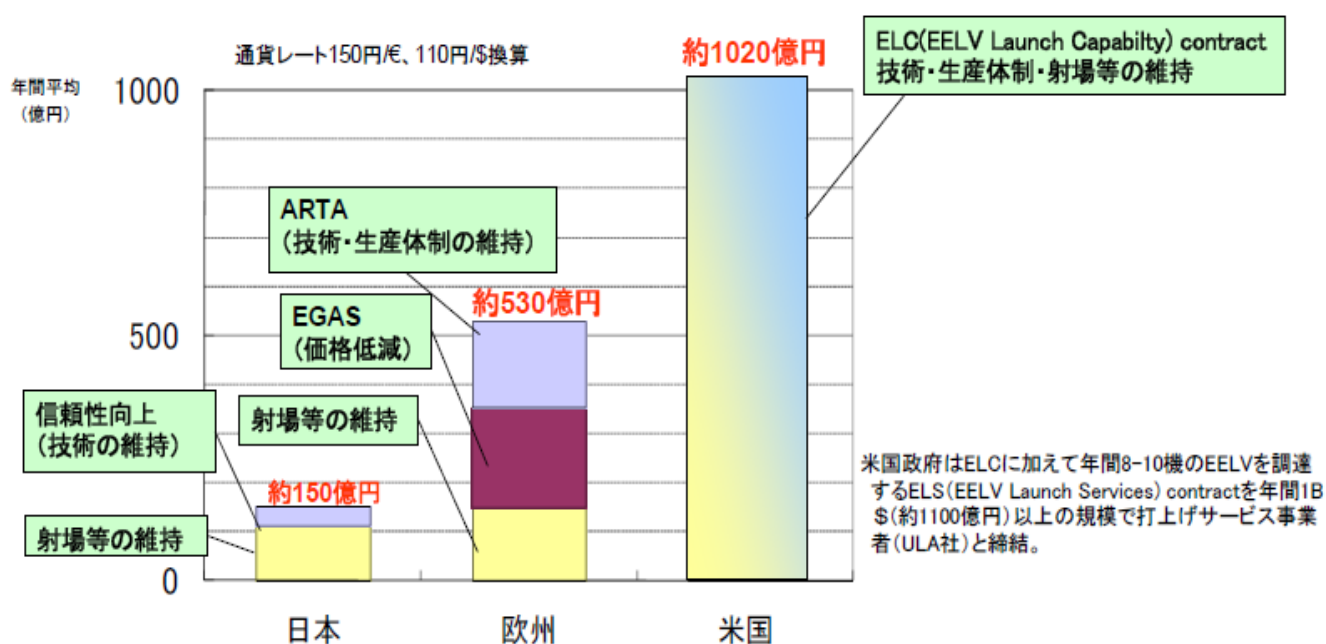
静止遷移軌道(GTO)への打上げは、射場が赤道に近ければ近いほど燃料が少なくて済み、その分衛星の寿命を延ばせることから需要者にとって好都合である。そのため、緯度 6 度にある Ariane5 の射場、赤道直下にある Zenit3SL の射場は好条件であるといえる。

3.3. 打上げ費用と補助金

ここでは、以下の分析で重要な焦点の 1 つとなるロケットの打上げ費用と補助金について概説する。関係者の話によると、ロケットの打上げ費用は製造費と運用費に大別することができる。さらに製造費は材料費、人件費に分けることができ、例えば HIIA ロケット 1 機に搭載されるエンジン 2 機の製造には 30 億円程度の費用がかかるとのことである。運用費は打上げサービスをおこなうための費用であり、射場の固定的な経費、射場関係者の人件費、燃料費などが含まれる。また、ロケットの開発費の減価償却費なども本来であれば打上げ費用として考えられるべきであろう。しかしながら、各国において、ロケットの開発主体（日本では JAXA）とロケット打上げサービス企業（日本では MHI）は異なることが多く、かつロケットの開発については国費で行われることが多いため、打上げサービス企業が開発費の減価償却費を負担することはないと考えることが妥当であろう。加えて、補助金によって打上げ費用の一部は各国政府により賄われている。図 2 では各国の大型ロケット打上げサービス事業への補助金が描かれているが、日本、欧州、米国の 3 国の全てにおいて、射場等の維持、技術の維持に関して補助金が交付されていることが見て取れる。とりわけ欧州の ARTA(Ariane Research and Technology Accompaniment)に着目すると、ARTA は Ariane5 ロケットの信頼性を保持することを目的としており、Ariane5 ロケットのマイナーチェンジ等の費用に対して援助をおこなっている¹⁶。各国における技術の維持を名目とした補助金も、類似の目的を持っていると考えられる。

¹⁶ ESA HP より

図 2 基幹ロケット事業基盤維持に係る政府支援の比較 (2010) 17



4章 分析

4.1. 分析の目的

先述のように、JAXA(2011)によると、HⅡA ロケットについては、部品メーカー等を含めた生産基盤の維持には年間 4 機程度の打上げが必要とされている。しかしながら、表 1 から見られるように、近年の政府需要では平均して年間 2 機程度しか打上げを見込むことが出来ず、中長期的な視点から見ると、このままでは HⅡA ロケットの基盤を維持することが難しい。そのため、生産基盤の維持のためには年間 2 機の商業受注をすることが望ましいと考えられる。ここでは、MHI が年間 2 機の商業受注をするためには、日本政府の援助が必要であるかどうか、必要であるならばどれほどの額の援助が必要であるかを分析する。

表 1 直近 11 年の HⅡA ロケットの年度別打上げ実績 (再掲)

| 2001 | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 2 | 3 | 1 | 1 | 2 | 3 | 2 | 1 | 1 | 2 | 3 |

17 『我が国の宇宙輸送系の現状と今後の方向性』(文部科学省・JAXA、平成 23 年 2 月 24 日) より抜粋

4.2. 分析における仮定

宇宙開発は商業的な目的のみならず軍事的な目的も併せ持ち、各国の宇宙開発に関するデータの公開は非常に限定的である。このような限られたデータから分析をおこなうためには、いくつかの仮定を置かざるを得ない。本稿においては、我々は以下のような仮定を置いた。

① Ariane5ECA はその他のロケット 2 機分としてカウントする。

先述の通り、Ariane5ECA は 1 度に 2 機以上の大型衛星を静止軌道(GSO)に打上げることができることに特徴があり、ProtonM や Zenit3SL と比較しても打上げ能力は約 2 倍、価格も約 2 倍となっている。そこで、Ariane5ECA の打上げ数を 2 倍にしたものを Arianespace の打上げロケット数としてカウントし、価格についてもこれを半分にしたものを Arianespace の打上げ価格とみなす。すなわち 2009 年には Ariane5ECA が 6 機、それぞれ\$220M で打上げられたので、これを 12 機のロケットがそれぞれ\$110M で打上げられたものとみなす。

② 大型ロケットによる商業衛星打上げ市場には Arianespace と ILS の 2 社のみが存在する。

経年的なシェアの推移を見ると、近年では Arianespace と ILS がシェアの大半を占めており、加えて米国や中国、日本の打上げロケットは政府衛星を打上げることが主である。したがって、分析の簡略化のために Arianespace と ILS 以外の打上げサービス企業については考えない。

③ ILS の費用関数は 1 次形式である一方で、Arianespace、MHI の費用関数は 2 次形式である。

ILS の打上げる ProtonM ロケットは軍事用のロケットを転用したものであり、かつこれまでに 300 機以上の打上げの実績がある。したがって、ILS はロケット製造に関して十分な設備を持ち、かつロケットの大量生産に関するノウハウがあると考えられるため、ILS の限界費用は一定であると仮定する。他方で、Arianespace、MHI においては、1 機目のロケットの製造にあたっては ILS と大きく変わらない費用であるが、ロケットの生産数が増加するに従って限界費用が増加していくような 2 次形式の費用関数を仮定する。そして、Arianespace と MHI は工場設備や大量生産に関するノウハウにおいて違いがあると考え、Arianespace、ILS、MHI の費用関数はそれぞれ

$$c_A = \alpha q_A + \beta q_A^2, \quad c_I = \gamma q_I, \quad c_M = \alpha q_M + \gamma q_M^2 \quad (1)$$

のような形状であると仮定する。ここで、 c_i は i 社の費用関数、 q_i は i 社の総打上げロケット数を示し、添字の A、I、M はそれぞれ Arianespace と ILS、MHI を意味する

ものとする。なお、3.3での議論を鑑み、ここでの打上げ費用には、開発費の減価償却費、技術の維持、射場の維持に関する費用は含まれていない。

④ 需要関数は線形で、傾きは-2である。

需要関数に関しては、その形状について推定することが非常に困難であると考えられる。したがって、単純化のために需要関数は $p = a - bq$ のように線形で、かつ傾き b が -2であることを仮定する。なお、需要関数の傾きについては感度分析の対象としている。

⑤ Arianespace には 1 年間に \$270M の援助がなされている。

EGAS によって 2005 年から 2009 年の 5 年間で €960M、年間では €192M \cong \$270M¹⁸ の援助が Arianespace になされている。実際には EGAS の他に、ARTA と射場の維持に関する補助金が交付されているが、本分析においては技術の維持や射場の維持に関わる費用は打上げ費用に含めない。

⑥ Ariane5ECA、Ariane5GS、ProtonM、HIIA は同質的である。

実際は各企業のロケットはそれぞれ信頼性や射場の位置などで違いはあるが、仮定①で述べたように Ariane5ECA をその他のロケット 2 機分とみなす以外では、単純化のために各ロケットの違いは本分析では無視して考える。

⑦ 非商業の打上げにおいては、商業打上げの場合と等しい金額を軍や政府が打上げサービス企業に支払っていることとする。

ロケットには商業打上げと非商業打上げの 2 つがあり、商業打上げでは民間の衛星が、非商業打上げでは軍事用の衛星や気象衛星などの政府衛星が打上げられている。非商業打上げでは打上げサービス企業間での競争がないと考えられるため、本来であれば商業打上げと非商業打上げを区別して考えるべきである。しかしながら、分析の簡略化のために本分析では両者を区別せずに取り扱う。このことより、非商業打上げでは打上げ価格は公開されていないが、商業打上げの場合と等しい金額を軍や政府が打上げサービス企業に支払っていることとなる。

⑧ 非商業打上げは予めわかっているものとする。

各打上げサービス企業は非商業打上げ数を予め与えられた上で、商業打上げ数を決定していると仮定する。

¹⁸ €1 = \$1.4 として計算。三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング HP「外国為替相場：2009 年平均」にて、2009 年の年間平均 TTS が €1 = \$1.3926 ... であったことより。

また、2009年における大型ロケットの打上げ機数と打上げ価格は、以下である。

表3 2009年の大型ロケット打上げ機数

| 開発国 | サービス企業 | ロケット名 | 商業打上げ数 | 非商業打上げ数 | 価格 |
|-----|-------------|------------|--------|---------|--------|
| ロシア | ILS | ProtonM | 7 | 2 | \$100M |
| 欧州 | Arianespace | Ariane5ECA | 5 | 1 | \$220M |
| | | Ariane5GS | 0 | 1 | 不明 |
| 協業 | Sealaunch | Zenit3SL | 1 | 0 | 不明 |
| 米国 | ULA | DeltaIV | 1 | 2 | \$170M |
| | | Atlas V | 1 | 1 | 不明 |
| 日本 | 三菱重工業 | HIIA | 0 | 2 | 不明 |
| 中国 | 長城工業公司 | 長征3B | 0 | 1 | 不明 |

仮定①により Ariane5ECA の総打上げ数は12であり、打上げ価格は \$110M \cong \$100M¹⁹ である。また、仮定より Ariane5GS と Ariane5ECA を同一であると考えことから、Arianespace の総打上げロケット数は $6 \times 2 + 1 = 13$ 、打上げ価格は \$100M であるとみなす。さらに仮定②より、ロシアと欧州以外のロケットの打上げは考慮しない。ここで、 p はロケット 1 機あたりの打上げ価格、 q_i は i 社の総打上げロケット数、 q_{ic} は i 社の商業打上げロケット数 (Commercial Launches)、 $q_i - q_{ic}$ は i 社の非商業打上げロケット数 (Non-commercial Launches)、 $q_c = \sum_i q_{ic}$ は総商業打上げロケット数、 S は欧州政府から Arianespace への補助金総額、 π_i は i 社の補助金を含まない利潤を示し、添字の A、I、M はそれぞれ Arianespace と ILS、MHI を意味するものとする、これまでに述べた仮定と、2009年の打上げ実績から我々は以下を得る。

$$\text{需要関数: } p = a - 2q_c \quad (2)$$

$$\text{均衡: } p^* = 100, q_{AC}^* = 10, q_A^* = 13, q_{ic}^* = 7, q_i^* = 9, S^* = 270 \quad (3)$$

なお、以降の価格や利潤、費用の単位はすべて 100 万ドルである。

4.3. 費用関数、需要関数の推定

本節では、Arianespace の行動原理や、EGAS による補助金の仕組みを様々に変えながら需要関数、費用関数の推定をおこなう。具体的には、Arianespace は利潤最大化行動をとらずにただ 13 機のロケットを打上げ、その赤字を EGAS で補填している場合 (分析 1)、Arianespace がクールノー競争をおこなうことによって商業打上げ数が 10 機になるように、従量的な補助金を EGAS が与えている場合 (分析 2) の 2 つの場合を想定して需要関数、費用関数のパラメータを推定した。これらの分析の他に、Arianespace がクールノー競争をおこない、そこで生じた赤字を EGAS で補填している場合の分析 (分析 3) もおこなったが、矛盾解が生じたため、Appendix に記すに留めることとする。なお、以下では推定され

¹⁹ 分析の簡略化のため。

た値が小数であれば概数（小数点第 1 位まで）として記述するが、実際の分析においてはより精緻な値を用いて分析をおこなった。

4.3.1. 分析 1

分析 1 では、Arianespace は利潤最大化行動をとらずにただ 13 機のロケットを打上げ、その赤字を EGAS で補填している場合についてパラメータの推定をする。先述のように、EGAS は欧州が自律的な宇宙へのアクセスを維持することを目的として、年間 6 機以上の Ariane5 ロケットの打上げを狙ったものである。したがって、Arianespace は利潤最大化を目的とせず、独自の宇宙へのアクセスを維持するという目的で 13 機分(Ariane5ECA6 機 + Ariane5GS1 機)のロケットを打上げるとする仮定には一定の妥当性があると考えられる。仮定③より、Arianespace、ILS の費用関数をそれぞれ、

$$c_A = \alpha q_A + \beta q_A^2, \quad c_I = \alpha q_I \quad (4)$$

のように仮定する。

ILS は 2009 年に 2 機の非商業打上げが決定しているため、ILS の目的関数は、

$$\max_{q_{IC}} \pi_I = \{a - 2(q_{AC} + q_{IC})\}(q_{IC} + 2) - \alpha(q_{IC} + 2) \quad (5)$$

のように表される。FOC より、

$$-4q_{IC} + a - 2q_{AC} - 4 - \alpha = 0 \quad (6)$$

が得られる。

ここで、EGAS が Arianespace の赤字補填であることを仮定しているため、均衡において、

$$p^* = 100, \quad q_{AC}^* = 10, \quad q_{IC}^* = 7, \quad \pi_A^* = -270 \quad (7)$$

が成り立つ。ここから、

$$(6) \text{より} : a - \alpha = 52 \quad (8)$$

$$\pi_A^* = 1300 - 13\alpha - 169\beta = -270 \quad (9)$$

$$\text{需要関数より} : 100 = a - 34 \quad (10)$$

を得る。これらを連立させて解くことにより、

$$a = 134, \quad \alpha = 82, \quad \beta \cong 3.0 \quad (11)$$

が得られる。

4.3.2. 分析 2

分析 2 では、Arianespace がクールノー競争をおこなうことによって総打上げ数が 13 機になるように、ロケット 1 機あたり s の従量的な補助金を EGAS として与えている場合について考える。現状では、EGAS では年間 6 機の Ariane5 ロケットを打上げること目標として、補助金が交付されている。しかしながら、Ariane5 ロケットの打上げ機数を増やせば、

より多くの補助金が交付されるということも十分考えられるであろう。Arianespace、ILS の費用関数を分析 2 と同様にそれぞれ、

$$c_A = \alpha q_A + \beta q_A^2, \quad c_I = \alpha q_I \quad (12)$$

のように仮定する。

2009 年に Arianespace は 3 機の非商業打上げが決定している。したがって、ロケット 1 機の打上げに対して s の補助金が与えられることを考慮すると、Arianespace の直面する問題は以下のように表される。

$$\max_{q_{AC}} \pi_A = \{a - 2(q_{AC} + q_{IC})\}(q_{AC} + 3) + s(q_{AC} + 3) - \alpha(q_{AC} + 3) - \beta(q_{AC} + 3)^2 \quad (13)$$

FOC より、

$$-2(\beta + 2)q_{AC} + a - 2q_{IC} - 6 + s - \alpha - 6\beta = 0 \quad (14)$$

が得られる。

ILS の目的関数は

$$\max_{q_{IC}} \pi_I = \{a - 2(q_{AC} + q_{IC})\}(q_{IC} + 2) - \alpha(q_{IC} + 2) \quad (15)$$

のように表されるため、FOC より

$$-4q_{IC} + a - 2q_{AC} - 4 - \alpha = 0 \quad (16)$$

が得られる。

ここで均衡において、

$$p^* = 100, \quad q_{AC}^* = 10, \quad q_{IC}^* = 7, \quad \pi_A^* = -270 \quad (17)$$

が成り立ち、かつ Arianespace に与えられる補助金の総額が \$270M であることより、

$$(14) \text{より} : a + s - \alpha - 26\beta = 60 \quad (18)$$

$$(16) \text{より} : a - \alpha = 52 \quad (19)$$

$$S = 13s = 270 \quad (20)$$

$$\text{需要関数より} : 100 = a - 34 \quad (21)$$

を得る。これらを連立させて解くことにより、

$$a = 134, \quad \alpha = 82, \quad \beta \cong 0.5, \quad s \cong 20.8 \quad (22)$$

が得られる。

4.3.3. MHI の費用関数の推定

以上の結果を踏まえて、MHI の費用関数の推定をおこなう。仮定③より、MHI の費用関数を、

$$c_M = \alpha q_M + \gamma q_M^2 \quad (23)$$

のように考える。

ここで、JAXA (2011) 『我が国の宇宙輸送系の現状と今後の課題』において、HIIA の

打上げ費用が 85 億円 \cong \$105M²⁰であるとの記載がある。MHI が 2 機のロケットを打上げ、その 1 本あたりの打上げ費用が約\$105M であったと考えると、

$$\frac{1}{2}c_M(2) = \alpha + 2\gamma \cong 105 \quad (24)$$

$$\therefore \gamma \cong \frac{1}{2}(105 - \alpha) \quad (25)$$

となる。分析 1、2 双方において、 $\alpha = 82$ と推定されたことから、

$$\therefore \gamma \cong 11.6 \quad (26)$$

と推定される。 α の値が分析 1、2 の間で違いがないことから、 γ の値も分析 1、2 双方で同じ値となることに注意されたい。

4.3.4. まとめ

分析 1 においては、需要関数、費用関数は以下のように推定された。

$$\text{需要関数 : } p = 134 - 2(q_{AC} + q_{IC}) \quad (27)$$

$$\text{費用関数 : } c_A = 82q_A + 3.0q_A^2, \quad c_I = 82q_I, \quad c_M = 82q_M + 11.6q_M^2 \quad (28)$$

他方で分析 2 では、以下のように推定された。

$$\text{需要関数 : } p = 134 - 2(q_{AC} + q_{IC}) \quad (29)$$

$$\text{費用関数 : } c_A = 82q_A + 0.5q_A^2, \quad c_I = 82q_I, \quad c_M = 82q_M + 11.6q_M^2 \quad (30)$$

4.4. MHI の商業受注について

本節では、前節までで推定した需要関数、費用関数を用いて、MHI の大型ロケット打上げ市場において商業受注をする場合の経済的評価をおこなう。

以下においては、政府からの補助金がなく MHI がクールノー競争を行った場合(分析 A)、MHI は利潤最大化行動をせず 2 機の商業打上げをおこない、その赤字を政府が補填する場合(分析 B) の 2 つの場合について、分析 1、2 のそれぞれのパラメータの値を用いて分析する。なお MHI が利潤最大化行動をとることで 2 機の商業打上げをおこなうように、従量的な補助金を政府が MHI に与える場合の分析もおこなったが、分析 B と同様の結果が得られたため、本稿では記さない。

4.4.1. 分析 1-A

分析 1-A では、分析 1 で得られたパラメータの値を用いて、MHI が政府からの補助を受けず、大型ロケット打上げ市場でクールノー競争をする場合について分析する。分析 1 では、Arianespace は利潤最大化行動をとらずにただ 13 機のロケットを打上げ、その赤字を

²⁰ \$1 = ¥80.84 として計算。三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング HP「外国為替相場:2011 年平均」にて、2011 年の年間平均 TTS が \$1 = ¥80.84 であったことより。

EGAS で補填している場合についてパラメータの推定をおこない、その結果として、

$$\text{需要関数 : } p = 134 - 2(q_{AC} + q_{IC} + q_{MC}) \quad (31)$$

$$\text{費用関数 : } c_A = 82q_A + 3.0q_A^2, \quad c_I = 82q_I, \quad c_M = 82q_M + 11.6q_M^2 \quad (32)$$

のような結果が得られた。

分析 1 と同様の考え方で、ILS の FOC は、

$$-4q_{IC} + a - 2(q_{AC} + q_{MC} + 2) - \alpha = 0 \quad (33)$$

のように表される。また、MHI の非商業打上げ数が 2 機であることから、MHI が直面する問題は、

$$\max_{q_{MC} \geq 0} \pi_M = \{a - 2(q_{AC} + q_{IC} + q_{MC})\}(q_{MC} + 2) - \alpha(q_{MC} + 2) - \gamma(q_{MC} + 2)^2 \quad (34)$$

である。Arianespace の商業打上げ数は $q_{AC} = 10$ 機であることを踏まえると、

$$q_{IC} = 7, \quad q_{MC} = 0 \quad (35)$$

となり、

$$p = 100, \quad \pi_A = -270, \quad \pi_I = 162, \quad \pi_M = -10.3 \quad (36)$$

であることが分かる。なお MHI の赤字は、非商業打上げから生じているものであることに留意されたい。この分析から、MHI は政府の援助なしには商業衛星市場でシェアを確保することができないことが分かる。

4.4.2. 分析 1-B

分析 1-B では、分析 1 で得られたパラメータの値を用いて、MHI は利潤最大化行動をせず 2 機の商業打上げをおこない、その赤字を政府が補填する場合について分析する。

ILS の FOC は、

$$-4q_{IC} + a - 2(q_{AC} + q_{MC} + 2) - \alpha = 0 \quad (37)$$

のように表される。Arianespace の商業打上げ数は 10 機であり、MHI の商業打上げ数は 2 機であることから、

$$q_{IC} = 6 \quad (38)$$

となり、このとき、

$$p = 98, \quad \pi_A = -296, \quad \pi_I = 128, \quad \pi_M = -121.2 \quad (39)$$

である。

4.4.3. 分析 2-A

分析 2-A では、分析 2 で得られたパラメータの値を用いて、MHI が政府からの補助を受けず、大型ロケット打上げ市場でクールノー競争をする場合について分析する。分析 2 では、Arianespace がクールノー競争をおこなうことによって総打上げ数が 13 機になるように、ロケット 1 機あたり s の従量的な補助金を EGAS として与えている場合についてパラ

メータの推定をおこない、その結果として、

$$\text{需要関数 : } p = 134 - 2(q_{AC} + q_{IC} + q_{MC}) \quad (40)$$

$$\text{費用関数 : } c_A = 82q_A + 0.5q_A^2, \quad c_I = 82q_I, \quad c_M = 82q_M + 11.6q_M^2 \quad (41)$$

のような結果が得られた。

Arianespace、ILS の FOC はそれぞれ、

$$-2(\beta + 2)q_{AC} + a - 2(q_{IC} + q_{MC} + 3) + s - \alpha - 6\beta = 0 \quad (42)$$

$$-4q_{IC} + a - 2(q_{AC} + q_{MC} + 2) - \alpha = 0 \quad (43)$$

であり、MHI の目的関数は

$$\max_{q_{MC} \geq 0} \pi_M = \{a - 2(q_{AC} + q_{IC} + q_{MC})\}(q_{MC} + 2) - \alpha(q_{MC} + 2) - \gamma(q_{MC} + 2)^2 \quad (44)$$

であることから、

$$q_{IC} = 7, \quad q_{MC} = 0 \quad (45)$$

$$p = 100, \quad \pi_A = 151, \quad \pi_I = 162, \quad \pi_M = -10.3 \quad (46)$$

となる。このことから分析 2-A においても分析 1-A と同様に、政府の補助金なしでは MHI は商業衛星打上げ市場においてシェアを確保することができないということが分かった。

4.4.4. 分析 2-B

分析 2-B では、分析 2 で得られたパラメータの値を用いて、MHI は利潤最大化行動をせず 2 機の商業打上げをおこない、その赤字を政府が補填する場合について分析する。

Arianespace、ILS の FOC はそれぞれ、

$$-2(\beta + 2)q_{AC} + a - 2(q_{IC} + q_{MC} + 3) + s - \alpha - 6\beta = 0 \quad (47)$$

$$-4q_{IC} + a - 2(q_{AC} + q_{MC} + 2) - \alpha = 0 \quad (48)$$

のように表される。Arianespace の商業打上げ数は 10 機であり、MHI の商業打上げ数は 2 機であることから、

$$s = 22.8, \quad q_{IC} = 6 \quad (49)$$

となり、このとき、

$$p = 98, \quad \pi_A = 125, \quad \pi_I = 128, \quad \pi_M = -121.2 \quad (50)$$

である。

4.4.5. まとめ

ここでは、これまでの分析における仮定と、分析によって得られた結果をまとめる。

表4 分析のまとめ

| | 分析1-A | 分析1-B | 分析1-C | 分析2-A | 分析2-B | 分析2-C |
|------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Arianespaceの行動原理 | 利潤最大化しない (13機打上げる) | 利潤最大化しない (13機打上げる) | 利潤最大化しない (13機打上げる) | クールノー競争 (qA=13のようにsを決定) | クールノー競争 (qA=13のようにsを決定) | クールノー競争 (qA=13のようにsを決定) |
| ILSの行動原理 | クールノー競争 | クールノー競争 | クールノー競争 | クールノー競争 | クールノー競争 | クールノー競争 |
| MHIの行動原理 | クールノー競争 | 利潤最大化しない (4機打上げる) | - | クールノー競争 | 利潤最大化しない (4機打上げる) | - |
| Arianespaceへの補助金 | 一括 | 一括 | 一括 | 従量 | 従量 | 従量 |
| MHIへの補助金 | なし | 一括 | - | なし | 一括 | - |
| p | 100 | 98 | 102 | 100 | 98 | 102 |
| qAC | 10 | 10 | 8 | 10 | 10 | 8 |
| qIC | 7 | 6 | 8 | 7 | 6 | 8 |
| qMC | 0 | 2 | - | 0 | 2 | - |
| π A | -270 | -296 | -244 | 151 | 125 | 177 |
| π I | 162 | 128 | 200 | 162 | 128 | 200 |
| π M | -10.3 | -121.2 | - | -10.3 | -121.2 | - |

4.5. Arianespace へ打上げを委託する場合

これまでの分析で得られた主要な結果の1つは、HIIA ロケットが商業受注をおこなうためには、ひいては HIIA ロケットの基盤を維持するためには日本政府の補助金が必要不可欠であるということである。ここでは日本が HIIA ロケットの維持を完全に取りやめた場合の分析（分析 C）を通じて、HIIA ロケットの基盤を維持するためにはどれほどの費用を政府が負担しなければならないかを考察する。日本が HIIA ロケットの基盤維持を諦めた場合には、これまで HIIA ロケットに打上げられていた政府衛星を、他国に打上げてもらう必要が生じる。本稿では、現実への妥当性から²¹、日本の政府衛星の打上げを Arianespace に依頼する場合を想定して分析をおこなう。

4.5.1. 分析 1-C

分析 1-C では、分析 1 で推定されたパラメータの値を用いて、Arianespace に日本の政府衛星の打上げを委託する場合について分析する。Arianespace は欧州の政府衛星分 3 機と、日本の政府衛星分 2 機の打上げを踏まえて、総打上げ数を 13 機にするため、8 機の商業打上げをおこなう。ILS の FOC は、

$$-4q_{IC} + a - 2q_{AC} - 4 - \alpha = 0 \quad (51)$$

であるため、

$$q_{IC} = 8 \quad (52)$$

となり、このとき、

$$p = 102, \quad \pi_A = -244, \quad \pi_I = 200 \quad (53)$$

²¹ MHI と Arianespace、ボーイング社（米）はバックアップ協定を結ぶなど、良好な関係を築いていることなどから。

である。

4.5.2. 分析 2-C

ここでは、分析 2 で用いた仮定の下で分析をおこなう。Arianespace は非商業打上げ 5 機を踏まえて、以下の問題に直面する。

$$\max_{q_{AC}} \pi_A = \{a - 2(q_{AC} + q_{IC})\}(q_{AC} + 5) + s(q_{AC} + 5) - \alpha(q_{AC} + 5) - \beta(q_{AC} + 5)^2 \quad (54)$$

FOC より、

$$-2(\beta + 2)q_{AC} + a - 2(q_{IC} + 5) + s - \alpha - 10\beta = 0 \quad (55)$$

が得られる。ILS の FOC は上と同様に

$$-4q_{IC} + a - 2q_{AC} - 4 - \alpha = 0 \quad (56)$$

であるため、

$$s = 18.8, \quad q_{IC} = 8 \quad (57)$$

となり、このとき、

$$p = 102, \quad \pi_A = 177, \quad \pi_I = 200 \quad (58)$$

となる。

4.6. H II A ロケットの基盤維持のために政府が負担する費用

以上の分析を踏まえて、H II A ロケットを維持するために日本政府が負担しなければいけない費用について分析をおこなう。現在の年間平均 2 機の打上げでは中長期的に H II A ロケットの基盤維持はできないため、商業打上げをおこない年間 4 機を確保するか(分析 B)、あるいは H II A ロケットの基盤維持を諦め、政府衛星の打上げに関しては Arianespace に任せる(分析 C) 必要がある。ここでは、分析 1、2 それぞれのパラメータの値を用いて、分析 B と分析 C との結果を比較する。なお、H II A ロケットの基盤維持を取りやめた場合には、技術の維持や射場の維持に関わる費用も不要になる。現在日本政府は技術の維持、射場の維持のために約 150 億円の費用を負担しているが(図 2)、H II A ロケットの基盤維持を取りやめた場合には、それらの費用を負担する必要もなくなることに注意が必要である。

4.6.1. 分析 1-B と分析 1-C の比較

分析 1 では、Arianespace は利潤最大化行動をとらずにただ 13 機のロケットを打上げ、その赤字を EGAS で補填している場合についてパラメータの推定をおこなった。その上で分析 1-B においては、日本が H II A ロケットの基盤を維持し年間 4 機の H II A の打上げをおこなう場合について分析した。この場合、政府は非商業打上げの代金として \$196M を MHI に支払い、さらに MHI が被った \$121.2M の赤字を補填する必要がある。他方で分析 1-C では、日本が H II A ロケットの基盤維持を完全に取りやめ、Arianespace に政府衛星の

打上げを依頼する場合について分析をおこなった。この場合では、日本政府は\$204M の代金を Arianespace に支払う必要がある。したがって、日本政府は\$113.2M \cong 107 億円²² の費用を負担する必要があることが分かる。また、HIIA ロケットの基盤維持を取りやめた場合には技術、射場の維持に関わる費用約 150 億円も不要となるため、HIIA ロケットの基盤維持のために日本政府が負担する費用は $107 + 150 = 257$ 億円である。

4.6.2. 分析 2-B と分析 2-C の比較

分析 2 では、Arianespace がクールノー競争をおこなうことによって総打上げ数が 13 機になるように、ロケット 1 機あたり s の従量的な補助金を EGAS として与えている場合についてパラメータの推定をおこなった。分析 2-B と分析 2-C とを比較した場合も、分析 1-B、1-C との比較と同様に、日本政府は\$113.2M \cong 107 億円の費用を負担する必要となり、技術、射場の維持に関わる費用を考慮すると、HIIA ロケットの基盤維持のためには日本政府は $107 + 150 = 257$ 億円を負担する必要があることが分かる。

5章 結果の解釈と政策提言

5.1. 結果の解釈

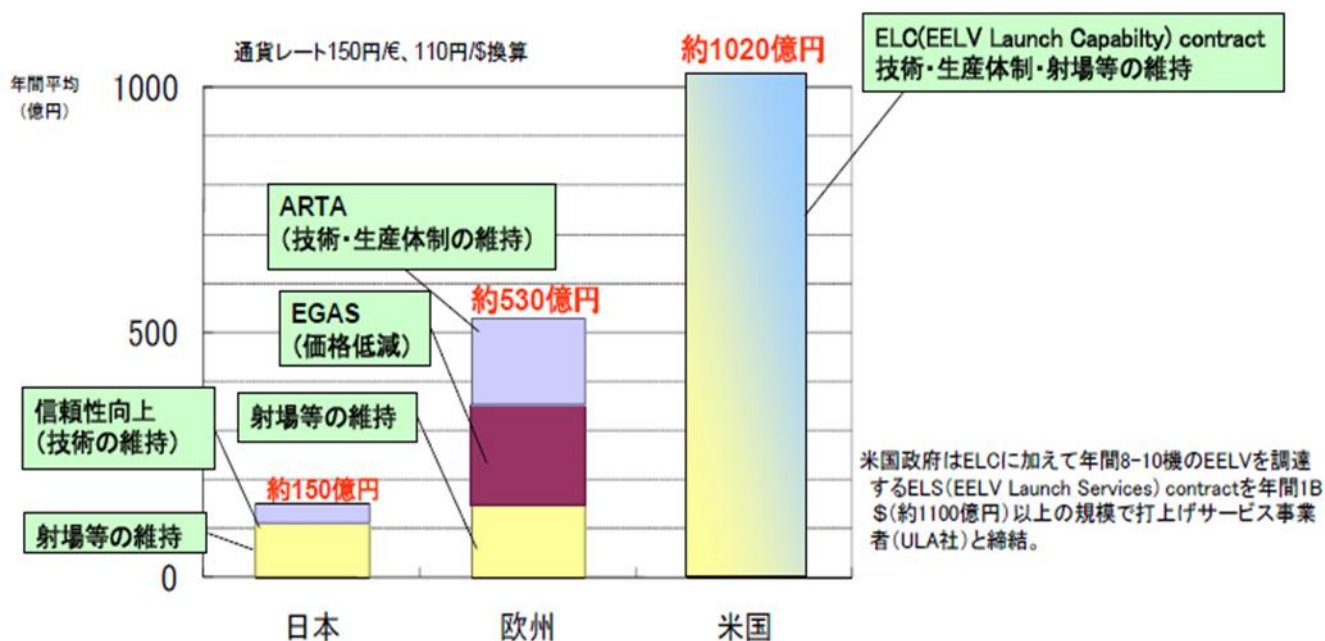
4 章の分析より、中長期的な HIIA ロケットの基盤維持のためには、日本政府は現在交付している補助金(約 150 億円)に加えて年に\$113.2M \cong 107 億円の追加的な費用を負担し、合計約 250 億円の費用を負担する必要があることが分かった。MHI は、「打上げ費用を 70 ~ 80 億円に抑えて商用衛星打ち上げ市場で受注を獲得するため、射場の点検費および修繕費として 20 ~ 30 億円/回の公的負担を求めている」²³が、年に 4 機の打上げを確保すると MHI は \$121.2M \cong 114.4 億円の赤字を被るという本分析結果はこれと整合的なものとなっている。

政府の負担額 250 億円はどれだけの規模なのか。図 2 の通り、我が国の政府支援は欧米に比べて非常に小さく、仮に、政府の負担が 107 億円増加しても、まだ欧米の政府支援より小さいことが分かる。

²² \$1 = ¥94.57 として計算。三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング HP「外国為替相場:2009 年平均」にて、2009 年の年間平均 TTS が \$1 = ¥94.57 であったことより。

²³ 『世界の宇宙インフラデータブック ロケット編』(社団法人 日本航空宇宙工業会、平成 23 年 3 月)

図2 基幹ロケット事業基盤維持に係る政府支援の比較 (2010) (再掲)



しかし、政府支援が大きい欧米は、それだけ宇宙関連予算も大きい。宇宙関連予算は、米国は日本の約13倍、欧州は日本の約2倍以上である。日本の宇宙関連予算は2009年において3,488億円であり、そのうち打上げや信頼性向上のために計上された予算は約970億円である²⁴。250億円の負担は、この予算の4分の1にあたる。HII Bの運用などもこの予算には含まれていることを考えると、大きな負担ともいえる。とはいえ、政府の衛星を増やすよりは負担が小さい。例えば、2006年HII Aで打上げられた「だいち」(ALOS、陸域観測技術衛星)は、約10年の開発期間で開発費が約470億円、5年の運用で運用費が約145億円かかっているし、2009年にHII Aで打ち上げられた「いぶき」(GOSAT、温室効果ガス観測技術衛星)は約8年の開発期間で開発費が約180億円、5年の運用で運用費が約50億円かかっている。これらの開発期間および開発費用、運用費用を用いても1機の打上げ増加にしかつながらない。ただし、政府衛星を増加させるメリットはHII Aの打上げ機会の増加だけではなく、例えば「だいち」なら災害監視、「いぶき」なら温室効果ガス測定などの目的の達成が大きなメリットとなることは忘れてはならない。

5.2. 政策提言

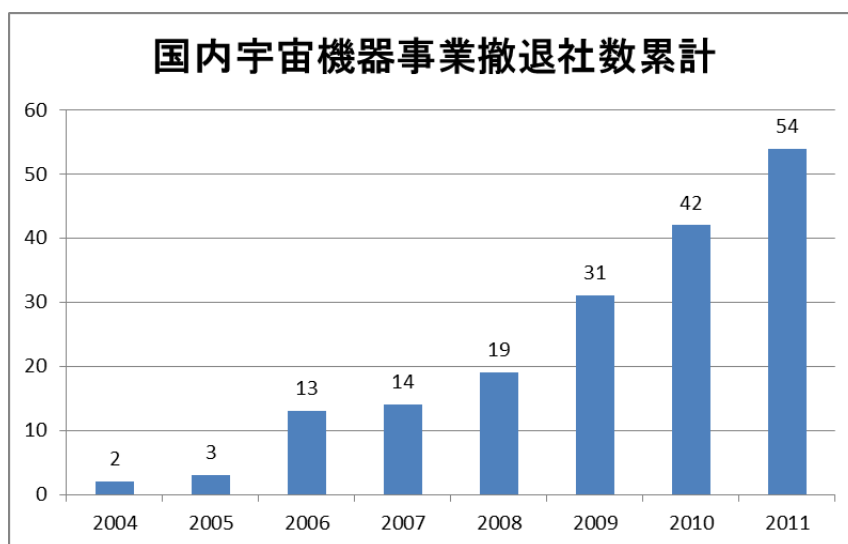
宇宙基本計画では、「宇宙輸送システムは、我が国が必要な時に、独自に宇宙空間に必要な人工衛星の打上げを行うために、維持することが不可欠な技術である」とされている。それは、「我が国が必要な時に、独自に宇宙空間に必要な人工衛星の打上げを行う」ことのできる自律的な宇宙輸送システムは、我が国の総合的な安全保障の観点から必要不可欠で

²⁴ 『平成21年度宇宙関係予算 (政府案) について』 (宇宙開発戦略本部事務局、平成21年2月5日)

あり、さらには ISS への物資輸送ミッションなどの国際協力や、宇宙開発における国際的な地位の確保にも役に立っているからである。輸送システムの自律を継続させなかったことで地位を維持できなかった例として、イギリスの事例が挙げられる。イギリスは、1971年に自国での輸送システムの確立に成功させたが、経済効果を重視する政策をとったサッチャー政権時代に輸送システムの開発は中止され、以降衛星の打上げを他国に依存せざるを得なくなった。そのため、宇宙輸送システムの欧州全体での開発を提案したのはイギリスであるにも関わらず、現在では輸送システム開発を続けたフランスがヨーロッパの宇宙開発をけん引している。

また、宇宙基本計画には、「不可欠な」宇宙輸送システムの維持のために、「国は引き続き国際競争力を維持・向上するための信頼性の向上など改良策を推進するとともに、今後拡大が予想される多様な衛星需要に合わせ、最適なロケットで効率的に対応するための施策を推進する」とともに、「政府関係の人工衛星等を打上げる場合には国産ロケットを優先的に使用することを基本」とし、「我が国の民間企業が人工衛星を打ち上げる場合にも、国産ロケットの使用を奨励する」ように明記されている。しかし、第 2 章で述べたように国際競争で優位に立つには価格競争力も必要であるし、我が国の民間企業の人工衛星打上げは価格や信頼性の優位性から海外のロケットで打上げているのが現状である²⁵。そのため、我が国の宇宙輸送システムの中核を担う HIIA ロケットの打上げは、年間 3 機を割り込んでおり、生産基盤の維持ができない状態にある。すでに 2004 年以降、2013 年までに約 370 社中 54 社のメーカーが撤退する見込みであるという²⁶。

図 3 国内宇宙機器事業撤退社数累計²⁷



²⁵ 例えば、スカパーJSAT 株式会社は通信衛星 JCSAT を Ariane5 で打上げている。

²⁶ 『我が国の輸送システムについて』（宇宙開発戦略本部事務局、平成 23 年 2 月 24 日）より抜粋

²⁷ 『今後の宇宙政策の在り方に関する有識者会議 提言書』（宇宙開発戦略本部、平成 22 年 4 月 20 日）より筆者作成

メーカーの撤退は、従来の部品が手に入らず、設計変更を余儀なくさせるリスクを生み出す可能性があり、それによりロケット打上げコストがかかり生産基盤の維持がさらに困難になる可能性がある。

仮に基盤を維持できなくなり、本分析でおこなったように欧州に打上げを依存すると、先に述べた安全保障や国際協力、地位の確保といった宇宙開発の「ソフトパワー」²⁸を失う上に、欧州の宇宙輸送システム政策に左右されることによるリスクに直面するだろう。欧州が Ariane5 に補助金を与えてまで商業衛星打上げを積極的におこなっているのは、ProtonM の独占状態を防ぐ目的もあると考えられる。しかし、欧州が財政的制約などから補助金政策を維持できなくなれば、打上げを依存する Ariane5 の打上げ価格が上昇し我が国に多大な費用がかかるだけでなく、それに伴い ProtonM も打上げ価格を上昇させる可能性が考えられ、全体の社会的厚生が減少しうる。

いま、本当に自律的な宇宙輸送システムが不可欠であると考えるのであれば、信頼性向上のための技術改良や衛星需要への適応はもちろんだが、打上げ本数を確実に確保するための金銭的補助的政策も必要なのではないだろうか。今後の検討が期待される。

6章 今後の課題

ここでは、本研究における問題点と今後の課題について述べる。

① 需要関数の形状について

本稿では、需要関数については推定が困難であるとして、需要関数は線形で傾きは -2 であることを仮定した。しかしながら、需要関数に関して何らかの推定をおこなうことができれば、より精緻な結果が得られると考えられる。

② ベルトラン競争の想定

本研究では、各打上げサービス企業の行動原理として主にクールノー競争を用いた。しかしながら、実際の大型ロケット打上げ市場においては、需要の減少や多くの打上げサービス企業の台頭により、価格競争がおこなわれているという指摘もある。したがって、各打上げサービス企業がベルトラン競争をおこなった場合の結果についても、考慮する必要があるであろう。

③ 各ロケットの異質性について

本稿では単純化のために、各ロケットを同質的であると仮定して議論を進めたが、各ロケットによって異なる価格が成立している年もあることから、各ロケットの異質

²⁸ ソフトパワーとは、Joseph Samuel Nye, Jr.の定義である「強制や報酬ではなく、魅力によって望む結果を得る能力」を指す。

性は無視出来るほど小さいとは言い難いだろう。

④ 政府衛星の打上げを増加させる可能性について

本稿では、HⅡA ロケットの基盤維持に関わるコストを算出するために、HⅡA ロケットの基盤維持を完全に諦めた場合と、年間 2 機の商業打上げをおこなう場合とを比較した。しかしながら、実際にはこれらの場合に加えて、現在年間 2 機程度の非商業打上げを、年間 4 機にまで増加させる可能性も考えられるであろう。

⑤ 日本の民間衛星の打上げを優先的に HⅡA ロケットでおこなう可能性について

現在、国内民間企業（スカパーJAST 株式会社など）の人工衛星の打上げは、海外のロケットを用いておこなわれることが主である。しかしながら宇宙基本計画では、国内民間企業の人工衛星を打上げる場合にも国産ロケットの使用を推奨することが記されている。

⑥ 限られたデータでの分析

宇宙開発に関わるデータの公開は非常に限定されているため、本研究では数多くの仮定をおいて分析をおこなった。今後、さらなるデータを得られることができれば、より一層精緻な分析をおこなうことができると考えられる。近年、宇宙開発が技術力の象徴としての意味合いから、宇宙の利用の側面を重視する方向へと変化していることが感じられる。そのような流れに伴い、宇宙開発の便益がその費用を上回るか否かは、より厳密に分析されるべきである。そのために、今後より一層のデータ公開を求める声も強まっていくであろう。

謝辞

本稿の執筆にあたり、多くの方々にお世話になった。東京大学社会科学研究所・松村敏弘教授と東京大学公共政策大学院・戒能一成非常勤講師からは、毎回の授業を通じて熱意あるご指導を頂いた。また、辻野照久様（JAXA 国際部国際課特任担当役）、笹村舞実様（JAXA 国際部国際課）からは、研究に関する有益なコメントを数多く頂いた。この場を借りて、厚く御礼を申し上げます。なお、本稿における主張及び誤りは全て筆者たちに帰するものであり、ご指導を頂いた方々の見解を示すものではない事をご了承頂きたい。

本研究は筆者たちの長きにわたる学生生活の総括ともなるべきものである。これまでの学生生活では多くの先生方、友人の励ましに支えられて、筆者たちの学生生活は非常に充実したものであった。とりわけ本稿の作成にあたっては、松村先生、戒能先生の下で共に学んだ東京大学公共政策大学院専門職学位課程 2 年の森崎修平さん、好井俊春さんらの学内外における協力が大きな心の励みとなった。ここで御礼を申し上げます。そして最後に、

これまでに学費を援助して下さったことに加えて、数々の心温かい励ましをして下さった各務、森脇両人の両親に対して、この場を借りて深謝の意を表する。

参考文献

- ・ 浅田正一郎(2009)『HIIAによる商用衛星打上げ輸送サービス』精密工学会誌 vol.75,No4
- ・ 社団法人日本航空宇宙工業会(2011)『世界の宇宙インフラデータブック ロケット編』
- ・ 鈴木一人(2011)『宇宙開発と国際政治』岩波書店
- ・ 瀧田実(1999)『特集・世界のロケット最前線』誠文堂新光社
- ・ 的川泰宣(2002)『トコトンやさしい宇宙ロケットの本』日刊工業新聞社

- ・ Federal Aviation Administration(FAA) (各年) ”Commercial Space Transportation: Year in Review 2000~2010.”
http://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/ast/reports_studies/year_review/ (2012年2月14日閲覧)
- ・ Federal Aviation Administration and the Commercial Space Transportation Advisory Committee (各年) “Commercial Space Transportation Forecasts 1999~2011.”
http://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/ast/reports_studies/forecast_s/ (2012年2月14日閲覧)
- ・ 宇宙開発戦略本部(2009) 『平成21年度宇宙関係予算(政府案)について』
<https://www.kantei.go.jp/jp/singi/utyuu/senmon/dai4/siryou1.pdf> (2012年2月14日閲覧)
- ・ 宇宙開発戦略本部(2010) 『今後の宇宙政策の在り方に関する有識者会議 提言書』
http://www.kantei.go.jp/jp/singi/utyuu/seisaku_kaigi/dai7/siryou7_1.pdf (2012年2月14日閲覧)
- ・ 宇宙開発戦略本部(2011) 『我が国の輸送システムについて』
<http://www.kantei.go.jp/jp/singi/utyuu/senmon/dai12/siryou2.pdf> (2012年2月14日閲覧)
- ・ 宇宙基本計画骨子
http://www.kantei.go.jp/jp/singi/utyuu/senmon/dai6/siryou2_1.pdf (2012年2月14日閲覧)
- ・ 三菱UFJリサーチ&コンサルティング 『外国為替相場：2009年平均』
<http://www.murc.jp/fx/yearend/index.php?id=2009> (2012年2月14日閲覧)
- ・ 三菱UFJリサーチ&コンサルティング 『外国為替相場：2011年平均』
<http://www.murc.jp/fx/yearend/index.php?id=2011> (2012年2月14日閲覧)
- ・ 文部科学省・宇宙航空研究開発機構(JAXA) (2011) 『我が国の宇宙輸送系の現状と今後の

方向性』

http://www.kantei.go.jp/jp/singi/utyuu/senmon/dai12/siryous3_2.pdf (2012年2月14日
閲覧)

- Arianespace HP
<http://www.arianespace.com>
- China Great Wall Industry Corporation (中国長城工業公司) HP
<http://www.cgwic.com/>
- European Space Agency (ESA) HP
<http://www.esa.int/esaCP/index.html>
- International Launch Services Inc. HP
<http://www.ilslaunch.com>
- Sea Launch Co. HP
<http://www.sea-launch.com/>
- 宇宙航空研究開発機構(JAXA)HP
<http://www.jaxa.jp/>
- 宇宙技術開発株式会社 HP
<http://www.sed.co.jp/index.html>

補論

補論 1 : 分析 3 (妥当でない分析)

ここでは、Arianespace がクールノー競争をおこない、そこで生じた赤字を EGAS で補填している場合のパラメータの推定をおこなう。このケースでは推定することの出来るパラメータの数が分析 1、2 よりも 1 つ多いため、Arianespace、ILS の費用関数をそれぞれ、

$$c_A = \alpha q_A + \beta q_A^2, \quad c_I = \gamma q_I \quad (59)$$

であると仮定する。2009 年には、Arianespace は 3 機の非商業打上げが決定しているため、Arianespace の目的関数は、以下ようになる。

$$\max_{q_{AC}} \pi_A = \{a - 2(q_{AC} + q_{IC})\}(q_{AC} + 3) - \alpha(q_{AC} + 3) - \beta(q_{AC} + 3)^2 \quad (60)$$

FOC より、

$$-2(\beta + 2)q_{AC} + a - 2q_{IC} - 6 - \alpha - 6\beta = 0 \quad (61)$$

が得られる。

他方で、ILS は 2009 年において 2 機の非商業打上げが決定しているため、ILS の目的関数は以下のように表すことができる。

$$\max_{q_{IC}} \pi_I = \{a - 2(q_{AC} + q_{IC})\}(q_{IC} + 2) - \gamma(q_{IC} + 2) \quad (62)$$

FOC より、

$$-4q_{IC} + a - 2q_{AC} - 4 - \gamma = 0 \quad (63)$$

となる。

ここで均衡において、

$$p^* = 100, \quad q_{AC}^* = 10, \quad q_{IC}^* = 7, \quad \pi_A^* = -270 \quad (64)$$

が成り立つことより、

$$(62) \text{より} : a - \alpha - 26\beta = 60 \quad (65)$$

$$(64) \text{より} : a - \gamma = 52 \quad (66)$$

$$\pi_A^* = 1300 - 13\alpha - 169\beta = -270 \quad (67)$$

$$\text{需要関数より} : 100 = a - 34 \quad (68)$$

を得る。これらを連立させて解くことによって、

$$a = 134, \quad \alpha \cong 168, \quad \beta \cong -3.6, \quad \gamma = 82 \quad (69)$$

が得られる。しかしながら、 $\beta \cong -3.6$ のときは Arianespace の目的関数が凸関数になるため、Arianespace の最適行動が FOC によって特徴付けられることと矛盾する。したがって、ここで得られた値は意味のないものである。

補論 2：感度分析

本稿では、需要曲線についてはその形状の推測が困難であるとして、傾き b を -2 であると仮定して分析をおこなった。ここでは、需要曲線の傾き b の値を $-0.5 \sim -3.5$ の範囲で変えた場合に、分析の結果がどのように変わりうるかを見る。

分析 1

| 分析1 | | | | | | | | | | | | | | |
|----------|-------|--|---------------------------------|----------|-------|-------|-----|-----|-----|----|-------|---------|---------|---------|
| パラメータの推定 | | | A：利潤最大化行動しない（13機打上げる）、I：クールノー競争 | | | | | | | | | | | |
| b | a | α | β | γ | S | p | qAC | qIC | | qC | CS | πA | πI | |
| 0.5 | 108.5 | 95.5 | 1.9 | 4.8 | 270 | 100 | 10 | 7 | | 17 | 72 | -270 | 41 | |
| 1 | 117.0 | 91.0 | 2.3 | 7.1 | 270 | 100 | 10 | 7 | | 17 | 145 | -270 | 81 | |
| 1.5 | 125.5 | 86.5 | 2.6 | 9.3 | 270 | 100 | 10 | 7 | | 17 | 217 | -270 | 122 | |
| 2 | 134.0 | 82.0 | 3.0 | 11.6 | 270 | 100 | 10 | 7 | | 17 | 289 | -270 | 162 | |
| 2.5 | 142.5 | 77.5 | 3.3 | 13.8 | 270 | 100 | 10 | 7 | | 17 | 361 | -270 | 203 | |
| 3 | 151.0 | 73.0 | 3.7 | 16.1 | 270 | 100 | 10 | 7 | | 17 | 434 | -270 | 243 | |
| 3.5 | 159.5 | 68.5 | 4.0 | 18.3 | 270 | 100 | 10 | 7 | | 17 | 506 | -270 | 284 | |
| 分析1-A | | A：利潤最大化行動しない（13機打上げる）、I：クールノー競争、M：クールノー競争 | | | | | | | | | | | | |
| b | a | α | β | γ | S | p | qAC | qIC | qMC | qC | CS | πA | πI | πM |
| 0.5 | 108.5 | 95.5 | 1.9 | 4.8 | 270 | 100 | 10 | 7 | 0 | 17 | 72.3 | -270 | 40.5 | -10.3 |
| 1 | 117.0 | 91.0 | 2.3 | 7.1 | 270 | 100 | 10 | 7 | 0 | 17 | 144.5 | -270 | 81.0 | -10.3 |
| 1.5 | 125.5 | 86.5 | 2.6 | 9.3 | 270 | 100 | 10 | 7 | 0 | 17 | 216.8 | -270 | 121.5 | -10.3 |
| 2 | 134.0 | 82.0 | 3.0 | 11.6 | 270 | 100 | 10 | 7 | 0 | 17 | 289.0 | -270 | 162.0 | -10.3 |
| 2.5 | 142.5 | 77.5 | 3.3 | 13.8 | 270 | 100 | 10 | 7 | 0 | 17 | 361.3 | -270 | 202.5 | -10.3 |
| 3 | 151.0 | 73.0 | 3.7 | 16.1 | 270 | 100 | 10 | 7 | 0 | 17 | 433.5 | -270 | 243.0 | -10.3 |
| 3.5 | 159.5 | 68.5 | 4.0 | 18.3 | 270 | 100 | 10 | 7 | 0 | 17 | 505.8 | -270 | 283.5 | -10.3 |
| 分析1-B | | A：利潤最大化行動しない（13機打上げる）、I：クールノー競争、M：利潤最大化行動しない（4機打上げる） | | | | | | | | | | | | |
| b | a | α | β | γ | S | p | qAC | qIC | qMC | qC | CS | πA | πI | πM |
| 0.5 | 108.5 | 95.5 | 1.9 | 4.8 | 276.5 | 99.5 | 10 | 6 | 2 | 18 | 81 | -276.5 | 32 | -61.2 |
| 1 | 117.0 | 91.0 | 2.3 | 7.1 | 283.0 | 99.0 | 10 | 6 | 2 | 18 | 162 | -283 | 64 | -81.2 |
| 1.5 | 125.5 | 86.5 | 2.6 | 9.3 | 289.5 | 98.5 | 10 | 6 | 2 | 18 | 243 | -289.5 | 96 | -101.2 |
| 2 | 134.0 | 82.0 | 3.0 | 11.6 | 296.0 | 98.0 | 10 | 6 | 2 | 18 | 324 | -296 | 128 | -121.2 |
| 2.5 | 142.5 | 77.5 | 3.3 | 13.8 | 302.5 | 97.5 | 10 | 6 | 2 | 18 | 405 | -302.5 | 160 | -141.2 |
| 3 | 151.0 | 73.0 | 3.7 | 16.1 | 309.0 | 97.0 | 10 | 6 | 2 | 18 | 486 | -309 | 192 | -161.2 |
| 3.5 | 159.5 | 68.5 | 4.0 | 18.3 | 315.5 | 96.5 | 10 | 6 | 2 | 18 | 567 | -315.5 | 224 | -181.2 |
| 分析1-C | | A：8本打上げる、I：クールノー競争 | | | | | | | | | | | | |
| b | a | α | β | | S | p | qAC | qIC | | qC | CS | πA | πI | |
| 0.5 | 108.5 | 95.5 | 1.9 | | 263.5 | 100.5 | 8 | 8 | | 16 | 64 | -263.5 | 50 | |
| 1 | 117.0 | 91.0 | 2.3 | | 257.0 | 101 | 8 | 8 | | 16 | 128 | -257.0 | 100 | |
| 1.5 | 125.5 | 86.5 | 2.6 | | 250.5 | 101.5 | 8 | 8 | | 16 | 192 | -250.5 | 150 | |
| 2 | 134.0 | 82.0 | 3.0 | | 244.0 | 102 | 8 | 8 | | 16 | 256 | -244.0 | 200 | |
| 2.5 | 142.5 | 77.5 | 3.3 | | 237.5 | 102.5 | 8 | 8 | | 16 | 320 | -237.5 | 250 | |
| 3 | 151.0 | 73.0 | 3.7 | | 231.0 | 103 | 8 | 8 | | 16 | 384 | -231.0 | 300 | |
| 3.5 | 159.5 | 68.5 | 4.0 | | 224.5 | 103.5 | 8 | 8 | | 16 | 448 | -224.5 | 350 | |

分析 2

| 分析2 | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------|-------|---|---|----------|-------|------|-------|-----|-----|-----|----|-------|---------|---------|---------|
| パラメータの推定 | | | A : クールノー競争 (qAC=10のようにsを決定) 、I : クールノー競争 | | | | | | | | | | | | |
| b | a | α | β | γ | S | s | p | qAC | qIC | | qC | CS | πA | πI | |
| 0.5 | 108.5 | 95.5 | 0.7 | 4.8 | 270 | 20.8 | 100 | 10 | 7 | | 17 | 72 | -63.5 | 41 | |
| 1 | 117.0 | 91.0 | 0.6 | 7.1 | 270 | 20.8 | 100 | 10 | 7 | | 17 | 145 | 8.0 | 81 | |
| 1.5 | 125.5 | 86.5 | 0.6 | 9.3 | 270 | 20.8 | 100 | 10 | 7 | | 17 | 217 | 79.5 | 122 | |
| 2 | 134.0 | 82.0 | 0.5 | 11.6 | 270 | 20.8 | 100 | 10 | 7 | | 17 | 289 | 151.0 | 162 | |
| 2.5 | 142.5 | 77.5 | 0.4 | 13.8 | 270 | 20.8 | 100 | 10 | 7 | | 17 | 361 | 222.5 | 203 | |
| 3 | 151.0 | 73.0 | 0.3 | 16.1 | 270 | 20.8 | 100 | 10 | 7 | | 17 | 434 | 294.0 | 243 | |
| 3.5 | 159.5 | 68.5 | 0.3 | 18.3 | 270 | 20.8 | 100 | 10 | 7 | | 17 | 506 | 365.5 | 284 | |
| 分析2-A | | A : クールノー競争 (qAC=10のようにsを決定) 、I : クールノー競争、M : クールノー競争 | | | | | | | | | | | | | |
| b | a | α | β | γ | S | s | p | qAC | qIC | qMC | qC | CS | πA | πI | πM |
| 0.5 | 108.5 | 95.5 | 0.7 | 4.8 | 270 | 20.8 | 100 | 10 | 7 | 0 | 17 | 72.3 | -63.5 | 40.5 | -10.3 |
| 1 | 117 | 91 | 0.6 | 7.1 | 270 | 20.8 | 100 | 10 | 7 | 0 | 17 | 144.5 | 8.0 | 81 | -10.3 |
| 1.5 | 125.5 | 86.5 | 0.6 | 9.3 | 270 | 20.8 | 100 | 10 | 7 | 0 | 17 | 216.8 | 79.5 | 121.5 | -10.3 |
| 2 | 134 | 82 | 0.5 | 11.6 | 270 | 20.8 | 100 | 10 | 7 | 0 | 17 | 289.0 | 151.0 | 162 | -10.3 |
| 2.5 | 142.5 | 77.5 | 0.4 | 13.8 | 270 | 20.8 | 100 | 10 | 7 | 0 | 17 | 361.3 | 222.5 | 202.5 | -10.3 |
| 3 | 151 | 73 | 0.3 | 16.1 | 270 | 20.8 | 100 | 10 | 7 | 0 | 17 | 433.5 | 294.0 | 243 | -10.3 |
| 3.5 | 159.5 | 68.5 | 0.3 | 18.3 | 270 | 20.8 | 100 | 10 | 7 | 0 | 17 | 505.8 | 365.5 | 283.5 | -10.3 |
| 分析2-B | | A : クールノー競争 (qAC=10のようにsを決定) 、I : クールノー競争、M : 利潤最大化行動しない (4機打上げる) | | | | | | | | | | | | | |
| b | a | α | β | γ | S | s | p | qAC | qIC | qMC | qC | CS | πA | πI | πM |
| 0.5 | 108.5 | 95.5 | 0.7 | 4.82 | 276.5 | 21.3 | 99.5 | 10 | 6 | 2 | 18 | 81 | -70 | 32 | -61.2 |
| 1 | 117 | 91 | 0.6 | 7.07 | 283 | 21.8 | 99 | 10 | 6 | 2 | 18 | 162 | -5 | 64 | -81.2 |
| 1.5 | 125.5 | 86.5 | 0.6 | 9.32 | 289.5 | 22.3 | 98.5 | 10 | 6 | 2 | 18 | 243 | 60 | 96 | -101.2 |
| 2 | 134 | 82 | 0.5 | 11.6 | 296 | 22.8 | 98 | 10 | 6 | 2 | 18 | 324 | 125 | 128 | -121.2 |
| 2.5 | 142.5 | 77.5 | 0.4 | 13.8 | 302.5 | 23.3 | 97.5 | 10 | 6 | 2 | 18 | 405 | 190 | 160 | -141.2 |
| 3 | 151 | 73 | 0.3 | 16.1 | 309 | 23.8 | 97 | 10 | 6 | 2 | 18 | 486 | 255 | 192 | -161.2 |
| 3.5 | 159.5 | 68.5 | 0.3 | 18.3 | 315.5 | 24.3 | 96.5 | 10 | 6 | 2 | 18 | 567 | 320 | 224 | -181.2 |
| 分析2-C | | A : 8本打上げる (qAC=8のようにsを決定) 、I : クールノー競争 | | | | | | | | | | | | | |
| b | a | α | β | | S | s | p | qAC | qIC | | qC | CS | πA | πI | |
| 0.5 | 108.5 | 95.5 | 0.7 | | 263.5 | 20.3 | 100.5 | 8 | 8 | | 16 | 64 | -57 | 50 | |
| 1 | 117.0 | 91.0 | 0.6 | | 257 | 19.8 | 101 | 8 | 8 | | 16 | 128 | 21 | 100 | |
| 1.5 | 125.5 | 86.5 | 0.6 | | 250.5 | 19.3 | 101.5 | 8 | 8 | | 16 | 192 | 99 | 150 | |
| 2 | 134.0 | 82.0 | 0.5 | | 244 | 18.8 | 102 | 8 | 8 | | 16 | 256 | 177 | 200 | |
| 2.5 | 142.5 | 77.5 | 0.4 | | 237.5 | 18.3 | 102.5 | 8 | 8 | | 16 | 320 | 255 | 250 | |
| 3 | 151.0 | 73.0 | 0.3 | | 231 | 17.8 | 103 | 8 | 8 | | 16 | 384 | 333 | 300 | |
| 3.5 | 159.5 | 68.5 | 0.3 | | 224.5 | 17.3 | 103.5 | 8 | 8 | | 16 | 448 | 411 | 350 | |

分析 B と分析 C との比較

| 日本政府の支払額 | | | | | |
|----------|-------|-------|-------|---------|--------------|
| b | 分析1-B | 分析1-C | 差額 | 差額 (億円) | 差額(億円)+150億円 |
| 0.5 | 260.2 | 201 | 59.2 | 56.0 | 206.0 |
| 1 | 279.2 | 202 | 77.2 | 73.0 | 223.0 |
| 1.5 | 298.2 | 203 | 95.2 | 90.0 | 240.0 |
| 2 | 317.2 | 204 | 113.2 | 107.0 | 257.0 |
| 2.5 | 336.2 | 205 | 131.2 | 124.0 | 274.0 |
| 3 | 355.2 | 206 | 149.2 | 141.1 | 291.1 |
| 3.5 | 374.2 | 207 | 167.2 | 158.1 | 308.1 |
| b | 分析2-B | 分析2-C | 差額 | 差額 (億円) | 差額(億円)+150億円 |
| 0.5 | 260.2 | 201 | 59.2 | 56.0 | 206.0 |
| 1 | 279.2 | 202 | 77.2 | 73.0 | 223.0 |
| 1.5 | 298.2 | 203 | 95.2 | 90.0 | 240.0 |
| 2 | 317.2 | 204 | 113.2 | 107.0 | 257.0 |
| 2.5 | 336.2 | 205 | 131.2 | 124.0 | 274.0 |
| 3 | 355.2 | 206 | 149.2 | 141.1 | 291.1 |
| 3.5 | 374.2 | 207 | 167.2 | 158.1 | 308.1 |