

## 実現性から見た太陽発電衛星(SPS)の軌道の選択に関するクリティカル・レビュー

長友信人、宇宙科学研究所  
E-mail: nagatomo@newslan.isas.ac.jp  
Fax: 042-759-8464

### 序

ピーター・グレーザーは静止衛星軌道に太陽発電衛星を設置する事を提唱し、米エネルギー省はこの考え方に従ってアメリカの21世紀の電力をSPSで供給するリファレンスシステムを概念設計した。その後、いろいろな低高度軌道や月面を宇宙太陽発電所として使うアイデアが出てきた。

これまでに発表された太陽発電衛星(SPS)に関する論文は、個々の技術、システム構成、経済性を含み再生可能エネルギーとしての特性等々、広範囲にわたって一見とりとめがない。その根本的な理由は「発電衛星がまだ存在したことがない」ことにあると思われる。そこで、ある人は実現するための技術を論じ、ある人は実現の必要性を論じ、ある人は実現できるシステムを提案し、ある人は実現した場合の効果論を論じる。

しかし、評価基準がなければ、どの議論もごもつともで終わってしまうのが現状である。そこで、ここでは「実現性から見た」という条件を付けたが、「宇宙で発電したエネルギーを電波で地上に送る」原理は太陽電池を使う通信衛星では実現しており、グレーザーのアイデア自体がこれに基づいているから、この程度の実現性ではない。現在、問題とすべき「実現性」はシステム設計まで必要とする、より現実的、社会的な実現性とでも言うべきもので、エジソンが電気事業を興した程度の具体性がが必要である。

そこでここでの実現性とは「電力事業として魅力のある低コストと電力消費者にとっての便利さ」とでも表現すべきであろう。

### 宇宙計画における軌道の選択

宇宙計画では軌道計画は飛行計画の基本部分である。ミッション（あるいは用途）に応じて適当な軌道を選択して、行き先に到着する飛行計画を作成する。行き先は月や火星のような具体的な場所のこともあるが、地上向けサービスや宇宙環境の利用のためには地球を周回する衛星軌道が行き先である。

数多くの衛星が打ち上げられた経験から、有用な衛星軌道は限定されてきた。宇宙環境を利用するミッションは低高度軌道を選び、輸送費の安上がりを目指す。少ない個数で集中的な機能を持った大型の地球観測や通信放送衛星などは静止衛星軌道を使い、周期的な地球観測には太陽同期軌道を利用する。多数の衛星システムであるGPSや通信衛星は中間の軌道を使うといった具合である。

しかし、発電衛星についてはここでも考えが定まらない。発電所の建設に当たっては立地条件が最重要であるが、発電衛星の立地条件ともいべき軌道に関しては、余り真剣な検討が行われていない。たとえば、地球が真球でないためにケプラーの法則で決定される衛星軌道は時間と共に変化し、実際の軌道の選択ではこの点を考慮したり、変化することを利用しているが、発電衛星の検討に当たっては少なくとも以下に述べる程度の基本的な軌道運動の特性を考慮した軌道の選択理由が必要である。

### 地球の衛星軌道の特性（文献1より）

地球の公転面と赤道面を基準として衛星軌道の形状から向きまで決定する要素が軌道6要素である。

- 1) まず、軌道の楕円の形状を決めるのが、長軸の長さ(2a)と離心率(e)である。楕円の焦点は地球の中心にあるので軌道面は中心を含む。
- 2) 赤道面を衛星が南から北に通過する点を昇交点と称し、昇交点の東側の赤道面と昇交点から上がっていく側の軌道面がなす角が軌道傾斜角(i)で、赤道と軌道面が交差する線の

地球中心から昇交点の方向の線が春分線（春分の日に地球から太陽を見る線）となす角が昇交点経度( $\Omega$ )である。これで軌道面の向きが決まる。

3) 昇交点から軌道面内を衛星の運動方向に計った近地点の位置が近地点引数( $\omega$ )である。これによって軌道面内に楕円を置く向きが決まる。

4) これに近地点を通過する時刻( $t$ )を与えると、運動が決まる。

以上の括弧内の記号で示したのが軌道6要素である。

地球は大気がある。また地球が真球でないためと、太陽や月など他の天体の作用を受けるので軌道6要素の数値は時間と共に変化する。大気と他の天体の影響を無視した場合、楕円の形と軌道傾斜角は変化しないが、昇交点経度( $\Omega$ )と近地点引数( $\omega$ )は時間と共に変化する。その関係式は；

$$d\Omega/dt = C(2 - 2.5 \sin^2 i)/(1 - e^2)^2 \quad \text{-----} \quad (1)$$

$$d\omega/dt = C \cdot \cos i / (1 - e^2)^2 \quad \text{-----} \quad (2)$$

ここで、Cは一つの軌道では一定値で、軌道は低いほど大きい傾向がある。この式からこれらの要素の変化率は軌道傾斜角*i*に左右されることが分かる。ただし、先に述べたように軌道傾斜角は一度衛星を打ち上げた後は一定であるから、これらの変化率の変化は主として空気抵抗による高度の変化によって引き起こされる。

### これまでに検討された発電衛星システムの軌道

発電衛星は地上の社会が利用するという意味で、これらの衛星軌道はどれでも原理的には使用できる。しかし本題では実現性のあるシステムを考えるので、原理だけでは意味がない。これまでに発表された発電衛星ではどの程度この点に配慮されているかを振り返ってみる。

これまでに検討されたシステム（文献2）を軌道別にまとめたのが表1である。

表1 これまでに検討されたシステムの特性

軌道	送電方法	電力	目的
静止衛星(GEO)	2.45 GHz	5 GW	一般電力
静止衛星と低軌道衛星の組み合わせ モルニヤ型軌道			
太陽同期軌道	2.45 GHz		
赤道上低高度軌道	2.45 GHz	10 MW	電力デモ
月	- GHz		
宇宙ステーション	24, 35 GHz		宇宙実験用電力

静止衛星(GEO)については改めていうまでもないが、赤道上にあって高度は約 36,000 km の円軌道で、月ほどではないが比較的遠距離である。ここに打ち上げられた衛星は地上からは天空に静止して見える。逆に衛星からは地球が静止して見える。このため地球を観測したり、地上で利用する通信や放送の中継局として利用されている。ここにおいた発電所はこれらの衛星と同じように制御すれば、地上の受電所に一定方向に電力を送ることが出来る。必要な制御としては、地球が真球ではないためにこの軌道上の物体はインド洋上の安定点に移動する特性があるのでロケットによる位置の制御、およびリファレンスシステムのような大きな構造物を太陽指向姿勢に保つための重力傾斜力に抗した制御である。これらはリファレンスシステムの隠された難点であった。また、この軌道は利用者が多く、現在すでに衛星数が飽和状態にある軌道である。

「静止衛星と低軌道衛星の組み合わせ」は大型の発電衛星は打ち上げの都合上低高度軌道に、

一方ここからの電力を受けて地上の受電所に送る、一種の中継局を静止衛星軌道に設置するというものである。実現性からいえば、どちらかの衛星が出来てからということになる。

「モルニヤ型軌道」は旧ソ連時代から極地に近い広大な国土で使用する通信衛星システムのために利用されているモルニヤ衛星が使っている軌道である。大きな軌道傾斜角で、北の上空に近地点を持つ軌道は長時間ロシアの領土から可視になる特徴があるが、(1) 式で

$$\sin^2 i = 0.8, i = 63.5^\circ$$

であれば、 $\omega = 0$ 、すなわち、近点離角を一定に保つ事が出来る。問題は大型の構造物を持つ発電所は近地点付近で発生する重力傾斜力に耐えることが必要であり、地上への電力伝送のためには通信よりはるかに精度の高い姿勢制御が必要となり、地上ではこれを追跡するアンテナが必要となる。

「太陽同期軌道」は軌道面が公転軌道と同じ軌道、すなわち(2) 式により、

$$\Omega = -2\pi / 365.25$$

になるような  $C$  と  $i$  の組み合わせで、低高度軌道では軌道傾斜角が 100 度位の軌道で実現できる。この軌道から地上を見ると日照条件が毎日同じであることから地球観測衛星に使われる。極軌道に近く地球のほぼ全域をカバーするので地球観測には都合がよいが、逆に発電衛星の軌道としては受電所を絞りきれないので、実験目的となろう。

「赤道上低高度軌道」は同一地域の上空を每周回通過する唯一の低高度軌道である。サービスエリアは赤道地帯に限られるので、計画全体にこの点の工夫が必要になる。ロケットの打ち上げの条件は最も恵まれていると言える。

月面上の太陽発電所から電力送電する案は、現地での材料調達など他の軌道では考えられないリソースがある。距離は 38 万 km と静止衛星よりさらに一桁離れているのが短所である。地球環境を考えた再生可能エネルギーという大きな立場から見れば、月より他の軌道が優れているという理由はない。

「宇宙ステーション」とあるのは、かつて宇宙ステーションのミッションとして太陽発電衛星技術の研究開発を実験テーマとして提案した時代があった。筆者はその推進者の一人であったが、現在は宇宙ステーションの役割や運用上の特性が発電衛星の技術開発の場としてふさわしいものかどうかという点を考えている。宇宙ステーションで行った実験が発電衛星に使えるとは思えないし、高価な宇宙ステーションでの実験が安くてクリーンなエネルギーの宣伝になるとも思われない。ついでであるが、宇宙ステーションの軌道でフリーフライヤーと編隊飛行を行うためには空気抵抗の大ききで決まる弾道係数を合わせたり、宇宙ステーションの軌道が制御されている場合は、それと同じ制御をフリーフライヤーで行うなどの対策をとらないと毎日のように距離が変化する。

## 電力事業と軌道の選択

実現性をより具体的に考えなければならないのは、これを事業として実現する姿勢である。そこで電力事業の観点から軌道の特性を調べてみる。

経済活動としての電力事業は、必要な電力設備の製作のための投資と運用開始後の諸経費が支出が必要で、これを一定期間の電力の売却によって得られる収入で回収すると考える。

- 1) 常識的な発電所の建設コストはキロワット当たり 30 万円位である。
- 2) 運用開始後の経費はよく分からないが、一例を挙げれば、1000 kW の試験用太陽光発電所の場合、太陽電池の劣化や破損は放置し、運転保守要員は 0.5 名でも採算が合わないという話であった。また、最新の 100 万 kW 級の火力発電所の運転要員は常時 3 名程度と聞いている。
- 3) 「一定期間」というのは経済活動では非常に重要で、システム全体のリスクの評価が

関係してくる。太陽発電衛星に対する最も重大な疑問はその財産としての保全性であろう。

発電衛星による電力は、先ず地上の太陽光発電を目標にするであろう。それはコストとの点で必ずしも現在の電力事業を代表するものではないが、それでも建設費と運用費はともに現在の宇宙システムとは全く桁違いの違った物差しで測らなければならない。ここでは詳しいことは論じられないが、このことを念頭に置いて軌道の選択が諸経費におよぼす影響の主な因子を4つ取り上げる。すなわち、

- ・ 高度 : 輸送、送電、環境リスク、軌道維持
- ・ 重力傾斜力 : 建設方法、姿勢維持
- ・ 追尾速度と可視時間 : 技術
- ・ 可視の頻度と定常さ : 有用性

である。

「高度」は地球の資源で発電衛星を作るときは最も大きなコストへの影響がある。それは、ロケットの打ち上げ能力を思い出すと明らかで、高い軌道は輸送量が減るので輸送費は高くなる。加えて、次の例で示されるように、同じ送電方式であれば電力伝送のシステムはより大規模となる。送受電アンテナをリファレンスシステムと同じ条件で設計すると次の式が成り立つ；

$$f \cdot D_t \cdot D_r = 0.684 D$$

(ただし、 $f$  は周波数 (単位 MHz)。 $D_t$ 、 $D_r$  はそれぞれ送電と受電アンテナの直径、 $D$  は送受電アンテナ間の距離で、単位はいずれもキロメートル。)

この相乗作用で建設コストは高度と共に加速度的に増加する。高度はまた、スペースデブリと宇宙放射線のリスクに関係する (図は省略)。軌道の維持は、システムの方式によって要不要があると思われるが、必要な場合は推進システムが不可欠である。

「重力傾斜力」は高度と共に減少する。その傾向は、質量 $m$ の2つの質点が機械的に連結された剛体として、重力加速度と半径がそれぞれ $g_0$ および $R$ である地球の中心からの距離が $r$ の円軌道を運動するとき、各質点の地球中心からの距離の差が $2dr$ であれば、地球から遠い方の質点には軌道の外向きに、同様に近い方の質点にはうち向きにそれぞれ、 $m g_0 \cdot R^2 (dr/r^3)$ の力が作用することから、距離の3乗に反比例する事が分かる (図は省略)。これは静止衛星軌道くらい離れていれば小さいようであるが、リファレンスシステムの例が示すように大きさが数キロメートルのシステムではこれに抗して姿勢制御を行うためには相当大がかりな規模になることを覚悟する必要がある。建設段階ではこれを有効に利用する方法を考えなければならないだろう。

「追尾速度と可視時間」は静止衛星以外の軌道ではすべて問題となる。この場合、具体的なユーザーへのサービスが仮定する事によって、これを技術的に実現できるかどうかの問題となり、これを検討すればコストの評価が可能になるという性質のものであろう。

「可視の頻度と定常さ」は地上のユーザーが満足すべきものでなければならないので、軌道の選択では最も優先的に取り上げるべき条件である。しかし、静止衛星以外の軌道では単独の発電衛星が常時電力を供給する事は出来ないで、初期の発電衛星の実現性を考えると非定常的な電力供給に満足するユーザーを捜す必要がある。その手順は「追尾速度と可視時間」の場合と同様であろう。

以上の点を考慮しつつ過去の検討事例を調べてみたが、研究用というユーザー以外の電力需要者の意向を配慮した検討はなされていなかった。ひいき目になるが、SPS 2000 をベースにした赤道直下の国々を訪問してレクテナを設置する可能性を検討している研究がその数少ない実例であろう。

## 結論

以上、簡単に発電衛星の軌道の特性について整理し、これまでの発電衛星の検討例の中から軌道の選択に関する部分を取り上げて比較した。その結果、凡そ次のことが判明した。

- 1.軌道は基本的な設計要素であるが余り考慮されていない。
- 2.実現性を考えると、軌道の選択基準は
  - 1) 電力消費者の要求
  - 2) 既存の電気通信と地球観測衛星軌道の制約に従わなければならない。
- 3.これらを満足する軌道の選択は今後の検討課題である。

#### 参考文献

1. 竹内端夫、「人工衛星の力学」、前田・永田・畑中編「宇宙空間の科学」白桃書房刊の第3章、第1節、1960年。
2. 長友信人、「太陽発電衛星のコンセプト」SPS ニュース No. 6 1994. 3/4, pp. 10-16.  
(表1の各システムに関する文献はこの記事の末尾にあります。必要な方は本研究会事務局にお問い合わせ下さい。)