

大出力電気推進を用いた宇宙太陽発電衛星の輸送コスト評価 Estimation of Transportation Cost of Space Solar Power Satellite Using High Power Electric Propulsion

中野正勝^{*†}
Masakatsu NAKANO

SSPS の経済的成立性を左右する要因の一つは輸送コストである。本論文では、部分再使用打ち上げロケット (GLV) と電気推進を用いた完全再使用軌道往還機 (OTV) により SSPS を輸送するシナリオに基づいてそのコスト計算を行う。現状の技術レベルとその延長で実現可能な SSPS の輸送コストは、10000 ton の SSPS を 10 年で構築するのに約 1.27 兆円であり、アルゴン推進剤とした比推力 2660 s の電気推進で実現される。一方、GLV のみでは 44% 高いコストとなった。感度解析を行うことで SSPS の輸送コストにインパクトを与えるパラメータを抽出し、SSPS の輸送コストを 3000 億円にするのに必要な技術革新として、GLV および OTV の初期製造コストを 75% 削減することが必要であることが明らかとなった。

The selling price of electricity depends strongly on the transportation cost of SSPS from the ground to Geostationary Earth Orbit, which greatly influences the economic feasibility of the SSPS. This study discusses the transportation cost of the SSPS by using reusable orbital transfer vehicles (OTVs) driven by high power electric propulsion. Cost analysis showed that the transportation cost of 10000 ton SSPS is around 1.27 trillion yen, which is 44% lower than that of using ground launch vehicles (GLVs) alone. The optimum specific impulse of electric propulsion is around 2660 s with the use of argon as a propellant. A sensitivity analysis showed that the innovation of reducing the initial construction costs of the GLVs and OTVs by 75% is necessary to meet the target transportation cost within 0.3 trillion yen.

Keywords : Transportation Cost, OTV, High Power Electric Propulsion

1. はじめに

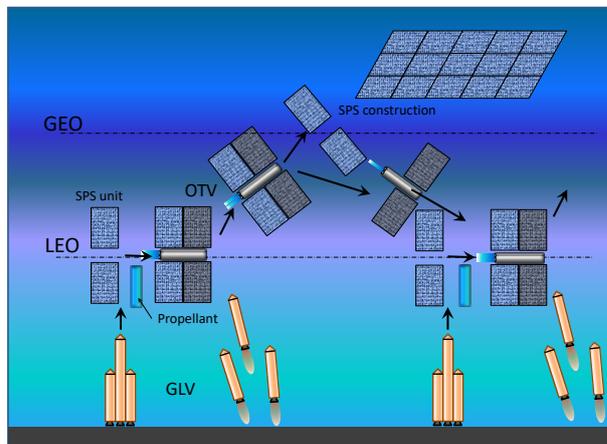
1968 年に Peter Glaser により宇宙太陽発電のアイデアが提案されて約半世紀が経つ¹⁾。これまでの精力的な研究により宇宙での発電や宇宙から地上への送電などの基礎的な技術は得られつつある。

世界の消費電力は現在年間約 20 兆 kWh であり、日本の消費電力はその 1/20 の約 1 兆 kWh である²⁾。1 GW クラスの SSPS が 9 割以上の稼働率で発電を行った場合、年間 80 億 kWh 強の電力供給量が見込まれるため、日本の発電総量の 1% 弱に相当する。国内の電力コストは、太陽光が 24.2 ~ 29.43 円/kWh、石油火力が 30.6 ~ 43.4 円/kWh、天然ガス火力が 13.7 円/kWh、石炭火力が 12.3 円/kWh、原子力が 10.1 ~ 円/kWh、水力が 11.0 円/kWh である³⁾。

SSPS の成立を左右する大きな要素は売電価格であり、そのためには SSPS を静止軌道 (GEO) に輸送するためのコストを低減する必要がある。これまでに行われた試算として、1 万 ton、1 GW クラスの SSPS により 1 kWh あたり 8

円の売電価格を実現するには、SSPS を 1 兆 2000 億円で建造する必要があり、輸送コストを約 3000 億円に収めなくてはならない⁴⁾。これを実現するためには H2A の 1/50 程度の打ち上げコストでほぼ毎日打ち上げ可能な輸送機が必要とされる。

輸送コストの大幅な低減には打ち上げ機の再使用が必要不可欠とされ大きな技術革新が必要である。打ち上げ機に関しては、Space X の Falcon 9 の 1 段目の再利用に向けた



第 1 図 OTV を用いた SSPS 輸送の概念図

† Corresponding author: Masakatsu NAKANO.

E-mail: mnakano@metro-cit.ac.jp

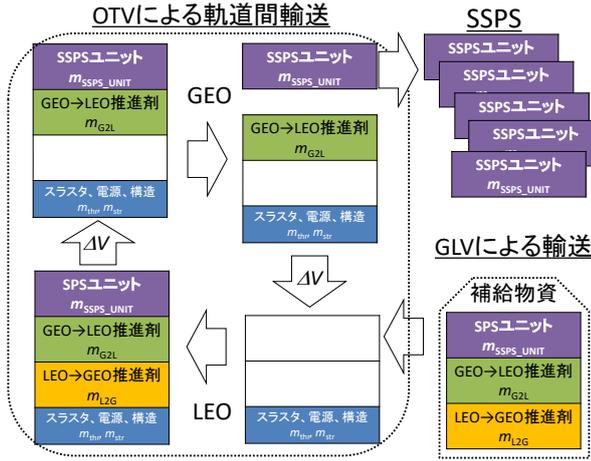
*1 東京都立産業技術高等専門学校

〒116-8523 東京都荒川区南千住 8-17-1

Tokyo Metropolitan Collage of Industrial Technology,

8-17-1, Minamisenjyu, Arakawa-ku, Tokyo 116-8523, Japan

©SSPSS



第2図 SSPS 輸送の質量配分モデル

試みがあり、1 段目のコストが全体の約 75%とされることから、1 段目の再使用技術の確立と生産技術の積み重ねによってコストが数割程度になるのも夢ではない。

SSPS の輸送のうち、低軌道 (LEO) までは推力の大きい化学推進の一択になるが、LEO から GEO への軌道移行については、近年研究開発が進む高出力電気推進を用いることで、輸送回数を減らすことが可能である。化学推進は推進剤の持つ化学エネルギーを燃焼反応によって取り出して用いるもので、非常に大きな推力を持ち地上からの打ち上げに適している。電気推進は太陽電池から得られた電力を推進剤に投入することで推進剤の噴射速度が高くなり燃費がよい (比推力が高い)。電気推進による衛星の静止軌道への投入は、昨年と今年、全電化バスである Boeing の 702SP により商業的に行われるようになっており、電気推進機の耐久性に関する研究も進んでいることから、電気推進による完全再使用軌道間輸送機 (Orbital Transfer Vehicle: OTV) の実現も現実的となっている。

本論文では、部分再使用打ち上げ機により LEO に投入した SSPS を電気推進による完全再使用 OTV システムによって GEO に輸送するシナリオ (第 1 図) に基づいて、その輸送コストを評価する。打ち上げ機単独による輸送に対してどの程度のコスト削減が見込まれるのか、また、電気推進の作動域としてはどこが最適になるのかを明らかにし、現状技術とその延長線で実現可能な SSPS の輸送コストを推定するとともに、輸送コストの大幅低減に必要な新たな技術革新を求めるものとする。

2. 解析モデル

2.1 輸送シナリオ SSPS の輸送シナリオとして、第 1 図に示すように、地上から LEO までは化学ロケットによる打ち上げ機 (Ground Launch Vehicle: GLV) を用いて SSPS の構築に必要な太陽電池や推進剤などを輸送し、LEO から GEO までは電気推進による OTV を使用する。

OTV は複数機を用いるが、使い捨てとせず再使用するものとする。これは後に解析結果から示されるように、OTV の建造コストの占める割合が高いからである。なお、GEO に輸送する太陽電池パネルの一部を OTV の電気推進の電力源としても利用し輸送能力の向上を図る。これは OTV

の質量が大きい往路で大きな推力を確保するためである。一方で、往路で使用した電気推進機の全てを復路で用いることはないため、不必要に多くの電力を確保する必要はない。本論文では、往路と復路の電力配分として約 10:6 が最適であるという試算⁵⁾に基づき、往路の電力が復路の倍になるようにする。具体的には、500 kW の太陽電池を持つ OTV を用いる場合、GEO に向かう際には輸送中の太陽電池から 500 kW の電力をもらい合計 1000 kW の OTV として利用し、太陽電池パネルを GEO に届けた後は 500 kW の OTV として LEO へ戻ることを繰り返す。なお、静止軌道に配置された SSPS は位置の保持に南北制御と東西制御が必要である。また、運用期間終了後には軌道高度を上げるデオービット作業が必要になる。これらに必要な推進剤は SSPS 完成後に不要となった OTV を用いて輸送するものとする。

2.2 軌道移行・質量配分モデル OTV の質量配分モデルについて第 2 図に示す。地上から GEO まで輸送すべき SSPS の総質量を M_{SSPS} とし、OTV が 1 回の輸送で運ぶことのできる SSPS のユニットの質量を m_{SSPS_UNIT} とする。SSPS 完成までに必要なユニットの輸送回数 N_{OTV_flight} は

$$N_{OTV_flight} = \frac{M_{SSPS}}{m_{SSPS_UNIT}} \quad (1)$$

である。

LEO・GEO 間の軌道移行を電気推進のような低加速度推進系で行う場合には、Edelbaum の式⁶⁾

$$\Delta V = \sqrt{V_{LEO}^2 - 2V_{LEO}V_{GEO} \cos \frac{\pi}{2} \Delta i + V_{GEO}^2} \quad (2)$$

から軌道移行に必要な ΔV が算出される。ここで、 V_{LEO} と V_{GEO} は LEO と GEO における軌道速度を示し、 Δi は LEO と GEO の軌道傾斜角の差である。この ΔV を用いて軌道移行に必要な往路 (LEO から GEO) の推進剤質量 m_{L2G} と往路 (GEO から LEO) の推進剤質量 m_{G2L} を求めることができる。具体的には、第 2 図より往路についてロケット方程式から

$$\Delta V = g I_{sp} \ln \frac{m_{thr} + m_{str} + m_{L2G} + m_{SSPS_UNIT} + m_{G2L}}{m_{thr} + m_{str} + m_{SSPS} + m_{G2L}} \quad (3)$$

となる。ここで、 m_{thr} は推進系の質量、 m_{str} は推進剤タンクなどの構造系の質量である。復路についても同様に求めると

$$\Delta V = g I_{sp} \ln \frac{m_{thr} + m_{str} + m_{G2L}}{m_{thr} + m_{str}} \quad (4)$$

である。構造系の質量は推進剤質量と構造係数 ε から

$$\varepsilon = \frac{m_{str}}{m_{str} + m_{L2G} + m_{G2L}} \quad (5)$$

と書ける。式(3),(4),(5)より LEO 出発時に必要な推進剤質量は、往路と復路の合計の

$$m_{L2G} + m_{G2L} = \frac{m_{SSPS} \left(e^{\Delta V / g I_{sp}} - 1 \right) + m_{thr} \left(e^{2\Delta V / g I_{sp}} - e^{\Delta V / g I_{sp}} \right)}{1 - \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon} \left(e^{2\Delta V / g I_{sp}} - e^{\Delta V / g I_{sp}} \right)} \quad (6)$$

であり、GLV による補給対象となる。

軌道移行時間については、OTV の往路の推進剤消費率が、電気推進機の効率 η と比推力 I_{sp} ならびに往路の電力 P_{L2G} から

$$\dot{m}_{L2G} = \frac{2\eta P_{L2G}}{(g_{isp})^2} \quad (7)$$

であり、復路における推進剤消費率が復路の電力 P_{G2L} を用いて

$$\dot{m}_{G2L} = \frac{2\eta P_{G2L}}{(g_{isp})^2} \quad (8)$$

であることから、地球の影に入って推力発生が中断される割合 f_s を考慮して

$$\Delta T_{L2G} = \frac{(1+f_s) \cdot m_{L2G}}{\dot{m}_{L2G}} \quad (9)$$

$$\Delta T_{G2L} = \frac{(1+f_s) \cdot m_{G2L}}{\dot{m}_{G2L}} \quad (10)$$

と求めることができる。

輸送のために必要な OTV の総数 N_{OTV} については、ミッション期間 $T_{mission}$ に 1 機の OTV が往還できる回数が $T_{mission}/(\Delta T_{L2G} + \Delta T_{G2L})$ で与えられることから、SSPS ユニットの輸送回数より

$$N_{OTV} = \frac{N_{OTV_flight}}{\frac{T_{mission}}{\Delta T_{L2G} + \Delta T_{G2L}}} \quad (11)$$

から求められる。

OTV の電気推進機としては、現在研究開発が進む大型ホールスラスタを想定し、スラスタの質量、ケーブルの質量を電力の関数として

$$m_{thead} = 2.4254 \cdot P \text{ kg/kW} \quad (12)$$

$$m_{cables} = 0.06778 \cdot P + 0.7301 \text{ kg/kW} \quad (13)$$

で与える⁷⁾。OTV の太陽電池パネルの比質量については、SSPS の比質量自体が 10 kg/kW⁴⁾ であることから数割程度の

$$m_{sa} = 3 \cdot P \text{ kg/kW} \quad (14)$$

とモデル化し、PPU の質量を

$$m_{ppu} = 1.7419 \cdot P + 4.654 \text{ kg/kW} \quad (15)$$

から概算する⁷⁾。電気推進機に関連する比質量はこれらの合計値の 7 kg/kW として評価した。

LEO から GEO への軌道移行の際にはバンアレン帯を通過することによる太陽電池の劣化が発生する。劣化による影響は、太陽電池パネルの投入量に反映され、GEO において必要な電力を確保できるように劣化で失われる発電量分 (劣化係数 γ) を余分に GLV により LEO に投入するものとする。すなわち、以上の定式化において

$$m_{SSPS_UNIT} \leftarrow \frac{m_{SSPS_UNIT}}{1-\gamma} \quad (16)$$

とする。

2.3 コストモデル SSPS の輸送コスト C_{total} は、OTV の製造コスト (C_{OTV_cnst})、LEO への OTV の打ち上げコスト (C_{GLV_OTV})、LEO への SSPS のユニットと OTV 用推進剤の打ち上げコスト ($C_{GLV_SSPS\&prp}$)、OTV 用推進剤のコスト (C_{OTV_prp}) の合計

$$C_{total} = C_{OTV_cnst} + C_{GLV_OTV} + C_{GLV_SSPS\&prp} + C_{OTV_prp} \quad (17)$$

から構成されるものとする。

製造コストや打ち上げコストについては、使い捨てから

再使用に変わるようなパラダイムシフトによる大きなコスト低減と生産技術の向上による着々としたコスト低減がある。このうち後者については経験曲線効果を用いてモデル化する。具体的には、OTV の製造コスト C_{OTV_cnst} を、経験曲線効果 (習熟率 r) を用いて 1 機目の OTV の製造コスト c_{OTV} と OTV の製造数の関数として与える。

$$C_{OTV_cnst} = \sum_1^{N_{OTV}} c_{OTV} \cdot r^{\log_2(N)} \quad (18)$$

OTV 製造の習熟率については、航空機で一般的とされる値の 0.85 を用いる⁸⁾。

1 機目の OTV の製造コストについては、電気推進機の単価を c_{thr} とし、搭載個数を n_{thr} として、その他の構造部分を c_{str} と見積もることで

$$c_{OTV} = c_{thr} \cdot n_{thr} + c_{str} \quad (19)$$

とする。電気推進機の単価については、スケーリングモデルを用いて予測する⁷⁾。このスケーリングモデルでは、電気推進機の出力が 10 倍増加するごとにコストが 2 倍程度増加するという経験則に基づいて、2~4 倍程度の不確実性を含めて

$$c_{thr}(P) = q \cdot c_{thr}(P_{Ref}) \cdot \log_{10} \left(\frac{P}{P_{Ref}} \right) \quad (20)$$

とするもので、基準となる電気推進機のコストとしては 5 kW のホールスラスタの価格 8 億円を用い、 $c_{thr}(5 \text{ kW}) = 8$ 億円として価格を算出する。不確実性を示す係数については $q = 2$ とした。パラダイムシフト的な大きなコスト低減については、この基準となる電気推進機のコストの値を変えて計算に組み込むものとする。

OTV の構造部分のコストについては、輸送する SSPS のユニットと推進機の質量に比例するものとして

$$c_{str} = k \cdot (m_{SSPS_UNIT} + m_{thr}) \quad (21)$$

から計算する。構造係数については 0.3 としている⁷⁾。

GLV による OTV の打ち上げコストについても経験曲線効果によるコスト低減を考慮して

$$C_{GLV1} = \sum_1^{N_{GLV_OTV}} c_{GLV} \cdot r^{\log_2(N)} \quad (22)$$

とする。OTV の打ち上げ回数は OTV の個数に 1 機の OTV の打ち上げに必要な GLV の打ち上げ回数を掛けることで

$$N_{GLV_OTV} = N_{OTV} \cdot \frac{m_{thr} + m_{str}}{m_{GLV}} \quad (23)$$

から求める。

LEO への SSPS ユニットと OTV 用推進剤の輸送コストについては、OTV の打ち上げによる経験曲線効果を引き継ぎ

$$C_{GLV2} = \sum_{N_{GLV_OTV}}^{N_{GLV_OTV} + N_{GLV_SSPS\&prp}} c_{GLV} \cdot r^{\log_2(N)} \quad (24)$$

から計算する。ここで $N_{GLV_SSPS\&prp}$ は SPS ユニットとその軌道間輸送に必要な OTV 用推進剤を打ち上げる回数である。

$$N_{GLV_SSPS\&prp} = N_{OTV_flight} \cdot \left(\frac{m_{SSPS}}{m_{GLV}} + \frac{m_{G2L} + m_{L2G}}{m_{GLV}} \right) \quad (25)$$

なお、式(22)や式(24)において $N \rightarrow \infty$ とすると GLV の打ち上げコストが 0 となり不合理であるが、今回の検討では必要な GLV の数から得られる最終的な GLV の打ち上げコストは初期コストの 0.35 程度であった。

OTV の電気推進の推進剤のコストについては、推進剤の

単価を β として

$$C_{OTV2} = N_{OTV_flight} \cdot \beta \cdot (m_{G2L} + m_{L2G}) \quad (26)$$

から計算できる。ホールスラスタの推進剤としては、推進効率が高いキセノンをを用いることが通常であるが、後に示すように単価が高いことと生産量の関係からアルゴンが有力な選択肢である。アルゴンとキセノンの価格については、市場価格を用いるが、キセノンについては価格が大きく変動しているため、過去 10 年間における価格の幅 \$1000 \sim \\$6000/kg\$ の下限値である \$1000/kg\$ を用いて評価した。

3. 解析結果

3.1 輸送条件 1万トンのSSPSをGEOまで輸送する。第1表にミッションの条件を示す。GLVとしてFalcon Heavyを想定し、OTVが1回で輸送できるSSPSのユニットはFalcon Heavyの低軌道への打ち上げ能力と同じ54.4 tonとする。打ち上げ場所は、Florida（北緯28.2°）または種子島宇宙センター（北緯30.2°）を想定し、OTVの ΔV は軌道傾斜角変更を30°として評価する。

OTVに用いるホールスラスタとしては100 kW出力のものを想定した。電力は上述のようにOTVが持つ電力に加え、往路にはSSPSユニットの電力を用いるものとする。太陽電池としては3接合型太陽電池を想定し、放射線帯通過によって500日で2割程度の劣化を見込んで飛行時間の関数として与える。SSPSの運用期間は構築期間も含めた30年とし、運用期間中の南北制御とデオービット用の推進剤とその輸送に関するコストも合算する。

輸送コストの計算に用いた比質量やコスト等の計算パラメータについて第2表に示す。これらは現状の技術とその延長で予測される値を用いている。ドル建てのコストについては為替レートを \$1 \text{ ¥}105\$ として評価した。

3.2 現状技術とその延長によるコスト推定 第3図にSSPSの輸送コストをコストの構成要素ごとに示す。ホールスラスタの比推力には自由度があるので、横軸を比推力としてプロットした。なお、GLVのみを用いて直接GEOにSSPSを投入した場合、打ち上げ回数は901回で打ち上げ間隔は約4日、輸送コストは経験曲線効果を加味して約2.27兆円である。

第3図から明らかなように、GLVを用いてLEOに投入し、その後OTVを用いてGEOへ輸送する方法は、GLVによる直接軌道投入よりも低コストである。SSPSの輸送コストが最小となるのはホールスラスタの比推力が約2660 sの場合であり、約1.27兆円で輸送可能である。すなわち、GLV単独よりも約44%の輸送コストの削減が可能となる。このときのOTVの機数は31機、使用されるホールスラスタの台数は310台である。

SSPSの輸送コストに占める各コストの内訳であるが、比推力の低い領域では、OTVの推進剤の打ち上げコストが多くを占めており、比推力が高くなるにつれてOTVの製造コストの占める割合が大きくなる。これは推力加速度と比推力が反比例の関係にあるため、比推力が低ければ推進剤を多く消費するが飛行時間が短く、1つのOTVを何度も使用することが可能であるからである。一方、比推力が高ければ、推進剤消費量は抑えられるが、飛行時間が長くなるためにOTVの数が増えその製造コストが増える。なお、SSPSの輸送コストが最小となる比推力付近ではOTVの製造コストが無視できず、OTVの再使用は必須である。

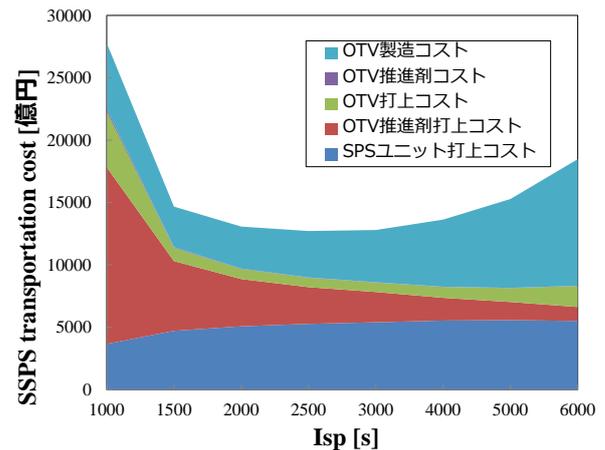
OTVに関連するコストに着目すると、OTVの打ち上げコストはOTVの製造コストに比べると相対的に小さく、OTVの推進剤であるアルゴンのコストは全体に対しては

第1表 ミッション条件

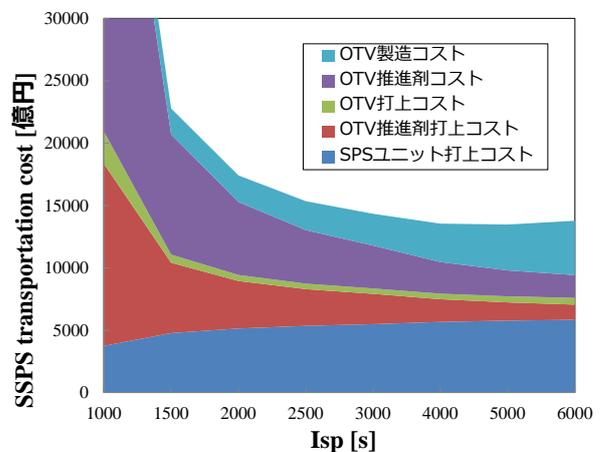
項目	値
SSPS 質量	10000 ton / 1GW
SSPS ユニット質量	54.4 ton / 73.3 MW
軌道移行 ΔV	6.1 km/s (LEO: 300 km, $i=30^\circ$)
往路電力 復路電力	1000 kW (=500 kW + 500 kW (SSPS)) 500 kW
スラスタ出力	100 kW
スラスタ個数	20 個 (往路 20 個、復路 10 個使用)
ミッション期間	輸送期間 10 年、使用期間 30 年
南北制御 ΔV_{NSSK}	50 m/s/year

第2表 計算パラメータ

項目	値	
OTV	推進剤	アルゴン単価 \$5/kg キセノン単価 \$1000/kg
	推進系	比質量 7 kg/kW 推進効率 $\eta = 0.3$ (推進剤アルゴン) 推進効率 $\eta = 0.5$ (推進剤キセノン) 初期製造コスト 11.18 億円
	構造系	構造係数 $\epsilon = 0.3$ 質量当たりの単価 0.2 億円/ton
GLV	LEO 投入	95 億円/54.4 ton (Falcon Heavy)
	GEO 投入	95 億円/11.1 ton (Falcon Heavy)



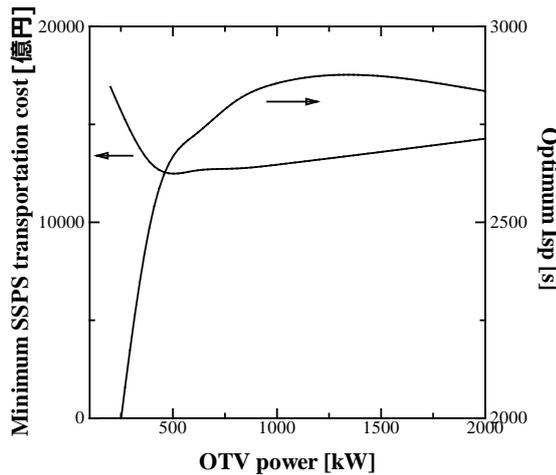
第3図 SSPS 輸送コスト（推進剤アルゴン）。



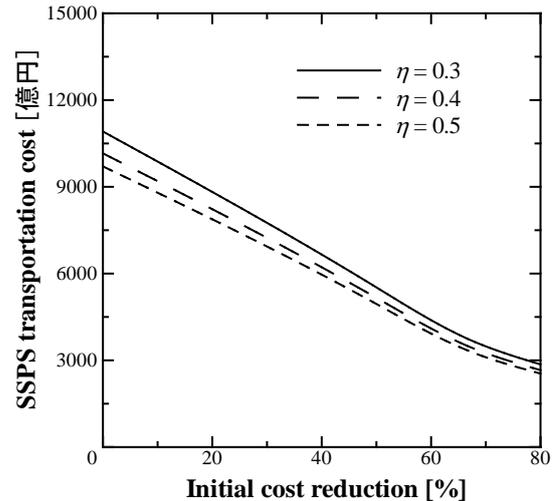
第4図 SSPS 輸送コスト（推進剤キセノン）。

第3表 感度係数 (単位は億円/パラメータ変化率(%), 2桁のインパクトのあるものには下線を引いている)

	項目		Total	SSPS unit launch	OTV propellant launch	OTV launch	OTV propellant	OTV construction
	OTV	推進剤	単価	0.2	0	-0.1	0	0.2
推進系		比質量	9.0	-0.7	-0.1	2.7	0	6.9
		推進効率	<u>-38.8</u>	3.9	-9.7	-4.4	-0.1	<u>-28.5</u>
		初期製造コスト	<u>40.9</u>	-3.0	<u>10.8</u>	0	0.1	<u>33.1</u>
構造系		構造係数	<u>16.3</u>	1.5	-9.9	4.7	0	20.1
	単位質量価格	1.7	-0.1	0.5	0	0	1.3	
GLV	LEO投入	打ち上げコスト	<u>86.6</u>	<u>57.0</u>	<u>15.0</u>	5.0	-0.1	9.3
	射点	緯度	<u>30.6</u>	-1.9	3.7	3.5	0.1	<u>25.0</u>



第5図 OTVの電気推進機の出力レベルとSSPSの最小輸送コストおよび最適な比推力。



第6図 初期コスト削減率とSSPS輸送コスト。

ば無視できることも分かる。

なお、第3図においてSSPSユニットの投入量の合計値が10000 tonであるにも関わらず、SSPSユニットの打ち上げコストが比推力とともに微増しているのは、GEOまでの飛行時間が長くなるために放射線劣化が進んでSSPSユニットの発電量が減少するために、その目減り分を余分に輸送する必要が生じるからである。

推進剤の違いが与える影響を評価するために、推進剤をアルゴンからキセノンに変えた場合の計算結果を第4図に示す。ホールスラストの推進効率は、一般にキセノンを推進剤とする方が高いが、その効果は推進剤のコストの増加により相殺され、SSPSの輸送コストは全体として大きく増加する結果となった。特に推進剤が多く必要とされる比推力の低い領域で推進剤コストが大きく増加しており、比推力3000 sでは全体コストの約23%をキセノンのコストが占めている。また、SSPSの輸送コストが最小となる比推力は推進剤のコストが相対的に小さくなる高比推力側に移動し、最小の輸送コストは比推力4690 s付近の約1.35兆円であった。

なお、キセノンの世界生産量は現在年間53 ton程度であり⁹⁾、比推力4690 sにおいて必要とされるキセノンの総質量は約2095 ton(年間210 ton)であることから、資源量の点からもキセノンを推進剤として用いることは困難である。また、キセノンの価格も過去10年間で\$1000~\$6000/kgと大きく変動しており、仮に高騰した価格の\$6000/kgで見積もった場合、SSPSの輸送コストの最小値は2.01兆円(最適な比推力は約8960 s)となってコスト的に成立しない上、比推力もホールスラストのノミナルな作動域からは大きく外れることとなる。キセノンの他にクリプトンを推進剤とすることもできるが、アルゴンほど安価ではないため、

SSPS輸送のための電気推進の推進剤としてはアルゴンが事実上唯一の選択肢となる。

3.3 求められる電気推進の出力レンジ 前節の結果からOTVに用いる電気推進としては、アルゴンを推進剤とするホールスラストが事実上の選択肢であることが分かった。そこで、OTVに必要とされる電気推進の出力レンジと比推力を明らかにするための評価を行った。

第5図にOTVの電気推進の出力と最小の輸送コストおよび比推力を示す。電気推進の出力が低い場合には最適な比推力も低くなり輸送コストも大きい。出力が大きくなるにつれて輸送コストも低下し一旦最小値を取る。電気推進の出力がさらに大きくなるとSSPSの輸送コストは徐々に増えていくが、最適な比推力は2500 sから2700 sの範囲である。SSPSの輸送コストの最小値は出力が646 kWで1.26兆円であり、そのときの比推力は2752 sであった。

3.4 感度係数と方針 第1表と第2表の設定パラメータに対してSSPSの輸送コストに与えるインパクトを感度係数(1%のパラメータ変化に対する輸送コスト変化)の形で評価したものを第3表に示す。2桁の感度を有するものには下線を引いた。また、内訳として各コスト構成要素の寄与分も併せて示している。

第3表から、電気推進機の初期製造コストを削減することと電気推進の推進効率を向上させることがSSPSの輸送コストの削減にインパクトがあることが分かる。これはOTVの建造コストを下げるができるからである。電気推進の初期製造コストと下げるとOTVの製造コストが下がるのは明らかであるが、電気推進の推進効率を向上させ

ると OTV の建造コストが下がる理由は、推力が増えることで OTV の飛行時間が短くなり、OTV の数を減らすことができるからである。

なお、第 3 表において、最も SSPS の輸送コストの削減にインパクトがあったのは GLV の打ち上げコストであり、射点の緯度も無視できない要因になることも判明した。内訳を見ると、射点の緯度の変化は OTV の建造コストに最も影響を与えているが、緯度が大きいと軌道面変更のための ΔV が大きくなって OTV の飛行時間が長くなり、OTV の数を増やして輸送能力を確保する必要が生じるからである。一方で、OTV の推進剤であるアルゴンの価格や OTV の構造系の単位質量価格が SSPS の輸送コストに与えるインパクトは相対的に小さい。

3.5 求められる技術革新 第 3 表の感度解析の結果から、SSPS の輸送コストに大きく影響を与えるものとして、OTV 推進系の推進効率、OTV の初期建造コスト、GLV による打ち上げコスト、射点の緯度があげられる。この結果から、SSPS の輸送コストの低減に必要な技術革新を求め、輸送コストを 3000 億円とする条件を求めていく。

射点を赤道に移すこととし、GLV と OTV の初期製造コストを一律に削減した場合の SSPS の最小輸送コストを初期コストの削減率の関数として求めたものを第 6 図に示す。推進効率 0.3, 0.4, 0.5 に対して求めたもので、電力と比推力について最適化を行ったものである。推進効率が大きくなると輸送コストも低くなるが、輸送コストに大きく影響を与えるのは初期製造コストの削減率であり、SSPS の輸送コストが 3000 億円を下回るのは、削減率が 75% を超えたあたりである。これは一段目の再利用技術の確立などで実現が視野に入る範囲である。

なお、GLV のコスト削減のみで SSPS の輸送コストを 3000 億円にするには、GLV の初期製造コストを 85% 程度まで下げる必要がある。これは OTV を用いる場合よりもさらに初期製造コストを半減させることを意味しており、より大きなコスト削減が要求される。

4. ま と め

大出力電気推進を用いた OTV によって SSPS を輸送するシナリオに基づいて、SSPS の輸送に必要なコストの評価を行った。得られた結果は以下の通りである。

①完全再使用 OTV システムの利用により、GLV 単独で

投入するよりも約 4 割低いコストで SSPS の輸送が可能である。現状技術とその延長から予測される 10000 ton クラスの SSPS の輸送コストは 1.27 兆円である。

②キセノンでは、推進剤コストが大きくなることと、現在の世界的生産量では必要な消費量を賄えないため、アルゴン推進剤としたホールスラスタが SSPS の輸送には適している。SSPS の最小輸送コストはホールスラスタの電力レベルによるが、比推力が 2500~3000 s で実現できる。

③ SSPS の輸送コストを 3000 億円に押さえるためには、GLV と OTV の初期建造コストをそれぞれ約 75% 下げる必要がある、GLV の輸送のみでそれを実現するには更にコストを半分にする必要がある。

参 考 文 献

- 1) Glaser, P. E.: Power from the Sun: Its Future, *Science*, **162** (1968) Issue 3856, pp.857-861.
- 2) 経済産業省・資源エネルギー庁: 平成 27 年度エネルギーに関する年次報告, 2016.
- 3) 経済産業省・資源エネルギー庁: 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, 2016 5 月 11 日.
- 4) 齊藤由佳, 長山博幸, 松岡巖, 森雅裕: JAXA SSPS コストモデルによる宇宙太陽光利用システムの経済性評価, 第 49 回宇宙科学技術連合講演会講演集, 1D06, 49 (2005), pp.213-217.
- 5) Ito, Y., Nakano, M., T. Schonherr, T., Cho, S., Komurasaki, K. and Koizumi, H.: Cost Evaluation of In-Space Transportation of a Solar Power Satellite Using OTVs with Hall Thruster Propulsion Systems, *Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Aerospace Technology Japan*, **12** (2014), No. ists29, p. Po_1_7-Po_1_12.
- 6) Edelbaum, T., N.: Propulsion Requirements for Controllable Satellites, *ARS Journal*, **31** (1961), pp.1079-1089.
- 7) Hofer, R., R. and Randolph, T., M.: Mass and Cost Model for Selecting Thruster Size in Electric Propulsion Systems, *Journal of Propulsion and Power*, **29**(2013), pp. 166-177.
- 8) Wright, T., P.: Factors Affecting the Cost of Airplanes, *Journal of Aeronautical Sciences*, **3**(1936), pp.122-128.
- 9) Herman, D., A. and Unfried, K. G.: Xenon Acquisition Strategies for High-Power Electric Propulsion NASA Missions, Present at 7th Spacecraft Propulsion Subcommittee (SPS) of the 62nd JANNAF Propulsion Meeting (JPM), Nashville TN, Jun 3, 2015.

(2016.10.1 受付)