

《研究ノート》

宇宙への輸送コストモデルのフレーム構築実験 ——使い捨て型輸送機と再利用型輸送機による低軌道輸送——

朝 倉 啓一郎

Construction of Cost Model for Space Transportation:
Expendable Launch Vehicle and Reusable Launch Vehicle
KEIICHIRO ASAKURA

キーワード

宇宙輸送 (Space Transportation), 使い捨て型輸送機 (Expendable Launch Vehicle: ELV), 再利用型輸送機 (Reusable Launch Vehicle: RLV), 学習効果 (Learning Effect)

1. はじめに

1957年10月、人類初の人工衛星：スプートニク1号がR-7ロケットによって打ち上げられて以降、観測、通信、測位、そして軍事・安全保障を目的とする人工衛星が多数打ち上げられてきた。そして、宇宙活動のプラットホームとしての宇宙ステーションは、1971年4月に打ち上げられたサリュートに始まり、今日では、420トンの構造物である国際宇宙ステーション：ISS (International Space Station) が活動を続けている。もちろん、ISSの建設は、一度の打ち上げで完成するのではなく、モジュール、宇宙飛行士、およびさまざまな必要物資を運搬するために、使い捨て型輸送機だけでなく、再利用型輸送機であるスペースシャトルが活躍したことも、記憶に新しい。そして、将来・未来の宇宙利用に目を向けると、宇宙太陽発電衛星：SPS (Solar Power Satellite) のように、ISSをはるかに超える「万吨」クラスの巨大な構造物の建設も、研究と議論の対象となっている。

そういった宇宙プロジェクト・ミッションについて、コストに焦点をあてた評価モデルを構築しようとするならば、宇宙空間への輸送コストの情報が不可欠であり、そのために、過去、現在、そして、未来の輸送システムについて、「低軌道まで〇〇円」や「静止軌道まで△△円」という情報を収集することになる。しかし、宇宙プロジェクト・ミッションが長期にわたり、多数回の打ち上げが必要な場合、「低軌道まで〇〇円」や「静止軌道まで△△円」という輸送コストについて、どのような具体的なイメージを持てばよいのだろうか。

本稿では、長期にわたる宇宙プロジェクト・ミッションにおいて、宇宙への輸送コストの基本構成の枠組みと伝統的な学習効果モデルを接合し、今日的なプロジェクト評価の方法を意識しながら、使い捨て型輸送機および再利用型輸送機を利用した低軌道輸送について、シンプルなコスト計算モデルを具体的に考案する。

2. 宇宙への輸送コストモデルの基本フレーム

本章では、宇宙への輸送コストモデルの構築に関連する基本的な論点を述べる。

宇宙への輸送を含むプロジェクト・ミッションに関連するコストモデルは、Apgar (2011), Mandell (1992), および NASA (2015) などが示すように、推定される経験的な関係式：CER (Cost Estimating Relationships) を方程式体系として内包したモデルが多く存在する。また、代表的な輸送コストモデルである Koelle の TRANSCOST¹⁾ を利用して、輸送系を具体的に設定し、エンジン部分、ロケット本体、フェアリング部分、ある特定のオペレーション、・・・というように、項目ごとに詳細にコスト推計することも試みられている。

しかし、どのようなモデルにたいしても、第三者が方程式体系を閲覧し、その妥当性を検証し、CER を相互に比較し、あるいは、各自の目的のために利用し、吟味することができる、というわけではない。そして、Collins (2011) は、輸送コストのみに焦点をあてた比較研究ではないが、同一の宇宙プロジェクト・ミッションでも、評価モデルごとに、そのコストの計算結果が異なることという興味深い検証を行っている。

したがって、本稿では、初発的なモデル構築実験として、詳細な積み上げデータおよび方程式体系にもとづくモデルを構築するのではなく、シンプルなコスト構成の枠組みを堅持して、議論を進めることとする。

また、Wertz (2000) や Koelle の TRANSCOST を参照して、「打ち上げコスト」の内容を探ると、機体コストや酸化剤・燃料だけでなく、保険料や間接経費・一般管理費を含めた値として、1 回あたりの打ち上げコスト：CpL (Cost per Launch) が整理されている。それは、朝倉・中野 (2013) による SPS の発電単価の計測においても、また、今日の発電単価の比較検討においても、堅持される枠組みである。

したがって、本稿では、CpL の範囲として、打ち上げに関連する間接経費・一般管理費も含めてモデル計算する枠組みを作成することとする。

そして、CpL の主要な構成項目と考えられる輸送機の製造コストについては、いわゆる学習効果が作動することを前提とするモデル計算が多用されており、生産台数の増加とともに、平均費用が低減するモデル計算が一般的である。そういった学習効果モデルの特徴をいかし、いろいろな宇宙プロジェクトにおいて、輸送コストが想定されるならば、その値をプロジェクト期間での平均的な輸送コストとして解釈し、学習効果を内挿した宇宙輸送のコストモデルの平均費用と対応させることができよう。また、初期値として、最初の 1 機：TFU (Theoretically first Unit) からモデルの「解」として平均輸送コストを計算するだけでなく、平均輸送コストを与えた後に、初期値として、最初の 1 機：TFU を「逆算」し、その値を吟味することも重要であろう。

したがって、本稿では、輸送コストの枠組みを堅持しつつ、機体製造コストやその他の経常的・反復的な活動コストに伝統的な学習効果モデルを挿入し、そして、外生変数と内生変数を入れ替えながらモデル操作できるように、基本データやパラメータの設定可能性を考慮しながらモデルを構成することとする。

しかし、その一方、OECD の規制影響分析やアメリカ行政管理予算局の費用－便益分析の指針を意

1) Koelle の TRANSCOST には多くのバージョンがあり、改訂され続けているが、本稿では、Koelle (1984,2000,2007,2013) を参照した。

識するならば²⁾、学習効果モデルから計測される値を、単純に平均輸送コストと解釈することも不十分であろう。プロジェクト・ミッションが多期間にわたるならば、物価の変動や割引率・利率を考慮し、シミュレーションにおいて、それらを操作可能な形で評価モデルを作成せねばなるまい。

したがって、本稿では、ファーストアプローチとして、利潤と減価償却費の取り扱いと、割引率・利率そのものの決定方法を考察の外におくが、キャッシュフローベースの年価法を援用し、CpLの計測のために必要な計算式を具体的に明示しながら輸送コストモデルを構築することとする。

それでは、つぎに、使い捨て型輸送機と再利用型輸送機を利用した打ち上げコストの基本構成を具体的に確認していく。なお、今後、「打ち上げコスト」や「輸送コスト」は、全て1回の打ち上げコスト CpL (Cost per Launch) を意味する用語とする。

3. 使い捨て型輸送機の輸送コストモデル

3. 1 使い捨て型輸送機の機体コスト

学習効果モデルは、Badiru (1992,2011) が示すように、いくつかのバリエーションがあるが、航空機や宇宙輸送機の製造プロセスに使用されるモデルは、Wright (1936) によって提示され、その後、Werts et al. (2011) や Koelle の TRANSCOST モデルなどで広く利用される平均コスト低減モデルである。それは、学習効果を $S\%$ とすると、生産台数が倍になるごとに $S\%$ ずつ平均単価が低下していくモデルである。

そのプロセスに対応させてコストモデルを構成するために、はじめに、打ち上げにかんする基本想定として、1年あたり $N_{E,Y}$ 回打ち上げるプロジェクトを Y_E 年間続けることを確認しておく。とくに、使い捨て型輸送機においては、打ち上げ回数と輸送機の製造台数が一致していることも確認しておく。

また、機体等のコストは、割引率を設定して現在価値に集計するが、説明のために、等間隔で製造されて打ち上げられていくという想定をおくこととする³⁾。

そして、学習効果を前提として計測される輸送機1機あたりのコストは、実質値として表現していることから、今後、モデルシミュレーションとして、物価上昇率を操作する場合、輸送機コストの値の操作に注意することが必要である。なお、実質値で直接集計することに違和感がある場合は、個別物価 = 1 として集計するという思考操作で対応することとする。

3. 1. 1 平均機体コスト

使い捨て型輸送機を n 機製造する時の平均単価 $AVGC_n^{vehicle,E}$ をつぎのように設定しよう。

$$AVGC_n^{vehicle,E} = C_1^{vehicle,E} \cdot n^a \quad \dots (3.1.1.1)$$

ただし、 $AVGC_n^{vehicle,E}$: 使い捨て輸送機を n 台製造したときの平均単価、

$C_1^{vehicle,E}$: 最初の1機(TFU)のコスト、 a : 学習効果パラメータ、

n : 使い捨て輸送機の製造台数 ($n = 1, \dots, N_{E,Y} \times Y_E$)、

$N_{E,Y}$: 1年当たりの打ち上げ回数、 Y_E : プロジェクト期間

そして、平均コスト低減モデルの基本想定は、式 (3.1.1.1) の右辺について、次のような等式が成立

2) 例えば、山本 (2009, 2011) と Office of Management and Budget (1992) などを参照せよ。

3) 一定期間内の打ち上げ回数 (打ち上げ密度) が上昇すると、1回あたりの打ち上げコストは上昇すると思われるが、本稿ではその点に立ち入らない。

することを意味している。

$$C_1^{vehicle,E} \cdot (2n)^a = \left(\frac{S}{100}\right) \cdot C_1^{vehicle,E} \cdot n^a \quad \dots (3.1.1.2)$$

ただし、 S : 学習効果 (%)

ここで、式 (3.1.1.2) を学習効果パラメータ： a について解くと、

$$a = \frac{\log\left(\frac{S}{100}\right)}{\log 2} \quad \dots (3.1.1.3)$$

となる。

また、 n 番目までの累積製造コスト $AUMC_n^{vehicle,E}$ は、つぎのように計測できる。

$$\begin{aligned} AUMC_n^{vehicle,E} &= n \cdot AVGC_n^{vehicle,E} \quad \dots (3.1.1.4) \\ &= n \cdot C_1^{vehicle,E} \cdot n^a \\ &= C_1^{vehicle,E} \cdot n^{a+1} \quad \dots (3.1.1.5) \end{aligned}$$

ただし、 $AUMC_n^{vehicle,E}$: n 機製造時の累積コスト

ここで、 n 番目のみの機体コスト $C_n^{vehicle,E}$ を計測すると、

$$C_n^{vehicle,E} = C_1^{vehicle,E} \cdot \{n^{a+1} - (n-1)^{a+1}\} \quad \dots (3.1.1.6)$$

ただし、 n 番目の機体コスト： $C_n^{vehicle,E}$

となる。また、 n 番目のみの機体コスト $C_n^{vehicle,E}$ は、 n 番目までの累積製造コスト： $AUMC_n^{vehicle,E}$ を微分した限界費用として、

$$\begin{aligned} C_n^{vehicle,E} &\approx \frac{d(AUMC_n^{vehicle,E})}{dn} \quad \dots (3.1.1.7) \\ &\approx (a+1)C_1^{vehicle,E} \cdot n^a \\ &\approx (a+1)AVGC_n^{vehicle,E} \quad \dots (3.1.1.8) \end{aligned}$$

と、近似可能なことを確認しておく。なお、累積製造コスト $AUMC_n^{vehicle,E}$ と n 番目の機体コスト： $C_n^{vehicle,E}$ は、割引率を考慮した現在価値ではないことを確認しておく。

3. 1. 2 割引率・利子率

ここで、複数年にわたるプロジェクトにおいて、異時点間の価格調整を行うために、実質割引率・利子率を導入する。

$$r = \frac{1+i}{1+\pi} - 1 \quad \dots (3.1.2.1)$$

ただし、 r : 実質割引率・利子率、 i : 名目利子率、 π : 物価上昇率

3. 1. 3 機体の割引現在価値

つぎに、1 年間に $N_{E,Y}$ 回打ち上げ、それを Y_E 年続けるケースに対応させ、第 1 番目の機体コストの割引現在価値： $C_1^{vehicle,PV,E}$ 、第 2 番目の機体コストの割引現在価値： $C_2^{vehicle,PV,E} \dots$ を計算し、集計することで、トータルの割引現在価値： $TC^{vehicle,PV,E}$ を計測してみる。ここでは、連続時間での割引率・

利子率への展開を意識しながら、打ち上げのタイミングで割引かれると想定すると、

$$C_1^{vehicle,PV,E} = \frac{C_1^{vehicle,E}}{\left(1 + \frac{r}{N_{E,Y}}\right)^{N_{E,Y} \cdot \frac{1}{N_{E,Y}}}} \dots (3.1.3.1)$$

$$C_2^{vehicle,PV,E} = \frac{C_2^{vehicle,E}}{\left(1 + \frac{r}{N_{E,Y}}\right)^{N_{E,Y} \cdot \frac{2}{N_{E,Y}}}} \dots (3.1.3.2)$$

⋮

となることから、

$$\begin{aligned} TC^{vehicle,PV,E} &= \frac{C_1^{vehicle,E}}{\left(1 + \frac{r}{N_{E,Y}}\right)^{N_{E,Y} \cdot \frac{1}{N_{E,Y}}}} + \frac{C_2^{vehicle,E}}{\left(1 + \frac{r}{N_{E,Y}}\right)^{N_{E,Y} \cdot \frac{2}{N_{E,Y}}}} + \dots + \frac{C_n^{vehicle,E}}{\left(1 + \frac{r}{N_{E,Y}}\right)^{N_{E,Y} \cdot \frac{N_{E,Y} \cdot Y_E}{N_{E,Y}}}} \\ &= \sum_{n=1}^{N_{E,Y} \cdot Y_E} \frac{C_n^{vehicle,E}}{\left(1 + \frac{r}{N_{E,Y}}\right)^{N_{E,Y} \cdot \frac{n}{N_{E,Y}}}} \dots (3.1.3.3) \end{aligned}$$

ただし、 $TC^{vehicle,PV,E}$ ：機体コスト全体の割引現在価値

となる。

また、連続時間の割引率で表現すると、機体コスト全体の割引現在価値： $TC^{vehicle,PV,E}$ は、

$$TC^{vehicle,PV,E} \approx \int_0^{N_{E,Y} \cdot Y_E} \frac{C_n^{vehicle,E}}{e^{\frac{r \cdot n}{N_{E,Y}}}} dn \dots (3.1.3.4)$$

を計算すればよい。その場合、 $C_n^{vehicle,PV,E}$ は、単位時間あたりのコストとして表現せねばならないが、ここでは積分にこだわらず、離散型のままとし、つぎのように計算しておく⁴⁾。

$$TC^{vehicle,PV,E} \approx \sum_{n=1}^{N_{E,Y} \cdot Y_E} \frac{C_n^{vehicle,E}}{e^{\frac{r \cdot n}{N_{E,Y}}}} \dots (3.1.3.5)$$

3. 1. 4 打ち上げ1回あたり機体コスト

そして、機体コスト全体の割引現在価値： $TC^{vehicle,PV,E}$ に打ち上げ1回あたりの資本回収係数をかけることで、打ち上げ1回あたりの機体コスト： $CpL^{vehicle,E}$ を計算する。そのためには、打ち上げ1回あたりの資本回収係数を計算せねばならない。ここでは、千住・伏見(1982)の説明用の記号である現価：P、終価：S、および年価：Mを本稿の説明記号として援用し、本稿の割引率・利子率にもとづいて、同書の年価：Mの計算プロセスをたどる。そうすると、終価：Sと現価：Pは、

$$\text{終価：} S = M \times \frac{\left(1 + \frac{r}{N_{E,Y}}\right)^{N_{E,Y} \cdot Y_E} - 1}{\frac{r}{N_{E,Y}}} \dots (3.1.4.1)$$

$$\text{現価：} P = S \times \frac{1}{\left(1 + \frac{r}{N_{E,Y}}\right)^{N_{E,Y} \cdot Y_E}} \dots (3.1.4.2)$$

4) 打ち上げコストの初期値を $C_0^{vehicle,E}$ とし、打ち上げコストが $C_0^{vehicle,E} e^{-st}$ ような減少関数であるとする、

$$\begin{aligned} C_n^{vehicle,E} &= C_0^{vehicle,E} \cdot \int_0^{Y_E} \frac{e^{-st}}{e^{rt}} dt \\ &= \frac{C_0^{vehicle,E}}{r+s} \{1 - e^{-(r+s)Y_E}\} \end{aligned}$$

となるだろうが、ここでは立ち入らない(例えば、新開・渡部訳(1968)を参照)。

となることから、両式から、年価：M を計算すると、

$$\text{年価：} M = P \times \frac{\frac{r}{N_{E,Y}}}{1 - \left(1 + \frac{r}{N_{E,Y}}\right)^{-N_{E,Y} \cdot Y_E}} \cdots (3.1.4.3)$$

となる。よって、打ち上げ 1 回あたりの資本回収係数は $\frac{\frac{r}{N_{E,Y}}}{1 - \left(1 + \frac{r}{N_{E,Y}}\right)^{-N_{E,Y} \cdot Y_E}}$ であり、本稿の変数に説明用の M と P を対応させると、打ち上げ 1 回あたりの機体コスト： $CpL^{vehicle,E}$ は、つぎのように表現できる。

$$CpL^{vehicle,E} = TC^{vehicle,PV,E} \cdot \frac{\frac{r}{N_{E,Y}}}{1 - \left(1 + \frac{r}{N_{E,Y}}\right)^{-N_{E,Y} \cdot Y_E}} \cdots (3.1.4.4)$$

ただし、 $CpL^{vehicle,E}$ ：打ち上げ 1 回あたりの機体コスト

また、

$$\int_0^{N_{E,Y} \cdot Y_E} e^{-r \frac{n}{N_{E,Y}}} dn = \frac{(1 - e^{-r \cdot Y_E}) \cdot N_{E,Y}}{r} \cdots (3.1.4.5)$$

より、打ち上げ 1 回あたりの資本回収係数として、その逆数をもちいると、

$$CpL^{vehicle,E} \approx TC^{vehicle,PV,E} \cdot \frac{r}{(1 - e^{-r \cdot Y_E}) \cdot N_{E,Y}} \cdots (3.1.4.6)$$

となる。

3. 2 直接オペレーションコスト

直接オペレーションコストは、燃料や酸化剤だけでなく、発射台への輸送機の備え付けコストや検査コスト、そして、打ち上げ後のミッションを管理するコスト等を含んでいる。ここでも打ち上げ回数ごとに学習効果が作動するコストとしてモデル化しておく。なお、式 (3.2.1) 以降の基本算式の考え方は、3.1 節の使い捨て型輸送機の機体コストと同様である。

$$C_n^{direct,op,E} = C_1^{direct,op,E} \cdot \{n^{b+1} - (n-1)^{b+1}\} \cdots (3.2.1)$$

$$\approx (b+1)AVGC_l^{direct,op,E} \cdots (3.2.2)$$

$$TC^{direct,op,PV,E} = \sum_{n=1}^{N_{E,Y} \cdot Y_E} \frac{C_n^{direct,op,E}}{\left(1 + \frac{r}{N_{E,Y}}\right)^{N_{E,Y} \cdot \frac{n}{N_{E,Y}}}} \cdots (3.2.3)$$

$$\approx \sum_{n=1}^{N_{E,Y} \cdot Y_E} \frac{C_n^{direct,op,E}}{e^{r \frac{n}{N_{E,Y}}}} \cdots (3.2.4)$$

$$CpL^{direct,op,E} = TC^{direct,op,PV,E} \cdot \frac{\frac{r}{N_{E,Y}}}{1 - \left(1 + \frac{r}{N_{E,Y}}\right)^{-N_{E,Y} \cdot Y_E}} \cdots (3.2.5)$$

$$\approx TC^{direct,op,PV,E} \cdot \frac{r}{(1 - e^{-r \cdot Y_E}) \cdot N_{E,Y}} \cdots (3.2.6)$$

ただし、 b : 学習効果パラメータ、

$C_1^{direct,op,E}$: 最初の打ち上げの直接オペレーションコスト、

$C_n^{direct,op,E}$: n 回目の打ち上げの直接オペレーションコスト、

$AVGC_l^{direct,op,E}$: n 回目までの打ち上げの平均直接オペレーションコスト、

$TC^{direct,op,PV,E}$: n 回目までの打ち上げの直接オペレーションコスト（現在価値）、
 $CpL^{direct,op,E}$: 打ち上げ1回あたりの直接オペレーションコスト

3. 3 打ち上げ保険

Wertz (2000) と JAXA (2009) を参考にして、保険料は、保険金を機体コストとして、その一定割合： α_1 を保険料とする。したがって、第 n 回目の打ち上げにかんする保険料： $C_n^{insurance,E}$ を、式 (3.3.1) のように設定する⁵⁾。なお、式 (3.3.2) 以降の基本算式の考え方は、3.1 節の使い捨て型輸送機の機体コストと同様である。

$$C_n^{insurance,E} = \alpha_1 C_n^{vehicle,E} \dots (3.3.1)$$

$$TC^{insurance,PV,E} = \sum_{n=1}^{N_{E,Y} \cdot Y_E} \frac{C_n^{insurance,E}}{\left(1 + \frac{r}{N_{E,Y}}\right)^{N_{E,Y} \cdot \frac{n}{N_{E,Y}}}} \dots (3.3.2)$$

$$\approx \sum_{n=1}^{N_{E,Y} \cdot Y_E} \frac{C_n^{insurance,E}}{e^{\frac{r \cdot n}{N_{E,Y}}}} \dots (3.3.3)$$

$$CpL^{insurance,E} = TC^{insurance,PV,E} \cdot \frac{\frac{r}{N_{E,Y}}}{1 - \left(1 + \frac{r}{N_{E,Y}}\right)^{-N_{E,Y} \cdot Y_E}} \dots (3.3.4)$$

$$\approx TC^{insurance,E} \cdot \frac{r}{(1 - e^{-r \cdot Y_E}) \cdot N_{E,Y}} \dots (3.3.5)$$

ただし、 α_1 : 保険料（率）、 $C_n^{insurance,E}$: n 回目の打ち上げの保険料、
 $TC^{insurance,PV,E}$: n 回目までの打ち上げの保険料（現在価値）、
 $CpL^{insurance,E}$: 打ち上げ1回あたりの保険料

3. 4 間接経費

第 n 回目の打ち上げにかんする間接的な経費 $C_n^{indirect,op,E}$ は、一般管理費としての取り扱いを想定して、式 (3.4.1) のように設定してみよう。なお、式 (3.4.2) 以降の基本算式の考え方は、3.1 節の輸送機の機体コストと同様である。

$$C_n^{indirect,op,E} = \alpha_2 (C_n^{vehicle,E} + C_n^{direct,op,E} + C_n^{insurance,E}) \dots (3.4.1)$$

$$TC^{indirect,op,PV,E} = \sum_{n=1}^{N_{E,Y} \cdot Y_E} \frac{C_n^{indirect,op,E}}{\left(1 + \frac{r}{N_{E,Y}}\right)^{N_{E,Y} \cdot \frac{n}{N_{E,Y}}}} \dots (3.4.2)$$

$$\approx \sum_{n=1}^{N_{E,Y} \cdot Y_E} \frac{C_n^{indirect,op,E}}{e^{\frac{r \cdot n}{N_{E,Y}}}} \dots (3.4.3)$$

$$CpL^{indirect,op,E} = TC^{indirect,op,PV,E} \cdot \frac{\frac{r}{N_{E,Y}}}{1 - \left(1 + \frac{r}{N_{E,Y}}\right)^{-N_{E,Y} \cdot Y_E}} \dots (3.4.4)$$

$$\approx TC^{indirect,op,PV,E} \cdot \frac{r}{(1 - e^{-r \cdot Y_E}) \cdot N_{E,Y}} \dots (3.4.5)$$

ただし、 α_2 : 間接経費比率、 $C_n^{indirect,op,E}$: n 回目の打ち上げの間接経費、
 $TC^{indirect,op,PV,E}$: n 回目までの打ち上げの間接経費（現在価値）、
 $CpL^{indirect,op,E}$: 打ち上げ1回あたりの間接経費

5) 保険料については、宇宙活動に関する啓発書（例えば、的川（2011））においても紹介されており、衛星の打ち上げ前から軌道上での活動に至るまで、そして、第三者賠償責任も含めて、保険料が関係してくることが述べられている。また、保険料が高騰したときの苦労話は、寺門（2014）にも述べられている。

3. 5 研究開発費

輸送機の研究開発費を輸送コストに含めるか否かは議論があるが、ここでは、実際の打ち上げが開始される以前に R&D 支出総額： $TC^{R\&D,E}$ が確定していることとし、その総額と打ち上げ 1 回あたりの資本回収係数より、打ち上げ 1 回あたりの R&D コスト： $CpL^{R\&D,E}$ をつぎのように計測する。なお、これまでの説明にもちいた割引率・利子率： r と機体開発に関連する事前の研究開発投資にかんする利子率を区分するか否かは、具体的な実証研究時の考察事項とする。

$$CpL^{R\&D,E} = TC^{R\&D,E} \cdot \frac{\frac{r}{N_{E,Y}}}{1 - \left(1 + \frac{r}{N_{E,Y}}\right)^{-N_{E,Y}Y_E}} \cdot \dots \quad (3.5.1)$$

$$\approx TC^{R\&D,E} \cdot \frac{r}{(1 - e^{-rY_E}) \cdot N_{E,Y}} \cdot \dots \quad (3.5.2)$$

ただし、 $TC^{R\&D,E}$ ：R&D 支出総額、 $CpL^{R\&D,E}$ ：打ち上げ 1 回あたりの R&D コスト

3. 6 使い捨て型輸送機を利用した場合の CpL のバランス式

最後に、打ち上げ 1 回あたりのトータルコスト： CpF^E は、R&D 投資を含める場合と含めない場合に区分して示すと、つぎの通りである。

$$CpL^E = CpL^{vehicle,E} + CpL^{direct,op,E} + CpL^{insurance,E} + CpL^{indirect,op,E} \cdot \dots \quad (3.6.1)$$

$$CpL^{E'} = CpF^E + CpL^{R\&D,E} \cdot \dots \quad (3.6.2)$$

ただし、 CpL^E ：打ち上げ 1 回あたりのコスト（R&D を含まない）

$CpL^{E'}$ ：打ち上げ 1 回あたりのコスト（R&D を含む）

4 再利用型輸送機の輸送コストモデル

4. 1 再利用型輸送機の機体コスト

宇宙への輸送モデルにおいて、使い捨て型輸送機の輸送コストのモデル化においては、輸送機の機数と打ち上げ回数が同一であった。しかし、再利用型輸送機の輸送コストのモデル化においては、輸送機の機数と打ち上げ回数を区分せねばならない。また、計算のために、いくつか想定をおかねばならないが、本稿では、1 機の再利用型輸送機は、プロジェクト期間を通して常時利用されること、プロジェクト期間で寿命回数を全て使い切ること、そして、初期時点において、必要な機数を全て製造していることを想定する。結果として、同時並行的に複数の再利用型輸送機が運航していることとなる。また、その想定に対応して、再利用型輸送機については、資産としての取り扱い方法を考慮しなければならないが、それについては、第 2 章で述べたとおり、年価法を援用した機体 1 機あたりで、かつ、打ち上げ 1 回あたりのコストとして計測していく。そして、使い捨て型輸送機のケースと同様に、学習効果モデルから計測される値と割引率・利子率および物価上昇率の想定との整合性については、注意を要する。

それでは、再利用型輸送機のコストモデルの説明をすすめていく。

はじめに、1 年当たりの打ち上げ回数： $N_{R,Y}$ 、プロジェクト期間： Y_R 、再利用型輸送機のトータル製造機数： K_T 、および再利用型輸送機の 1 機あたりの打ち上げ寿命（回数）： $lifetime_R$ の関係を示しておこう。また、後の展開のために、1 機の再利用型輸送機の 1 年あたりの打ち上げ回数： $N'_{R,Y}$ もここで示す。

$$N_{R,Y} \cdot Y_R = K_T \cdot lifetime_R \cdot \dots \quad (4.1.1)$$

$$N'_{R,Y} = \frac{lifetime_R}{Y_R} \cdot \dots \cdot (4.1.2)$$

つぎに、再利用型輸送機の平均機体コスト： $AVGC_k^{vehicle,R}$ を計測する。

$$AVGC_k^{vehicle,R} = C_1^{vehicle,R} \cdot k^c \cdot \dots \cdot (4.1.3)$$

ただし、 $AVGC_k^{vehicle,R}$ ：再利用型輸送機を k 機製造したときの平均機体コスト、
 $C_1^{vehicle,R}$ ：再利用型輸送機の最初の 1 機のコスト、 c ：学習効果パラメータ
 k ：再利用型輸送機の製造機数 ($k = 1, 2, \dots, K_T$)
 K_T ：再利用型輸送機のトータルの機体数

使い捨て型輸送機では、割引率を考慮するか否かによって、累積製造コスト： $AUMC_n^{vehicle,E}$ (式 (3.1.1.4)) とトータルコスト： $TC^{vehicle,PV,E}$ (式 (3.1.3.3)) を区分したが、本稿で想定する再利用型輸送機の製造においては、累積製造コスト： $AUMC_n^{vehicle,R}$ とトータルコスト： $TC^{vehicle,PV,R}$ を区別する必要はない。

そして、複数機が同時並行的に運行していることを想定しているから、再利用型輸送機を K_T 機製造したときの 1 機あたりの平均コスト： $AVGC_{K_T}^{vehicle,R}$ に対応する仮想的な「平均的機体」が存在するとするならば、その「平均的機体」にかんする 1 回あたりの打ち上げコスト： $CpL^{vehicle,R}$ を求めれば、式 (4.1.1) に示される複数機体による複数打ち上げプロジェクト・ミッションにもとづく $CpL^{vehicle,R}$ が求められることとなる。

したがって、打ち上げ 1 回あたり機体 1 機あたりの機体コスト： $CpL^{vehicle,R}$ とは、「平均的機体」の打ち上げ 1 回あたりのコストであるから、式 (3.1.4.4) と式 (3.1.4.6) と同様の考え方にもとづく資本回収係数をもちいることにより、つぎのように計算できる。

$$CpL^{vehicle,R} = AVGC_{K_T}^{vehicle,R} \cdot \frac{\frac{r}{N'_{R,Y}}}{1 - \left(1 + \frac{r}{N'_{R,Y}}\right)^{-N'_{R,Y} \cdot Y_R}} \cdot \dots \cdot (4.1.4)$$

$$\approx AVGC_{K_T}^{vehicle,R} \cdot \frac{r}{(1 - e^{-r \cdot Y_R}) \cdot N'_{R,Y}} \cdot \dots \cdot (4.1.5)$$

ただし、 $CpL^{vehicle,R}$ ：打ち上げ 1 回あたりの機体コスト (1 機あたり)

4. 2 直接オペレーションコスト

直接オペレーションコストは、「平均的機体」に対応する「平均的オペレーションコスト」を想定して計測していく。なお、再利用型輸送機の運行に特有な回収・帰還コストと改修・修理コストは、次節以降の別変数とする。

ここで、式 (4.1.1) と学習効果パラメータ： d を考慮して、プロジェクト・ミッション全体の打ち上げ回数を考慮した直接オペレーションコストの平均値： $AVGC_{N_{R,Y} \cdot Y_R}^{direct,op,R}$ を計算すると、

$$AVGC_{N_{R,Y} \cdot Y_R}^{direct,op,R} = C_1^{direct,op,R} \cdot (N_{R,Y} \cdot Y_R)^d \cdot \dots \cdot (4.2.1)$$

$$= C_1^{direct,op,R} \cdot (K_T \cdot lifetime_R)^d \cdot \dots \cdot (4.2.2)$$

$$= C_1^{direct,op,R} \cdot K_T^d \cdot lifetime_R^d \cdot \dots \cdot (4.2.3)$$

ただし、 $AVGC_{N_{R,Y} \cdot Y_R}^{direct,op,R}$ ：プロジェクト全体の1回あたりの直接オペレーションコスト、
 d ：学習効果パラメータ、

となる。ここで、 $C_1^{direct,op,R} \cdot K_T^d$ は、「平均的機体」の1回目の打ち上げに対応する「平均的直接オペレーションコスト」を示していることから、

$$AVGC_{N_{R,Y} \cdot Y_R}^{direct,op,R} = AVGC_{K_T}^{direct,op,R} \cdot lifetime_R^d \cdot \dots \quad (4.24)$$

ただし、 $AVGC_{K_T}^{direct,op,R}$ ：「平均的機体」に対応する直接オペレーションコスト

と表記してもよいだろう。したがって、プロジェクト・ミッション全体の打ち上げ回数を考慮した直接オペレーションの平均値： $AVGC_{N_{R,Y} \cdot Y_R}^{direct,op,R}$ は、「平均的機体」に対応する「平均的直接オペレーションコスト」： $AVGC_{K_T}^{direct,op,R}$ を初期値として、機体の打ち上げごとに、寿命回数： $lifetime_R$ まで、学習効果が作動しながら低下していく値であることを示している。

ここで、再利用型輸送機1機あたりの打ち上げ回数： l を

$$l = 1, 2, \dots, lifetime_R$$

とし、「平均的機体」が第 l 回目に打ち上げられたときの「平均的直接オペレーションコスト」： $C_l^{direct,op,R}$ を計測すると、式(3.1.1.6)と式(3.1.1.7)より、

$$C_l^{direct,op,R} = AVGC_{K_T}^{direct,op,R} \cdot \{l^{d+1} - (l-1)^{d+1}\} \cdot \dots \quad (4.25)$$

$$\approx (d+1)AVGC_{K_T}^{direct,op,R} \cdot l^d \cdot \dots \quad (4.26)$$

となる。

そして、割引現在価値を集計すると、

$$TC^{direct,op,PV,R} = \sum_{l=1}^{N'_{R,Y} \cdot Y_R} \frac{C_l^{direct,op,R}}{\left(1 + \frac{r}{N_{R,Y}}\right)^{N'_{R,Y} \cdot \frac{l}{N_{R,Y}}}} \cdot \dots \quad (4.27)$$

$$\approx \sum_{l=1}^{N'_{R,Y} \cdot Y_R} \frac{C_l^{direct,op,R}}{e^{\frac{r \cdot l}{N_{R,Y}}}} \cdot \dots \quad (4.28)$$

ただし、 $TC^{direct,op,PV,R}$ ： $lifetime_R$ までの打ち上げたときの直接オペレーションコスト（現在価値）

となり、1機あたり打ち上げ1回あたりの直接オペレーションコスト： $CpL^{direct,op,R}$ は、つぎのようになる。

$$CpL^{direct,op,R} = TC^{direct,op,PV,R} \cdot \frac{\frac{r}{N_{R,Y}}}{1 - \left(1 + \frac{r}{N_{R,Y}}\right)^{-N'_{R,Y} \cdot Y_R}} \cdot \dots \quad (4.29)$$

$$\approx TC^{direct,op,R} \cdot \frac{r}{(1 - e^{-r \cdot Y_R}) \cdot N'_{R,Y}} \cdot \dots \quad (4.210)$$

ただし、 $CpL^{direct,op,R}$ ：打ち上げ1回あたりの直接オペレーションコスト

4. 3 回収・帰還コスト

回収・帰還コストは、輸送機が地上に戻ってきた後、発射場所まで輸送されるコストや、スペースシャトルにおいて、固体ロケットブースターを海上から回収するように、再利用するパーツを回収する費用である。また、次節で述べる改修・修理プロセスを終えた機器が所定の場所まで戻るための費用である。その値は、Werts (2000) に習って、直接オペレーションコストの一定の割合として、式 (4.3.1) のように設定しておこう。計測においては、「平均的機体」に対応した「平均的回収・帰還コスト」を計測することで進めており、前節の式 (4.2.5) 以降と同様である。

$$C_l^{recovery,R} = \beta_1 \cdot AVGC_{K_T}^{direct,op,R} \cdot \{l^{e+1} - (l-1)^{e+1}\} \quad \dots \quad (4.3.1)$$

$$\approx (e+1)\beta_1 \cdot AVGC_{K_T}^{direct,op,R} \cdot l^e \quad \dots \quad (4.3.2)$$

$$TC^{recovery,PV,R} = \sum_{l=1}^{N'_{R,Y} \cdot Y_R} \frac{C_l^{recovery,R}}{\left(1 + \frac{r}{N'_{R,Y}}\right)^{N'_{R,Y} \cdot \frac{l}{N'_{R,Y}}}} \quad \dots \quad (4.3.3)$$

$$\approx \sum_{l=1}^{N'_{R,Y} \cdot Y_R} C_l^{recovery,R} \frac{e^{-\frac{l}{N'_{R,Y}}}}{e^{-\frac{l}{N'_{R,Y}}}} \quad \dots \quad (4.3.4)$$

$$CpL^{recovery,R} = TC^{recovery,PV,R} \cdot \frac{\frac{r}{N'_{R,Y}}}{1 - \left(1 + \frac{r}{N'_{R,Y}}\right)^{-N'_{R,Y} \cdot Y_R}} \quad \dots \quad (4.3.5)$$

$$\approx TC^{recovery,R} \cdot \frac{r}{(1 - e^{-r \cdot Y_R}) \cdot N'_{R,Y}} \quad \dots \quad (4.3.6)$$

ただし、 e : 学習効果パラメータ

$C_l^{recovery,R}$: 第 l 回目の打ち上げの回収・帰還コスト、

$TC^{recovery,PV,R}$: $lifetime_R$ までの打ち上げたときの回収・帰還トコスト (現在価値)、

$CpL^{recovery,R}$: 打ち上げ1回あたりの回収・帰還コスト

4. 4 改修・修理トコスト

改修・修理コストは、帰還した輸送機について、検査、再検査、整備、あるいは取り替え等に関連する全てのコストを含んでいる。そして、Wertz (2000) においても、Koelle の TRANSCOST においても、機体の使用回数が増えるごとに上昇していく値として想定されていることが特徴的である。したがって、改修・修理コストのための学習効果が 100% を超える値となっており、費用が逡増していくことを表現している。なお、改修・修理コストの初期値は、機体の一定割合: β_2 である。

計算そのものは、これまでと同様に、「平均的機体」に対応する「平均的改修・修理コスト」を対応させて、つぎのように行う。

$$C_l^{refub,R} = \beta_2 \cdot AVGC_{K_T}^{vehicle,R} \cdot \{l^{f+1} - (l-1)^{f+1}\} \quad \dots \quad (4.4.1)$$

$$\approx (f+1)\beta_2 \cdot AVGC_{K_T}^{vehicle,R} \cdot l^f \quad \dots \quad (4.4.2)$$

$$TC^{refub,PV,R} = \sum_{l=1}^{N'_{R,Y} \cdot Y_R} \frac{C_l^{refub,R}}{\left(1 + \frac{r}{N'_{R,Y}}\right)^{N'_{R,Y} \cdot \frac{l}{N'_{R,Y}}}} \quad \dots \quad (4.4.3)$$

$$\approx \sum_{l=1}^{N'_{R,Y} \cdot Y_R} \frac{C_l^{refub,R}}{e^{\frac{l}{N'_{R,Y}}}} \cdot \cdot \cdot \quad (4.4.4)$$

$$CpL^{refub,R} = TC^{refub,PV,R} \cdot \frac{\frac{r}{N'_{R,Y}}}{1 - \left(1 + \frac{r}{N'_{R,Y}}\right)^{N'_{R,Y} \cdot Y_R}} \cdot \cdot \cdot \quad (4.4.5)$$

$$\approx TC^{refub,PV,R} \cdot \frac{r}{(1 - e^{-r \cdot Y_R}) \cdot N'_{R,Y}} \cdot \cdot \cdot \quad (4.4.6)$$

ただし、

f : 学習効果パラメータ, $C_l^{refub,R}$: 第 l 回目の打ち上げの改修・修理コスト,
 $TC^{refub,PV,R}$: $lifetime_R$ までの打ち上げたときの改修・修理コスト (現在価値),
 $CpL^{refub,R}$: 打ち上げ 1 回あたりの改修・修理コスト

4. 5 打ち上げ保険

第 l 回目の打ち上げの保険料: $C_l^{insurance,R}$ は, 使い捨て型輸送機のケースと同様に, 式 (4.5.1) のように, 機体コストの一定割合: β_3 とする。したがって, 割引率を考慮しないならば, 「平均的機体の保険料」: $\beta_3 \cdot AVGC_{K_T}^{vehicle,R}$ は一定値: $C^{insurance,R}$ であり, 打ち上げごとには変化しない。なお, 式 (4.5.3) 以降は, これまでの指針と同一である。

$$C_1^{insurance,R} = C_2^{insurance,R} = \dots = C_{lifetime_R}^{insurance,R} = \beta_3 \cdot AVGC_{K_T}^{vehicle,R} \cdot \cdot \cdot \quad (4.5.1)$$

$$= C^{insurance,R} \cdot \cdot \cdot \quad (4.5.2)$$

$$TC^{insurance,PV,R} = \sum_{l=1}^{N'_{R,Y} \cdot Y_R} \frac{C^{insurance,R}}{\left(1 + \frac{r}{N'_{R,Y}}\right)^{N'_{R,Y} \cdot \frac{l}{N'_{R,Y}}}} \cdot \cdot \cdot \quad (4.5.3)$$

$$\approx \sum_{l=1}^{N'_{R,Y} \cdot Y_R} \frac{C^{insurance,R}}{e^{\frac{l}{N'_{R,Y}}}} \cdot \cdot \cdot \quad (4.5.4)$$

$$CpL^{insurance,R} = TC^{insurance,PV,R} \cdot \frac{\frac{r}{N'_{R,Y}}}{1 - \left(1 + \frac{r}{N'_{R,Y}}\right)^{-N'_{R,Y} \cdot Y_R}} \cdot \cdot \cdot \quad (4.5.5)$$

$$\approx TC^{insurance,PV,R} \cdot \frac{r}{(1 - e^{-r \cdot Y_R}) \cdot N'_{R,Y}} \cdot \cdot \cdot \quad (4.5.6)$$

ただし, β_3 : 保険料 (率), $C^{insurance,R}$: 打ち上げ 1 回あたりの保険料,
 $TC^{insurance,PV,R}$: $lifetime_R$ まで打ち上げたときの保険料 (現在価値),
 $CpL^{insurance,R}$: 打ち上げ 1 回あたりの保険料

4. 6 間接経費

使い捨て型輸送機と同様に, 第 l 回目の打ち上げにかんする間接的な経費 $C_l^{indirect,op,R}$ は, 一般管理費としての取り扱いを想定して, つぎのように設定してみよう。

$$C_l^{indirect,op,R} = \beta_4 (C_l^{vehicle,R} + C_l^{direct,op,R} + C_l^{recovery,R} + C_l^{refub,R} + C_l^{insurance,R}) \cdot \cdot \cdot \quad (4.6.1)$$

ここで, 第 l 回目の打ち上げの機体コスト: $C_l^{vehicle,R}$ は, 式 (4.1.4) で計測される一定値であり, 第

l 回目の打ち上げの保険料： $C_l^{insurance,R}$ も、式 (4.5.1) より計測される一定値である。したがって、つぎのようになる。

$$C_l^{vehicle,R} = CpL^{vehicle,R} \cdot \cdot \cdot (4.6.2)$$

$$C_l^{insurance,R} = C^{insurance,R} \cdot \cdot \cdot (4.6.3)$$

なお、式 (4.6.4) 以降は、これまでと同様である。

$$TC^{indirect,op,PV,R} = \sum_{l=1}^{N'_{R,Y} \cdot Y_R} \frac{C_l^{indirect,op,R}}{\left(1 + \frac{r}{N_{R,Y} \cdot Y_R}\right)^{N'_{R,Y} \cdot \frac{l}{N_{R,Y}}}} \cdot \cdot \cdot (4.6.4)$$

$$\approx \sum_{l=1}^{N'_{R,Y} \cdot Y_R} \frac{C_l^{indirect,op,R}}{e^{\frac{r \cdot l}{N_{R,Y}}}} \cdot \cdot \cdot (4.6.5)$$

$$CpL^{indirect,op,R} = TC^{indirect,op,PV,R} \cdot \frac{\frac{r}{N_{R,Y}}}{1 - \left(1 + \frac{r}{N_{R,Y}}\right)^{-N'_{R,Y} \cdot Y_R}} \cdot \cdot \cdot (4.6.6)$$

$$\approx TC^{indirect,op,PV,R} \cdot \frac{r}{(1 - e^{-r \cdot Y_R}) \cdot N_{R,Y}} \cdot \cdot \cdot (4.6.7)$$

ただし、 β_4 ：間接経費比率、 $C_l^{indirect,op,R}$ ：第 l 回目の打ち上げの間接経費、 $TC^{indirect,op,R}$ ：打ち上げの間接経費（現在価値）、 $CpL^{indirect,op,E}$ ：打ち上げ 1 回あたりの間接経費

4. 7 研究開発費

使い捨て型輸送機と同様に、実際の打ち上げが開始される以前に R&D 支出総額： $TC^{R\&D,R}$ が確定している。したがって、R&D 支出総額を輸送機 1 機あたりの R&D 支出総額を計算し、打ち上げ 1 回あたりの資本回収係数より、打ち上げ 1 回あたりの R&D コスト： $CpL^{R\&D,R}$ をつぎのように計測する。なお、使い捨て型輸送機と同様に、これまでの説明にもちいた割引率・利率： r と機体開発に関連する事前の研究開発投資にかんする利率を区分するか否かは、具体的な実証研究時の考察事項とする。

$$CpL^{R\&D,R} = (TC^{R\&D,R} / K_T) \cdot \frac{\frac{r}{N_{R,Y}}}{1 - \left(1 + \frac{r}{N_{R,Y}}\right)^{-N'_{R,Y} \cdot Y_R}} \cdot \cdot \cdot (4.7.1)$$

$$\approx TC^{R\&D,R} \cdot \frac{r}{(1 - e^{-r \cdot Y_R}) \cdot N_{R,Y}} \cdot \cdot \cdot (4.7.2)$$

ただし、 $TC^{R\&D,R}$ ：R&D 支出総額、 $CpL^{R\&D,R}$ ：打ち上げ 1 回あたりの R&D コスト

4. 8 再利用型輸送機を利用した場合の CpL のバランス式

最後に、1 機あたり打ち上げ 1 回あたりのトータルコスト： CpF^R は、R&D 投資を含める場合と含めない場合に区分して示すと、つぎの通りである。

$$CpL^R = CpL^{vehicle,R} + CpL^{direct,op,R} + CpL^{recovery,R} + CpL^{refub,R} + CpL^{insurance,R} + CpL^{indirect,op,R} \cdot \cdot \cdot (4.8.1)$$

$$CpL^{R'} = CpL^R + CpL^{R\&D,R} \cdot \cdot \cdot (4.8.2)$$

ただし、 CpL^R ：1 機あたりの打ち上げ 1 回あたりのコスト（R&D を含まない）

$C_p L^R$: 1機あたりの打ち上げ1回あたりのコスト (R&Dを含む)

5. 結びにかえて

本稿は、宇宙の輸送コストの基本構成に伝統的な学習効果モデルを挿入し、データの入手可能性とパラメータの設定可能性を考慮しながら、使い捨て型輸送機と再利用型輸送機にかんする輸送コストモデルのフレームを構築した。モデルは非常にシンプルであり、また、コストのみの議論ではあるが、使い捨て型輸送機と再利用型輸送機の「機体を再利用しない」、「機体を再利用する」という基本的な特徴は、モデル計算式にも反映されており、使い捨て型輸送機と再利用型輸送機のコスト特性を考察することも出来る。しかし、それについては、実証的なモデル操作の中で議論すべき論点でもあろう。

スペースシャトルの退役後、民間主導で再利用型輸送機の研究開発が進められてきたが、近年、具体的な運用が本格化するきざしを見せている。それは、スペースシャトルとは異なるコンセプトではあるものの、そういった今日的な状況も踏まえながら、宇宙への輸送システムの情報を整理し、具体的実証的なモデル操作へと進んでみたい。

参考文献

- Apgar, Henry, David Bearden and Robert Wong (1999), "Cost Modeling", Wertz, James R. and Wiley J. Larson ed. *Space Mission Analysis and Design*, Space Technology Library, pp.783-820.
- Apgar, Henry (2011), "Cost Estimating", Wertz, James R. et al. eds, pp.289-318.
- Badiru, Adedeji B. (2011), "Introduction to Half-Life Theory of Learning Curves", in Jaber (2011) pp.129-161.
- Badiru, Adedeji B. (1992), "Computational Survey of Univariate and Multivariate Learning Curve Models", *IEEE Transaction on Engineering Management*, vol.39, no.2, pp.176-188, 1992.
- Collins, John (2011), "Example Space Mission Cost Estimates", Wertz, James R. et al. eds, pp.318-323.
- DoE/NASA (Department of Energy/National Aeronautics and Space Administration) (1980), *Satellite Power Systems (SPS) Space Transportation Cost Analysis and Evaluation*, DOE/ER-0086.
- DoT·FAA (Department of Transportation · Federal Aviation Administration) (1988), "Special Report: Update of the Space and Launch Insurance Industry", *Quarterly Launch Report*, 4th Quarter 1988.
- Harron, Ronald J. and Wadle, Richard C. (1981), *Solar Power Satellite Cost Estimate*, NASA Technica Memorandum 58231.
- Hertzfeld, Henry R., Ray A. Williamson, and Nicolas Peter (2005), "Launch Vehicles: An Economic Perspective", Space Policy Institute.
- Jaber, Mohamad Y. (2011), *LEARNING CURVES Theory, Models, and Applications*, CRC Press.
- Koelle, Dietrich E (1984), "The Transcost-Model for Launch Vehicle Cost Estimation and its Application to Future Systems Analysis", *Acta Astronautica* vol.11 no.12, pp.803-817.
- Koelle, Dietrich E (2000), *Handbook of Cost Engineering for Space Transportation Systems with TRANSCOST 7.0*, TCS-TransCostSystems.
- Koelle, Dietrich E (2007), *Handbook of Cost Engineering for Space Transportation Systems with TRANSCOST 7.2*, TCS-TransCostSystems.
- Koelle, Dietrich E (2013), *Handbook of Cost Engineering and Design of Space Transportation Systems Revision 4 with TransCost 8.2 Model Description*.
- Mandell, H.C. (1992), "Cost-Estimating Relationship for Space Programs", Greenberg, Joel S. and Henry R. Hertzfeld eds. *Space Economics*, pp.57-87
- Moorman, Lt. Gen Thomas S. Jr. (1994), "DoD Space Launch Modernization Plan".
- Mori, Hidehiko and Yamanaka, Tatso (1982), "Macroeconomic Aspects of Satellite Power System for Japan", *Proceedings of Space Energy Symposium*, pp.11-18, ISAS.
- NASA (National Aeronautics and Space Administration) (2015), *NASA Cost Estimating Handbook version 4.0*
- Office of Management and Budget (1992), "Guidelines and Discount Rates for Benefit-Cost Analysis of Federal

- Programs” , Circular No. A-94 Revised, https://www.whitehouse.gov/omb/circulars_a094
- Wertz, James R. (2000), “Economic Model of Reusable vs. Expendable Launch Vehicle”, IAF Congress, Rio de Janeiro, Brazil.
- Wertz, James R., David F.Everett and Jeffery J.Puschell (2011), *Space Mission Engineering: The New SMAD, Microcosm*.
- Wright, T.P. (1936), “Factors Affecting the Cost of Airplanes,” *Journal of the Aeronautical Science*, vol.3, pp122-128.
- 朝倉啓一郎・中野諭 (2013)「SPS (宇宙太陽発電衛星) の発電単価について」『第 32 回 宇宙エネルギーシンポジウム』JAXA 宇宙科学研究所, (<https://repository.exst.jaxa.jp/dspace/handle/a-is/14562>).
- 浅田正一郎 (2013)「太陽光発電衛星建設に伴う輸送系の対応と三菱重工 (株) の SPS 開発構想」『第 2 回「宇宙太陽光発電実現加速」ワークショップ』未踏科学技術協会。
- 稲谷芳文 (2005)「『ロケットの次のゴール』または『詐欺師ベテン師の世界』」ISAS ニュース, No.286。
- 宇宙開発委員会 (2002)「第 8 回宇宙開発委員会議事録」2002 年 2 月 27 日 (文部科学省宇宙開発委員会)。
- 宇宙開発委員会 (2014)「宇宙輸送システム長期ビジョン参考資料集」平成 26 年 4 月 3 日 (内閣府宇宙開発委員会)。
- 小田正雄・高森寛・森崎初男・森平爽一郎訳 (2010)『現代経済学の数学基礎第 4 版』,シーエーピー出版 (A.C.Chiang and K.Wainwright (2005), *Fundamental Methods of Mathematical Economics*, Fourth Edition)。
- 尾山大輔・安田洋祐編著 (2013)『経済学で出る数学』日本評論社。
- 川本英之 (2015)「宇宙保険の概要」『航空と宇宙』2015 年 3 月号。
- 佐々木進 (2013)「ここまで来た太陽光発電衛星のデザイン」『第 1 回「宇宙太陽光発電実現加速」ワークショップ』未踏科学技術協会。
- JAXA タウンミーティング (2009.07.25)「第 36 回 JAXA タウンミーティング in 大阪 会場 で出された意見について:『第一部 地球を見る, 世界をつなぐ人工衛星のはたらき』で出された意見」2009 年 7 月 25 日。
- 新開陽一・渡部経彦訳 (1968)『現代経済学』東洋経済新報社 (R.G.D.Allen (1967), *Macro-Economics Theory: A Mathematical Treatment*, Macmillan and Company Limited, London)。
- 千住鎮雄・伏見多美雄 (1982)『新版 経済性工学の基礎』日本能率協会マネジメントセンター。
- 寺門邦次 (2014)『宇宙飛行士の知られざる真実』実業之日本社。
- 発電コスト検証ワーキンググループ (2015)「長期エネルギー需給見通し小委員会に対する発電コスト等の検証に関する報告」(および参考資料)平成 27 年 5 月。
- 保険毎日新聞社 (1983)『損害保険変わりだね』保険毎日新聞社。
- 的川泰宣 (2011a)『宇宙ビジネス』アスキー・メディアワークス。
- 的川泰宣 (2011b)『宇宙ロケットのしくみ』PHP 文庫。
- 森雅裕 (2013)「宇宙太陽発電 (SSPS) の事業化について」『第 2 回「宇宙太陽光発電実現加速」ワークショップ』未踏科学技術協会。
- 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。
- 山本哲三訳 (2011)『OECD 規制影響分析 政策評価のためのツール』(OECD (2009), *Regulatory Impact Analysis: A Tool for Policy Coherence*), 明石出版。