

《研究ノート》

## 宇宙観光プロジェクトの資本コストについて

朝倉 啓一郎

## Capital Cost on Space Tourism Project

KEIICHIRO ASAKURA

## キーワード

宇宙観光 (Space Tourism), 資本コスト (Capital Cost), 正味現在価値 (Net Present Value; NPV), 宇宙船「観光丸」(Spaceship KANKO-MARU)

## 1. はじめに

今日の「エビデンスにもとづく政策 (Evidence-Based Policy; EBP, Evidence-Based Policymaking; EBPM)」や「規制影響分析 (Regulatory Impact Analysis, Regulatory Impact Assessment; RIA)」において、プロジェクトの分析・評価結果を左右する重要な概念・変数の一つは、割引率であろう。たとえば、アメリカ合衆国行政管理予算局 (Office of Management and Budget; OMB) は、政府プロジェクトの費用便益分析のためのガイドラインを作成し、その中で、基準となる割引率を7%とし、感度分析を行うことを述べている<sup>1)</sup>。そして、その Appendix-C においては、「リース-購入分析 (Cost-Effectiveness Analysis)」と「費用-効果分析 (Cost-Effectiveness Analysis)」のために、プロジェクト期間に対応した名目割引率と実質割引率を示し、年ごとに改訂している。また、同ガイドラインの割引率の例外とされる「水資源プロジェクト (Water resource projects)」および「連邦政府エネルギー管理プログラム (Federal energy management programs)」については、それぞれ、農務省およびエネルギー省の公式サイトに割引率が掲載されている<sup>2)</sup>。

もちろん、割引率は、国ごとにアプローチの方法が異なることが報告されているが<sup>3)</sup>、一端、公的な指針として具体的な数値が示されたならば、割引率そのものは、たとえ感度分析されるにせよ、外生変数としての性格を帯びることになり、割引率自体の検討は分析の主題から外れてしまうことになる。

その一方、評価対象プロジェクトの性格や位置づけが政府・公的プロジェクトから民間プロジェク

1) Guidelines and Discount Rates for Benefit-Cost Analysis of Federal Programs (Circular A-94)

2) 割引率は、つぎのとおりである。

・「水資源プロジェクト (Water resource projects)」の割引率

[https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/national/technical/econ/prices/?cid=nrcs143\\_009685](https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/national/technical/econ/prices/?cid=nrcs143_009685)

・「連邦政府エネルギー管理プログラム (Federal energy management programs)」の割引率

<https://energy.gov/eere/femp/downloads/2017-discount-rates>

3) たとえば、OECD (2009), OECD; 山本訳 (2011), 大谷他 (2013), 山本 (2009) を参照した。

トへと変化する場合には、外生変数として扱われる割引率は、やはり、資本の機会費用として、プロジェクトの要求・期待収益率として、そして、ハードルレートとして、改めて考察の対象となることになる。

そういったプロジェクトの環境変化が起きている分野の一つは、宇宙活動の分野である。そこでは、プロジェクトの基本的な性格が政府資金を想定したプロジェクトから、民間資金をベースにしたプロジェクトへと大きく変化しており、宇宙観光プロジェクトの評価モデルにおける Eilingsfeld and Schaezler (2000, 2002) の研究は、資金調達環境の変化に対応して、資本コストの想定値に疑問を呈するだけでなく、その値を推計し、さらに、評価モデルを再計算している。そして、評価の帰結として、初発的には、大型の低軌道宇宙観光ではなくサブオービタルの弾道旅行を主張するという、今日的な宇宙観光ビジネスのモデル選択と対応していることもあり、興味深い論考となっている。

したがって、本稿では、はじめに、宇宙観光について概観し、つぎに、Eilingsfeld and Schaezler (2000, 2002) の内容を確認し、その後、今日の宇宙観光ビジネスとの連動性について確認してみたい。

## 2. 宇宙観光について

宇宙を観光旅行したり、月を旅行するという「夢」は、おそらく自然発生的に生まれてきたであろうし、それに関連する小説・物語も多数あるが、とりわけジュール・ヴェルヌの著作が、著名な宇宙関係の研究者・実践家を生み出すきっかけとなったことは、広く指摘されているところである。本稿は、読書が読者の人生や思考活動にどのように影響を与えるかを検証する場ではないが、的川(2017)は、ジュール・ヴェルヌの著作を最も真剣に読み込んだ人物として、ツイオルコフスキーの名前を挙げている。ツイオルコフスキーは、宇宙へのロケット飛行にかんする「ツイオルコフスキーの公式」を定式化するだけでなく、多段ロケット、人工衛星、そして宇宙エレベータ等を具体的に構想しており、空想的な宇宙活動を科学的に具体的に考察した最初の人物である。

その後、液体燃料でロケットの打ち上げ実験を行ったゴダート、ツイオルコフスキーと同じく宇宙へのロケット飛行を提案したオーベルト、そして、米ソの宇宙開発競争の時代におけるフォン・ブラウンとコリョロフなど、歴史に名を刻む人々が生まれてきたが、とくに宇宙観光の視点から振り返るならば、工学的見地からの妥当性も含めて最も詳細に考察した人物の一人として、エーリケ (Ehnricke, K. A.) の名前をあげてもよからう。

Ehnricke (1968) が提案する軌道上の複合観光施設：宇宙観光センター<sup>4)</sup> (Orbital Tourist Facility) は、無重力状態での移動を楽しむダイナリウム (Dynarium)、そして、月の間、水星の間、火星の間、タイタンの間、宇宙観測室、実験室、ホテル、カジノおよび動物園などを含んで構想されている。それについては、宇宙観光の第一人者である長友信人が科学雑誌『宇宙時代』にて「エーリケの衛星軌道旅行施設 (宇宙観光シリーズ2)」として論考した後<sup>5)</sup>、長友『1992年宇宙観光旅行』(1986) に所収している。また、長友は、『宇宙時代』において、Hilton (1967) の軌道上・月面上のホテル<sup>6)</sup> を展

4) Ehnricke の宇宙構造物の日本語名は、長友 (1986) の訳語を使用する。

5) 『宇宙時代』no.9。なお、長友信人は「荒浜一昼」というペンネームで執筆している。

6) 軌道上のホテルについては、清水建設チームによる研究 (Matsumoto et al. (1989)) が具体的なコストモデルとともに展開しており、それについては、宇宙観光の著名な研究者であるコリンズが、自著のなかで (コリンズ (2013)) が高く評価している。なお、清水建設は、宇宙開発室を設置し、宇宙の活動・ビジネスに関連する研究書・啓発書を刊行してきたことでも知られている (黒田・清水建設宇宙開発室 (1991)、清水建設宇宙開発室 (1999)、松本・清水建設宇宙開発室 (2002))。

開した「ヒルトンの宇宙への夢（宇宙観光シリーズ1）」、「火星高速鉄道の走る日（宇宙観光シリーズ3）」、および「金星の遊覧飛行（宇宙観光シリーズ4）」を執筆し、『1992年宇宙観光旅行』に修正加筆して所収している<sup>7)</sup>。さらに、『1992年宇宙観光旅行』は、フォン・ブラウンやオニールのスペースコロニー<sup>8)</sup>の考察を展開する「スペースコロニーの旅」も章立てしており、同書が宇宙観光に関連する当時の主題を整理し、今日の、そして、将来の宇宙観光を見据えた内容を展開していることがわかる。

いずれにせよ、調査・探索目的であっても、もちろん観光目的であっても、人間が宇宙空間に行くためには、有人の宇宙輸送機が必要になる<sup>9)</sup>。これまでに提案されてきた宇宙空間への将来型輸送機を眺めてみると、いくつかの特徴によって、機種・機体が区分される。そこでは、再利用型（Reusable Launch Vehicle: RLV）の輸送機ならば、単段式宇宙輸送機（Single-Stage-To-Orbit: SSTO）と2段式宇宙往還機（Two-Stage-to-Orbit: TSTO）の区分、また、垂直離着陸機（Vertical Takeoff, Vertical Landing: VTOVL）、垂直離陸・水平着陸機（Vertical Takeoff, Horizontal Landing: VTOHL）、あるいは、水平離着陸機（Horizontal Takeoff, Horizontal Landing: HTOHL）の区分、さらには、有翼（Winged）か否かの区分等、詳細に整理していくことも出来よう。しかし、ここでは大まかに概観してみると<sup>10)</sup>、SSTOにかんしては、フィリップ・ボノ（Philip Bono）のSaturn Applications Single Stage to Orbit: SASSTO、それにもとづくゲーリー・ハドソン（Gary Hudson）のオシリス（Osiris）やフェニックス（Phoenix）、さらには、実験機ではあるが、その実証実験で有名となったDC-X:デルタクリッパー、KoelleのBeta、有翼のベンチャー・スター（VentureStar）、同じく有翼のイギリスのHOTOL、そして後に述べる日本ロケット協会の「観光丸」などが代表的なコンセプトであろう。また、第二次世界大戦中にドイツの技術者：ゼンガー（E. A. Saenger）が構想した有翼のスペースプレーンは、戦後、ロケットに有翼の有人機を取り付けたボーイング社のダイナソア（Dyna-Soar）の発想へとつながる。それは、その後、様々なリフティングボディ、米ソのスペースシャトルとミニシャトル、日本のHOPE、そしてフランスのエルメス（Hermes）にも影響を与え、1980年代から90年代にかけては、ドイツにおいて「ゼンガーII」という呼称のプロジェクト研究へとつながることとなった。

それ以外にもさまざまに提案されてきた宇宙輸送機のなかでも、宇宙観光プロジェクトに最も影響を与えた研究の一つが、1990年代初頭の日本ロケット協会による「観光丸」プロジェクトであろう<sup>11)</sup>。その報告書（日本ロケット協会（1997））が示すように、観光丸プロジェクトは、Work Breakdown Structure: WBSの枠組みを作成し、詳細な技術情報を検討するだけでなく、それに対応した積み上げ可能なコスト情報も提示している。また、価格の評価時点が不明瞭な環境・経済プロジェクトが多く存在してきた中で、「観光丸」プロジェクトは、価格の評価時点も明示し、さらには、積み上げたコストの値と、Koelleのトランスコストモデルの値、およびRAND社のCost Estimating Relationships: CERの値と、それぞれ比較しており、広範囲にわたり詳細で具体的な検討を行った研究プロジェクトであったことが伺える。

7) それぞれ『宇宙時代』のno.8, no.10, no.11。

8) 例えば、von Braun（1952）、O'Neill（2000, 3rd）。

9) 軌道エレベーターや宇宙エレベーターの機論には立ち入らない。

10) 主に、コリンズ（2013）、スタイン：飛永訳（1997）、Koelle（1999, 2000, 2007）、竹内（1992）、長友（1987, 2001）、無人宇宙実験システム研究開発機構（2003）、Encyclopedia Astronauticaを参照した。

11) 日本の観光丸を紹介する文献は多く、例えば、Nagatomo（1993）、Isozaki et al.（1994）やコスト情報も示した磯崎（1999）、稲谷（2002）、磯崎・稲谷（2004）、および舟津（2000）などがあるが、とくに、日本ロケット協会（1997）『1995/1996年度宇宙旅行用標準機体「観光丸」開発・製造費用報告書』を参照した。

また、「観光丸」プロジェクトは、広く情報を公開していることにも特徴がある。一般的に、技術システムについて、そのコストを推計しようとするとき、また、政府調達等におけるコストの妥当性を吟味しようとするとき、詳細な関連データ・バックデータは公開されていなくても、公開されたCERを利用し、第三者が検討することを可能としていることがある。しかし、米国における宇宙関連活動のCERやそれを組み込んだソフトウェアについては、輸出管理(Export Control)のもと、商務省産業安全保障局が管理する輸出管理規則(Export Administration Regulations: EAR)や国務省国防貿易管理局が管理する国際武器取引規則(International Traffic in Arm Regulations: ITAR)にもとづいて入手・利用する必要がある<sup>12)</sup>。もちろん、「観光丸」プロジェクトは、公的研究機関である宇宙科学研究所(Institute of Space and Astronautical Science; ISAS, 現: JAXA/ISAS)の研究者がコミットしているし、同プロジェクトは、約20年前のプロジェクトでもあり、社会的背景も異なることから、今日の米国民間研究機関の情報公開の程度と同列に議論はできない。しかし、具体的に詳細な研究成果が広く公開されたことで、結果として、宇宙観光プロジェクトの輸送システムを議論する際には、小規模輸送であろうと、大規模輸送であろうと、また、サブオービタルであろうと、低軌道であろうと、「観光丸」が情報基盤の役割を担ってきたことはまちがいないだろう。

その一方、今日、最も実現可能な宇宙観光ビジネスとして注目されているのは、サブオービタルの弾道型の宇宙観光である。とくに、1996年に設立されたXプライズは、民間資本ベースの有人輸送機がサブオービタルを目指す賞金獲得レースとして注目され、民間主体の宇宙開発の気運を刺激した<sup>13)</sup>。そして、2004年にSpaceShipOneが賞金を獲得したことは、記憶に新しい<sup>14)</sup>。

ここで、Eilingsfeld and Schaezlerの論文が執筆された時期を振り返ってみると、Xプライズも未だに賞金のための資金集めが必要だった時期であり、また、1990年代後半より、衛星コンステレーションによる国際通信網の構築を目指したイリジウムの行き詰まりや、ドットコムバブルの崩壊による資金難に直面した時期でもある。他方、レーガン時代に開始されたInternational Space Station: ISSプロジェクトが紆余曲折を経て、1998年にロシアのモジュールから建設が開始され、2000年11月から、宇宙飛行士が滞在を開始した時期でもある。さらに、2001年4月、ソユーズに搭乗したデニス・チトー(Dennis Tito)氏がISSに滞在し、民間人として宇宙旅行を遂げたものの、NASAから、ISSへの旅行計画そのものに対して、安全性等の観点から批判され、ISSの米国区画には立ち入れなかったことも話題となった。そして、スペースXやブルーオリジンが設立されたのもこの時期である。それらを振り返りながら、次章において、彼らの主張点を確認していこう。なお、彼らの論文は、現在から約20年前の文献であり、数値情報等は当時のままの値であることに留意されたい。

### 3. 宇宙観光プロジェクトの資本コストとNPV

Eilingsfeld and Schaezler (2000) は、はじめに、それまでの再利用型の宇宙輸送機の研究開発プロジェクトは、政府が開発支援することを前提として評価されてきたが、宇宙観光プロジェクトについては、政府の宇宙プログラムに組み込まれず、民間セクターが開発すべき案件となったことを確認

12) 経済統計学会(2017年9月、法政大学)において、「産業技術の把握と評価に関連する統計的手法について」と題して報告した際、米国の宇宙活動の関連データについて触れ、民間研究機関が開発したコストモデルの利用について、HPの輸出管理の記載内容について述べた。

13) Xプライズの「民間資本」の具体的なイメージについては、的川(2004a, b)や航空宇宙輸送研究会(2005)を参照されたい。

14) ガスリー: 門協訳(2017)を参照した。また、Xプライズに参加したチームの機体の特徴については、久保園(2004)がまとめている。なお、サブオービタル旅行のための機体は、林(2005)や大貫(2009)などが図を交えてまとめている。

する。

それをふまえて、彼らが議論の対象とするのは、日本の「観光丸」プロジェクトをベースとして開発された複数の民間宇宙観光ビジネスプランのうち、「リファレンスシナリオ」と呼ばれるプランである。それは、大型の低軌道宇宙観光モデルであり、その想定値をつぎのように紹介している。

- ・100%民間資金
- ・投資額：78億ドル
- ・要求収益率：6%
- ・最大乗客数：1年あたり低軌道まで10万人
- ・チケット価格：平均5万ドル

このリファレンスシナリオの妥当性を吟味するにあたり、民間からの資金調達を強く意識することで、プロジェクト評価の枠組みも、コーポレートファイナンスにおける基本的な評価基準である正味現在価値（Net Present Value；NPV）と内部収益率（Internal Rate of Return；IRR）による評価をベースとすることを確認する。ここで、NPVの計算は、つぎのとおりである。

$$NPV = C_0 + \frac{C_1}{1+r} + \frac{C_2}{(1+r)^2} + \dots + \frac{C_t}{(1+r)^t} + \dots + \frac{C_T}{(1+r)^T} \dots (1)$$

ただし、 $C_0$ ：初期投資（マイナスのキャッシュフロー）、 $C_t$ ： $t$ 期のキャッシュフロー、 $r$ ：割引率、 $T$ ：プロジェクト期間

さて、NPVを計算するためには、式（1）の割引率に設定する資本コストの値が必要である。そこで、まずは、式（2）のように、資本資産評価モデル（Capital Asset Pricing Model; CAPM）によって、株主資本コストを計測する。

$$r = r_f + \beta(r_m - r_f) \dots (2)$$

ただし、 $r$ ：資本コスト、 $r_f$ ：安全利率、 $r_m$ ：マーケットポートフォリオの期待収益率、 $\beta$ ：いわゆるベータ、リスク尺度

式(2)の $r_f$ と $r_m$ は、Ibbotsonより、米国財務省証券とS&P500の値として設定される。そして、 $\beta$ の値を具体的に決定するプロセスに入っていくが、そもそも民間ビジネスとしての宇宙観光は存在せず、ヒストリカルデータ等を利用して推計できないことから、宇宙観光プロジェクトの $\beta$ について、類似産業・企業の $\beta$ と比較することで決定する方法を選択する。

その選択方法として、宇宙観光ビジネスにかんするさまざまな特徴（製品、価格、供給量、顧客、購入パターン、およびバリューチェーン上の位置づけ）を整理し、宇宙観光に類似した産業・企業の選定を行う。結果として、「娯楽産業（とくに大型客船の旅行）」、「高級被服・装飾」、および「ブライダルサービス」を選定している。

それらの産業・企業の $\beta$ は、アンレバードな値として、IbbotsonとMultexの情報を参照することで、宇宙観光プロジェクトの $\beta=1.5$ とした後、式（2）のCAPMに戻すことによって、宇宙観光プロジェクトの株主資本コストを17.6%としている。なお、Eilingsfeld and Schaetzler（2002）にも関連するが、宇宙空間への打ち上げ・輸送ビジネスにおいては、負債によって資金調達することが難しいこともあり、ここで設定した株主資本コストを資本コストに設定する。そして、式（1）のNPVを再計算

すると、低軌道宇宙観光プロジェクトの最長期間である 50 年を経過しても、NPV はプラスの値にならないという「驚くべき結果」を指摘する。

ここで、財務レバレッジと資本コストを変動させる感度分析をおこなっているが、それについては次章にて触れることとし、彼らは、Xプライズ型のサブオービタル観光モデルのNPVとIRRへと計測を進めている。その結果は、高い資本コストと低いチケット収入であっても、初期投資額（45 百万ドル）が相対的に低く抑えられていることから、NPV はより短期のプロジェクト期間で正の値を示し、IRR も資本コストの値を超えることが計算される。それらを踏まえた上で、宇宙観光は、大型の低軌道宇宙観光からではなく、まずは、サブオービタルからの宇宙観光が実現可能であろう、と結論づけている。

つぎに、Eilingsfeld and Schaetzler (2002) においては、Xプライズ型のサブオービタル観光プロジェクトをベースにしつつ、プロジェクトの遂行主体がベンチャーやスタートアップであることを意識した議論を展開する。そこでは、ベンチャーキャピタルの資本コストを 40%と言及するとともに、加重平均資本コスト (Weighted Average Cost of Capital: WACC) の枠組みを示し、打ち上げビジネスにおける負債コストの現状に触れ、WACC をベースに資本コストを再計算・再計測することを窺わせる。

しかし、実際の計測・シミュレーションにおいては、Eilingsfeld and Schaetzler (2000) で計測した資本コストを利用することにとどめる一方、旅客収入を再設定し、R&D コストと、最初のキャッシュフローの時点を決める市場化までの時期 (Time to Market; TTM) を変動させ、NPV と IRR の変化 (悪化) する状況をシミュレートする。そして、Xプライズ型のサブオービタル観光プロジェクトの妥当性を再確認するとともに、TTM の長期化がプロジェクトの評価に大きな影響を与える等の結果を整理している。

#### 4. いくつかの論点について

本章は、前章でたどった Eilingsfeld and Schaetzler (2000, 2002) の論点を一般的な観点から確認してみよう。なお、宇宙観光ビジネスは、当時においても、現時点においても、実現していないプロジェクトであることから、過度に批判的に議論することを避けながら進めたい。

彼らの論文が興味深い理由は、第 1 は、資本コストは分析結果を左右するキー変数であるが、彼らは、その値に疑問を投げかけるだけでなく、具体的な再計測作業を行い、その手順も含めて公開していることである。そして、第 2 は、その値を利用して、モデルを再計算し、その帰結が、今日のサブオービタルの宇宙観光モデルと対応していることである。かれらの主張は、評価モデルがリアルオプション等へと展開されていないこともあって、非常にシンプルに纏まっている。

他方、再検討すべき論点もあるようだ。

彼らは、宇宙観光プロジェクトの評価基準を投資の回収期間 (Payback Period) とする論者に対して、コーポレートファイナンスの観点から、NPV と IRR をベースとして議論することを主張する。しかし、資本コストのシミュレーションについて、Eilingsfeld and Schaetzler (2000) を再吟味してみると、負債 $\beta$ と株式 $\beta$ を固定したまま、そして、負債コストだけでなく株主資本コストも固定したまま、財務レバレッジの変更に対して資本コストを直線的に低下させる操作を行っており、MM 理論 (Modigliani-Miller Theory) との関連性について、説明が必要な作業プロセスを含んでいるようだ。

また、彼らの資本コストの計測方法として、類似企業・産業を選定するプロセスが具体的に述べられており、議論のたたき台として、非常に多くの情報を与えてくれる。しかし、結果として計測され

た資本コストは、真の値に近いのだろうか。彼らの論文執筆時においても、宇宙観光プロジェクトの事業主体や投資家によって、内部情報として、資本コストの推計に関連するより詳細な情報がやり取りされていると考えても良いのではなかろうか。つまり、公的プロジェクトが民間プロジェクトとして再設定されることにより、情報の非対称性の存在をより強く意識せざるを得ず、たとえ感度分析されるにせよ、推計結果を外部から評価することに躊躇してしまう。したがって、とりわけ未来型の民間ビジネスにアプローチしていくためには、アンケート調査を利用したコンセンサス法やデルファイ法などを利用することも、情報の信頼度を補完する一つの方法であろうし、情報の入手可能性と結果の公表可能性を考慮しながら、質の高い情報を整理していく作業が必要になろう。

しかし、今日の状況を眺めてみると、スペースXやブルーオリジンのように、「ビリオネア」が上場しないまま巨大なビジネスを展開させる時代でもあり、宇宙観光プロジェクトに限らず、宇宙活動全般を吟味・評価するための情報を入手することに、基本的な制約がある時代なのかもしれない。とはいえ、宇宙関連活動が社会経済に大きな影響を与える存在として成長していくならば、その客観的情報を把握することは、社会的な課題ともなろうし、そのために必要な情報・データを整備していくことは、単に研究者だけの課題ではなく、公的統計として、調査客体が持つ秘匿性の高い情報を取り扱う方法や、企業や事業所が識別可能な状況において、統計として表章する方法について、検討する課題へとつながっていくのではなかろうか。

さて、本章の最後に、Eilingsfeld and Schaetzler (2000, 2002) と今日の宇宙観光プロジェクトとの対応を確認してみよう。

彼らの論文が公開された後、2004年にスケールド・コンポジット (Scaled Composites) 社が開発した SpaceShipOne が X プライズを獲得した。その後、「〇〇年より、宇宙観光スタート」というフレーズは繰り返し掲げられてきたが、宇宙観光ビジネスは、サブオービタル観光であっても、安定的継続的に行われるビジネスとしては成立していない。それは、SpaceShipOne が宇宙空間へ到達した後、より大型の SpaceShipTwo が開発される途中において、エンジンの実験中の事故 (2007年7月26日) や<sup>15)</sup>、試験飛行中の事故 (2014年10月31日) があり、安全性の観点も含めて、研究開発費の高騰と市場化の遅れを引き起こしたからでもある。そして、2018年12月13日、Aviation Week & Space Technology 誌において、SpaceShipTwo が宇宙空間に到達したニュースが伝えられたが、今後のテスト飛行を経て、安定したビジネスとして継続するかどうかは、まだ不透明である。その一方、同記事において、これまでの研究開発投資が13億ドルであることと、残りのテストプログラムに200百万ドル必要であることが掲載されており<sup>16)</sup>、研究開発コストの範囲等は不明ではあるが、その値が事実ならば、Eilingsfeld and Schaetzler (2000, 2002) が想定した50百万ドルから100百万ドルとはケタ違いの資金が投じられてきたことになる<sup>17)</sup>。したがって、現実の宇宙ビジネスの世界は、Eilingsfeld and Schaetzler (2000, 2002) の想定を大きく超え、巨額の研究開発資金を消費し、長期間のリードタイムと TTM に耐えながら、宇宙観光ビジネスとしての最初のキャッシュフローを得ようとしているこ

15) 例えば、浅川 (2014) は、宇宙船の開発予算が暴騰した記事について、その金額も含めて紹介している。

16) 今回の飛行は、地上から100kmのカーマンラインではなく、米国空軍と NASA が宇宙空間の基準と考える地上から80kmを超えたこと、また、ペイロードとして NASA の科学実験装置を搭載しており、NASA Flight Opportunities Program により、SpaceShipTwo を運用するバージン・ギャラクティック社に初めての収入がもたらされたことも記されている (Dec 14, 2018, Guy Norris, "Virgin Galactic's Unity Blazes Trail To Space")。

17) NASA New Start Inflation Index によって、彼らの論文執筆時：2002年の値を2018年にインフレートしても、1.5倍程度である。なお、NASA の Inflation Index については、注12と同様に、経済統計学会 (2017年9月、法政大学) において、「産業技術の把握と評価に関連する統計的手法について」と題して報告した際に、その内容を確認した。

とが伺える。また, Eilingsfeld and Schaetzler (2000, 2002) においては, NPV と IRR をベースとし, R&D コストや TTM の変更をシミュレートしているが, 現実の宇宙観光ビジネスは, 評価モデルの規模についても, シミュレーションの振幅についても, そしてビジネスリスクについても, 想定を遙かに超えてダイナミックに変動しており, 宇宙観光ビジネスをモデル評価するならば, 資本コストの意味内容も含めて, 改めてモデルの再考察と再構築が必要となることも伺える。

## 5. 小括

本稿は, Eilingsfeld and Schaetzler (2000, 2002) を考察の素材として, プロジェクト評価において, モデルの外生変数としての性格をおびていた資本コストの値が再び計測対象となるケースとして, 宇宙観光プロジェクトの評価モデルに着目した。そして, 政府資金と公的サポートを想定した宇宙プロジェクトが民間化・民営化されることに起因するいくつかの論点について, 今日の宇宙観光ビジネスの状況を踏まえて, 吟味・再検討した。

今日では, 民間企業が宇宙ビジネスだけでなく, かつては公的資金や政府資金でしか達成し得なかった大規模な宇宙関連ミッションについて, 具体的に企画・立案し, それが説得力をもつ時代である。それに呼応してか, アメリカ国内の「2015年宇宙法 (Space Act of 2015)」のように, 政府ではなく, 個人や民間企業ならば, 宇宙での開発資源を領有できるかのような法律も成立し, 国連の宇宙条約との整合性が議論される時代を迎えている<sup>18)</sup>。

昨今の米中間の激しい貿易摩擦を目の当たりにすると, 将来, 宇宙空間でのビジネス活動の条件として, 「民間企業でなければならない」という論争すら起きるのではないかと感じさせる。かつて, ツィオルコフスキーがジュール・ヴェルヌの著作を真面目に熱心に読み込んだように, 例えば, ロバート・ハインライン『月を売った男』を真面目に熱心に読み込んだ起業家もいるだろう。宇宙活動を先導するアメリカの状況を踏まえるならば, わが国において, 公的に宇宙産業・先端産業を支援・育成する際, 将来の宇宙ビジネスマーケットの参加条件と, それに対応した支援先との「距離感」も思考実験しておく必要があるのかもしれない, と感じつつ, 本稿を閉じる。

## 参考文献

- Ehrlicke, Kraft A. (1968), "Space Tourism", *Advances in the Astronautical Sciences Series*, vol.23, pp.259-291.  
 Eilingsfeld, Fabian and D.Schaetzler (2000), "The Cost of Capital for Space Tourism Ventures", Presented at 51st International Astronautical Congress, Rio de Janeiro, Brazil.  
 Eilingsfeld, Fabian and D.Schaetzler (2002), "Developing Viable Financing Models for Space Tourism", 53rd International Astronautical Congress, The World Space Congress, Houston, Texas.  
 Encyclopedia Astronautica, <http://www.astronautix.com/> .  
 Hilton, Barron (1967), "Hotels in Space", AAS Conference Proceedings.  
[http://www.spacefuture.com/archive/hotels\\_in\\_space.shtml](http://www.spacefuture.com/archive/hotels_in_space.shtml) .  
 Isozaki, Kohki, AkiraTaniuchi, KoichiYonemoto, HiroshigeKikukawa, Tomoko Maruyama, TatsuroAsai and Koichi Murakami (1994), "Vehicle Design for Space Tourism", *The Journal of Space Technology and Science*, vol.10 no.2, pp.22-34.  
 Koelle, Dietrich E (1999), "A Cost-Engineerd Launch Vehicle for Space Tourism", *Acta Astronautica*, vol.44 nos.7-12, pp.649-656.  
 Koelle, Dietrich E (2000), "The Ballistic SSTO-The Lowest Cost Reusable Launch Vehicle", 51<sup>st</sup> IAF, 2-6 Oct 2000,

18) 例えば, 袴田 (2016), 石田 (2017), 大貫 (2018), 小塚・佐藤 (2018)。

- Rio de Janeiro.
- Koelle, Dietrich E (2007), *Handbook of Cost Engineering for Space Transportation Systems with TRANSCOST 7.2*, TCS-TransCostSystems.
- Matsumoto, Shinji, Yoshihiko Amino, Tohru Mitsuhashi, Kenji Takagi and Hideki Kanayama (1989), “Feasibility of Space Tourism ‘Cost Study for Space Tour’”, Proceedings of 40th IAF Congress.
- Nagatomo, Makoto (1993), “Space Tourism: Spaceflight for the General Public”, *The Journal of Space Technology and Science*, vol.9 no.1, pp.24-28.
- OECD (2009) *Measuring Capital OECD manual. Second edition*.
- Office of Management and Budget; OMB, “Guidelines and Discount Rates for Benefit-Cost Analysis of Federal Programs (Circular A-94)”.
- O’Neill, Gerard K. (2000), *The High Frontier*, 3<sup>rd</sup> edition, Collector’s Guide Publishing.
- von Braun, Wernher (1952), “Crossing the Last Frontier”, *Collier’s*, March 22, pp.24-29.
- 浅川恵司 (2014) 『集合, 成田。行き先, 宇宙。』双葉社。
- 安全保障貿易情報センター 『輸出管理ガイダンス 海外輸出管理法制度 米国版 第12版』。
- 石田真康 (2017) 『宇宙ビジネス入門』日経BP。
- 磯崎弘毅 (1999) 「宇宙船 観光丸」『宇宙と天文』no.2, pp.108-112。
- 磯崎弘毅・稲谷芳文 (2004) 「宇宙旅客機の研究」『機械の研究』vol.56 no.1, pp.176-183。
- 稲谷芳文 (2002) 「宇宙輸送のゴール」『機械の研究』vol.54 no.3, pp.325-334。
- OECD: 柴藤羊二監訳・柴藤良子訳 (2006) 『スペース 2030 宇宙利用の未来探査』技術経済研究所 (OECD (2004), *Space 2030-Exploring the Future of Space Applications*)。
- OECD: 柴藤羊二監訳・柴藤良子訳 (2008) 『続スペース 2030 宇宙利用の未来探査』技術経済研究所 (OECD (2005), *Space 2030-Tackling Society’s Challenges*)。
- OECD: 山本哲三訳 (2011) 『OECD 規制影響分析-政策評価のためのツール』明石出版 (OECD (2009), *Regulatory Impact Analysis: A Tool for Policy Coherence*)。
- 大谷悟・佐渡周子・今野水己・土谷和之・牧浩太郎 (2013) 「主要先進国等の公共事業評価に適用される社会的割引率」『土木計画学研究・論文集』vol.69 no.5, pp. I\_163-I\_171。
- 大貫美鈴 (2009) 『来週, 宇宙に行ってきます』春日出版。
- 大貫美鈴 (2018) 『宇宙ビジネスの衝撃』ダイヤモンド社。
- 小野純子 (2017) 『米国輸出管理法と再輸出規制実務』安全保障貿易センター。
- ガスリー, ジュリアン: 門脇弘典 (2017 訳) 『X プライズ宇宙に挑む男たち』日経BP (Guthrie, Julian (2016), *How to Make a Spaceship*, Penguin Random House, UK)。
- 久保園晃 (2004) 「ついに決定 X プライズ獲得競争」『航空ファン』vol.53 no.12, pp.72-78。
- 黒田泰弘・清水建設宇宙開発室 (1991) 『宇宙建築』彰国社。
- 荒浜一昼 (1979a) 「宇宙観光シリーズ1: ヒルトンの宇宙への夢」『宇宙時代』no.8, pp.38-48。
- 荒浜一昼 (1979b) 「宇宙観光シリーズ2: エリケの衛星軌道旅行施設」『宇宙時代』no.9, pp.4-16。
- 荒浜一昼 (1979c) 「宇宙観光シリーズ3: 火星高速鉄道の走る日」『宇宙時代』no.10, pp.2-15。
- 荒浜一昼 (1980) 「宇宙観光シリーズ4: 金星の遊覧旅行」『宇宙時代』no.11, pp.2-16。
- 小塚莊一郎・佐藤雅彦編著 (2018) 『宇宙ビジネスのための宇宙法入門, 第2版』有斐閣。
- 航空宇宙輸送研究会 (2005) 「報告 (第13回), パネルディスカッション (上, 下)」『航空と文化』no.91, 夏季号, pp.24-29, pp.32-35。
- コリンズ, パトリック (2013) 『宇宙旅行学』東海大学出版会。
- 清水建設宇宙開発室 (1999) 『月へ, ふたたび』オーム社。
- 鈴木一功 (2018) 『企業価値評価』ダイヤモンド社。
- スタイン, ハリー: 飛永三器訳 (1997) 『宇宙観光がビジネスになる日』三田出版会 (Stine, G. Harry (1996), *Halfway to Anywhere*, M. Evans and Company, New York)。
- 高野忠・コリンズ, パトリック・日本宇宙旅行協会 (2018) 『宇宙旅行入門』東京大学出版会。
- 竹内均編 (1992) 『Newton ニュートン別冊 宇宙開発』教育社。
- 手嶋宣之 (2011) 『ファイナンス入門』ダイヤモンド社。
- ドルシー, ゲーリー: 高遠裕子訳 (2001) 『衛星ビジネス・ウォーズ』日経BP (Dorsey, Gary (1999), *Silicon Sky*, Perseus Books Publishing.)。

- 長友信人 (1986) 『1992年宇宙観光旅行』読売科学選書5。
- 長友信人 (1987) 『宇宙飛行機』丸善。
- 長友信人 (2001) 「ロケット開発の新しい道標 (1) (D. E. Koelle (2000) の抄訳を含む)」 *Rocket news*, 426.2。
- 日本機械輸出組合 (2017) 『米国輸出管理法の再輸出規制』。
- 日本ロケット協会 (1997) 『1995/1996年度宇宙旅行用標準機体「観光丸」開発・製造費用報告書』。
- バーク, ジョナサン・ディマーズ, ピーター: 久保田敬一・芹田敏夫・竹原均・徳永俊史訳 (2014) 『コーポレートファイナンス, 第2版』, 入門編・応用編, 丸善出版 (Berk, Jonathan and DeMarzo, Peter (2011), *Corporate Finance*, 2<sup>nd</sup> edition, Pearson Education)。
- 袴田武史 (2016) 『HAKUTO 月面を走れ』祥伝社。
- 林公代 (2005) 『宇宙の歩き方』ランダムハウス講談社。
- バンス, アシュリー: 斎藤栄一郎訳 (2015) 『イーロンマスク未来を創る男』講談社 (Vance, Ashlee (2015), *Elon Musk*, Penguin Random House, UK)。
- 舟津良行 (2000) 「21世紀の宇宙旅行のかたち」『航空と文化』no.69, pp.2-6。
- ブリーリー, リチャード・マイヤーズ, スチュワート・アレン, フランクリン: 藤井眞理・國枝繁樹監訳『コーポレートファイナンス, 第10版』, 上・下, 日経BP (Brealey, Richard A., Myers, Stewart C. and Allen, Franklin (2011), *Principles of Corporate Finance*, 10<sup>th</sup> edition, McGraw-Hill)。
- 松本信二・清水建設宇宙開発室 (2002) 『宇宙に暮す』裳華房。
- 的川泰宣 (2004a) 「民間宇宙船で初の有人飛行」『世界週報』vol.85 no.27 (2004.7.20), pp.62-63。
- 的川泰宣 (2004b) 「スペースシップワンの快挙」『世界週報』vol.85 no.41 (2004.11.2), pp.64-65。
- 的川泰宣 (2005) 「宇宙旅行の新たな地平」『世界週報』vol.86 no.2 (2005.1.18), pp.10-13。
- 的川泰宣 (2010) 『月をめざした二人の科学者, 第3版』中公新書。
- 的川泰宣 (2017) 『宇宙飛行の父ツィオルコフスキー』勉誠出版。
- 水野紀男 (2006) 『宇宙観光旅行時代の到来』文芸社。
- 無人宇宙実験システム研究開発機構 (2003) 『宇宙太陽発電システム実用化技術調査研究・宇宙太陽発電システム (SSPS) 実用化技術検討委員会』。
- 森直哉 (2016) 『図解コーポレートファイナンス [新訂版]』創成社。
- 山本哲三編著 (2009) 『規制影響分析 (RIA) 入門—制度・理論・ケーススタディ』NTT出版。