

## SPS demonstrator with Molniya orbit\*

Kozo Hashimoto (Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University)

A plan to put a 1.2 megawatt solar power satellite in orbit by 2010 and an eight megawatt operation scheduled for 2012 has been proposed by a company. It says that the test satellite will be situated in a low 'Molniya' orbit and will pass over a number of islands during a daily cycle. They are talking to the government of Palau. Molniya orbits are reviewed and some Molniya orbits with periods of 6 or 8 hours are good for the power transmission due to lower altitudes. Merits for equatorial islands, however, cannot be understood.

---

\*Presented at the Eleventh SPS Symposium, 17-18 September, 2008

# モルニア軌道によるSPSデモンストレーターについて\*

橋本弘藏 (京大大学生存圏研究所)

## 1. はじめに

SPS 研究会の代表幹事でおられた松岡秀雄先生から、モルニア軌道を使った SPS ビジネスの話[1]がある。以前に長友先生が種々の軌道に対する SPS について調べられているが[2]、モルニア軌道については、調べられていないので、調べて研究会で話しませんかとのこと依頼を受けた。これに基づいて調査した結果について述べる。

## 2. 人工衛星の軌道要素と摂動

長友先生は文献[2]で、静止軌道の他に、太陽同期、位相同期低高度軌道、赤道低高度軌道について検討され、月面やモルニア軌道は発電衛星の設計上特異であるとして、除外されている。まず、これらの人工衛星の軌道を理解するために、簡単にその摂動を示す。 $i, e, \Omega, \omega$  をそれぞれ軌道傾斜角、離心率、昇交点赤径、近地点引数とし、詳細は略すが  $C$  を地球の扁平度を考慮した時の定数とすると、昇交点赤径および近地点引数の時間変化は下の式で示される。参考のために、図 1 に人工衛星の軌道要素の説明を示す[3]。

$$\frac{d\Omega}{dt} = \frac{C \cos i}{(1-e^2)^2}$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{C(2-2.5\sin^2 i)}{(1-e^2)^2}$$

$$C = 3J_2 n_0 / (2\rho^2)$$

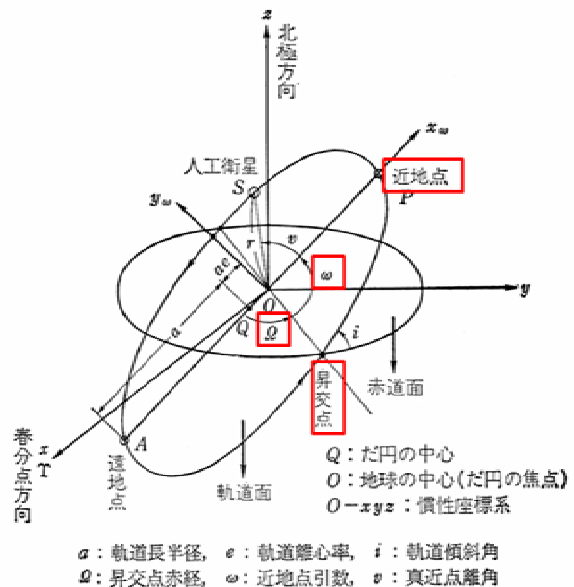


図 1 人工衛星の軌道要素

これらの軌道の特性と長友先生のコメントを簡単に示しておく。

1) 静止軌道は地球の蝕以外は一つのレクテナで常時受電できるが、送電距離が長いのでシステムが大がかりとなる。

注\*第11回SPSシンポジウム，慶応大学にて2008年9月17,18日開催

2) 太陽同期軌道は、 $d\Omega/dt=2\pi/365.256$  (/日) にすると、昇交点の移動速度が地球の公転に一致し、軌道面と太陽の方向が一定となる。衛星が常時日光を受け、毎日同じ地点の上空を同じ時刻に通過する軌道が選べる。1日1回2分間ほど受電できる。

3) 同期軌道は1日に地球を1周して同一地点へ戻る軌道である。太陽同期と同様に毎日昼間に1回受電できるが、地球の影の部分では受電できない。

4) 赤道上低高度軌道は、日陰の影響が最も大きい。赤道上のレクテナに每周回時に送電できる利点がある。高度1000kmの場合、113分間隔で3分間送電できる。500kmでの検討例を後で示す。

4) モルニア軌道は $d\omega/dt=0$  すなわち軌道面傾斜角 $i=63.4$ 度 ( $\sin^2 i=0.8$ ) としたものである。近地点引数が一定となるので、遠地点を高緯度地方の高高度に維持することが出来る。ケプラーの第2法則(面積速度一定)により、遠地点に衛星がある時間が長いので、高緯度地方の天頂方向に長時間見える。高緯度地方では静止衛星は仰角が低いか見えないので、考え出された軌道である。次節で検討する。

### 3. モルニア軌道の検討

衛星通信などに用いられる通常のもルニア軌道は、遠地点高度40,080km、周期12時間の軌道である。この軌道で4つの衛星を上げるとヨーロッパの高緯度地方では、仰角60-70°以上でどれかの衛星が見える。しかし、静止軌道よりも遠く、SPSにとって魅力のあるものではない。しかし、周期を8時間あるいは6時間として高度を下げるとSPSにとって検討の価値があるものとなる。NASDAのSSPS委員会の報告[4]に示されているので、以下に示す。

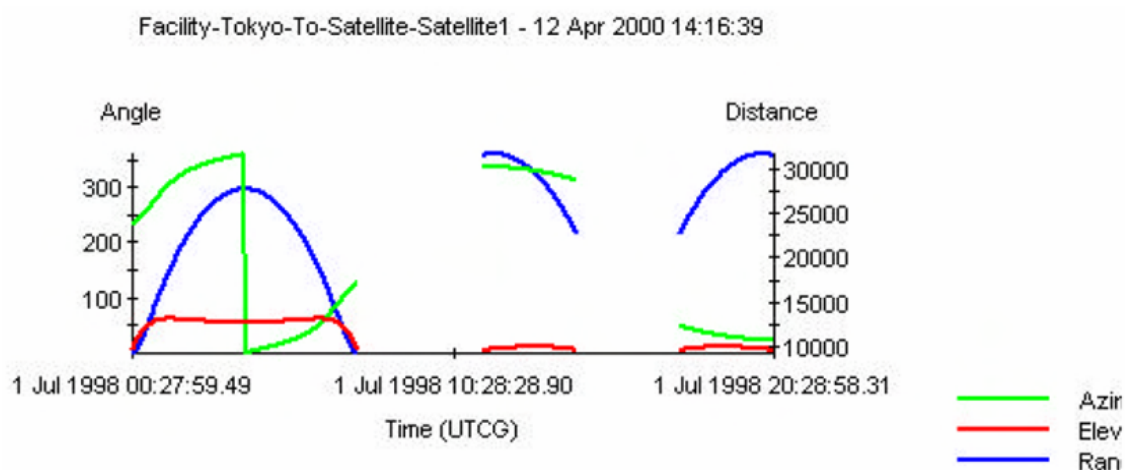


図2 8時間周期のモルニア軌道の可視中の方位角、仰角、直距離[4]

受電点を東京とした8時間周期のモルニア軌道の可視中の方位角、仰角、直距離(slant range)を図2に示す。仰角50度以上で6時間以上も見える。この時の衛星の距離

は約 12,000km から 28,000km である。周期を 6 時間とすると、仰角 50 度以上で 3 時間程度見え、この時の衛星の距離は約 15,000km から 21,000km である。周期を通常の 12 時間とすると仰角 50 度以上で 11 時間程度見えるが、この時の衛星の距離は約 10,000 から 40,000km であるが、6 時間以上にわたって 30,000km 以上である。一方、静止軌道の場合、東京からは仰角 49 度で距離は 37,000km である。

高度 1000km の赤道軌道である SPS2000 で赤道で受電した場合[5]、1 回当たり 202 秒、1 日 8.4 回で、合計 20 分となる。高度を 500km に下げ、北緯 1.85 度のクリスマス島で受信した場合の仰角と距離の計算例を図 3 に示す[6]。仰角が 40 度以上になるのは 2.5 分程度のみで、距離は 500 から 1,000km になる。

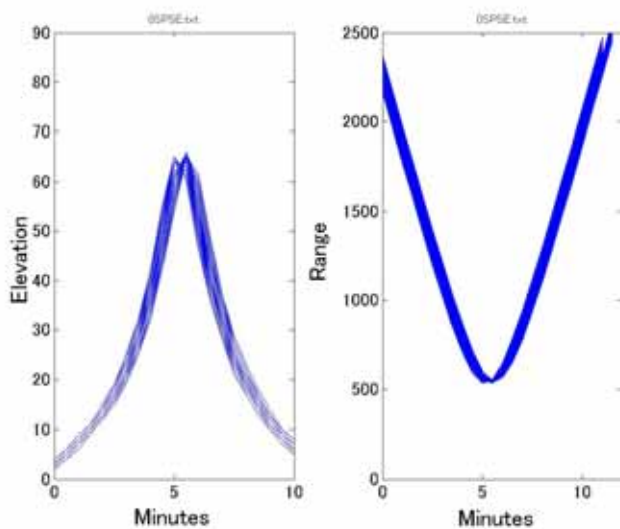


図 3 高度 500km の赤道軌道の場合の仰角、直距離[6]

#### 4. 受電量の検討

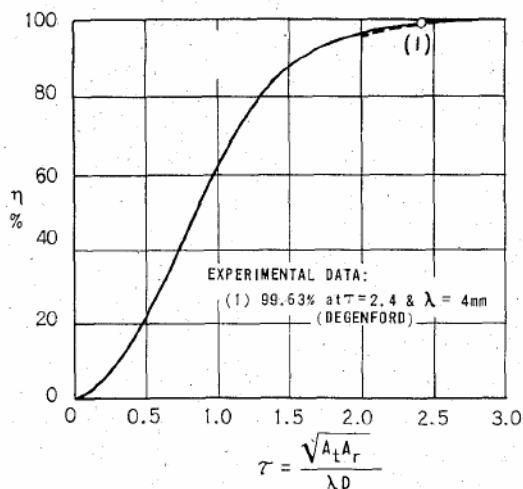


図 4 アンテナ面積、波長、伝送距離と収集効率[7]

送受電アンテナ面積、波長、伝送距離と収集効率の関係を図4に示す[7]。最初にSPS2000における受電量の計算を行なう。送電アンテナ径150m、受電アンテナ径2kmとなっており、最短距離の1100kmで周波数2.5GHzの場合、 $\tau=1.78$ となるので、収集効率 $\eta=96\%$ となる。同じ条件で、伝送距離が上述のように1.5万、2万、3万、4万kmと長くなった場合、それぞれ $\tau$ は0.13、0.098、0.065、0.049となり、効率 $\eta$ はそれぞれ1.7%、0.96%、0.43%、0.24%となる。このように $\tau$ が小さい場合は $\eta \approx \tau^2$ となり、 $\tau^2$ は受電電力と送電電力の比に等しく、フリスの公式が成り立つ。送電電力をSPS2000同様10MWとした場合は、それぞれ169kW、96kW、43kW、24kWとなる。モルニア軌道の場合は、受電電力は少ないが衛星の見える時間が長く、電力量は多くなる。

静止軌道でない場合、衛星の距離や方向が変化するので、レクテナへの入力電力も変化する。一方、レクテナの効率は入力電力に依存するため、最大出力を得るためのレクテナの接続法は重要な問題となる。

#### 5. A low Molniya orbit test satellite

これからが本題のモルニア軌道によるSPSデモンストレータである[1]。Kevin Reed (Welsom Space Powerの最高マーケティング責任者)は、2012年の8MW運用を目指し、2010年までに軌道に1.2MWの衛星を軌道に投入したいと述べた。私たちの小型版薄膜太陽電池アレイは、スペースで最初にテストされるであろうと言っている。私たちはサービスのための試験区域としてヘレン島をパラオの政府に提案している。それは熱に非常に敏感な珊瑚礁の隣りに位置しており、それは優れた試験区域である。試験衛星は低高度のモルニア軌道で、毎日のサイクル中に多くの島を通る。計画では、ヘレン島の上の地上電力網につながれ、さらに大衆に配られた1000の携帯型充電器に接続された基地局を設置する予定である。それらは、携帯電話またはラップトップに動力を供給するために使用することができ、要求される電力はわずか2ワット程度であるとReed氏が述べています。ただ、軌道面傾斜角63.4度の軌道で赤道域に送電する理由やa low 'Molniya' orbitとlowを付けている理由が著者には理解できていない。

#### 4. むすび

モルニア軌道は、通常の12時間周期ではなく、6あるいは8時間周期の軌道だと距離が1.5-3万km程度で、高高度で長時間見えるのが特長である。受電できる電力は少ないが、電力量は多く、出力も比較的安定している。一方、高緯度向きと考えられるモルニア軌道が低高度で、赤道域に電力を送る計画が進んでいるようであるが、モルニア軌道を使う理由はよく分からない。

最後に、情報を頂いた松岡秀雄先生に謝意を表します。

#### 参考文献

- [1] <http://www.vnunet.com/business-green/analysis/2202907/space-solar-power-closer-think>
- [2] 長友信人, 宇宙電力の需要推測:宇宙電力ビジネスのガイドライン作成に向けて,第8回 SPS シンポジウム,2005年9月
- [3] 古濱、岡本、増子、人工衛星によるマイクロ波リモートセンシング、電子情報通信学会、1986
- [4] 宇宙太陽発電システムの研究、三菱総合研究所、2000年2月
- [5] 太陽発電衛星ワーキンググループ、SPS2000 概念計画書、宇宙科学研究所、1993
- [6] 宇宙太陽発電システムの研究、三菱総合研究所、2002年2月
- [7] W. C. Brown, Beamed microwave power transmission and its application to space, IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 40, no. 6, 1239-1250, 1992.