

Future Evolution of a Low Equatorial Orbit SPS Operational Demonstrator

Patrick Collins¹ and Hideo Matsuoka²

¹Azabu University, Sagamihara City, E-mail: collins@azabu-u.ac.jp

²Teikyo University, Hachioji City, E-mail: matsuoka@main.teikyo-u.ac.jp

The paper discusses the potential advantages of operating a microwave power-generating solar power satellite (SPS) demonstrator in low equatorial orbit. This system avoids the major problem faced by inclined-orbit LEO systems because the satellites would revisit each rectenna on every orbit - approximately every 2 hours instead of every 2 days (ie 24 times more frequently). Moreover, progressive expansion of the system through addition of satellites, and/or using larger satellites in progressively higher equatorial orbits, with the result that each rectenna could receive more energy more often and for longer on each occasion, could continue all the way up to geo-stationary orbit systems.

For a given antenna technology, the range of latitudes to which a low-orbit satellite can deliver power depends on its altitude. Solar power satellites operating at progressively higher altitudes can deliver power to cities at progressively higher latitudes, representing an ever larger market: within 24 degrees of the equator there are cities with total population of some 200 million. If their demand for electricity grows to the level in developed countries, the potential demand is 200 GW, which could grow to 300 GW in a few decades with continuing growth of the cities' populations.

For the first phase, in which only rectennas within 3 degrees of the equator could receive power from a satellite at 1,100 km altitude, the authors visited 12 candidate countries where many millions of people living near the equator have no electricity supply, and little prospect of improvement in the near future. The authors found strong support in each country for participating in an equatorial-orbit, SPS operational demonstrator system.

Japan would also benefit from improving diplomatic, economic and technological cooperation with the range of equatorial countries, many of which are rich in natural resources which Japan lacks. In summary, the multiple advantages of an equatorial-orbit system compare well with three recent proposals for SPS demonstrators in geo-stationary orbit, Molniya orbit, and inclined low orbit respectively: these all have disadvantages in cost, cost-benefit or expandability.

An international conference to discuss an equatorial orbit system is recommended, for which the Malaysian government has offered a venue in Kuala Lumpur. Such a first meeting of representatives from equatorial countries and space-faring countries could establish Working Groups to preparing joint positions on SPS in general, SPS demonstrators, technical issues concerning rectenna design and operation, RF frequencies to be used, planned power density levels, cooperation with neighbouring countries, and other matters. If negotiations were successful, these could become the basis for forming an alliance of participating countries, the International Alliance for Energy from Space (IAES).

赤道上低軌道の太陽発電衛星システムの進展について

パトリック・コリンズ、麻布大学、相模原市
松岡秀雄、帝京大学、八王子市

1 宇宙から電波エネルギーの需要のスタート？

太陽発電衛星（SPS）の概念の最初の発表 [1] の40周年の現在まで、技術と科学知識は1968年に比べて大いに進歩している。しかし、どの分野でも、新しい技術が研究所から市場へ進むため、実験機いわゆる「オペレーショナル・デモンストレーター」の必要がある。

SPSの場合、一番よく検討された実験機は赤道上低軌道型「SPS2000」だった [2]。しかし近年、様々な実験機は話題になったので、赤道上低軌道システムの魅力の説明をもう一回する方がいいと思われる [3]。長友信人教授の計算によると、太陽発電衛星のオペレーショナル・デモンストレーターのために、赤道上低軌道に乗る衛星一基からレクテナへ毎日8回ほど電波エネルギーを送電する。最初に、緯度3度以下のレクテナに供給する高度1,100キロの衛星が設計された。しかし、長友教授の作ったガイドラインの一つは：「システムが進展する能力を持つこと」だった。

1994年から2002年までの現地調査の結果として、赤道に近い12カ国は「レクテナがあれば、喜んで利用する」と決めた [4]。その国の中でタンザニアのロンギード山の周辺、パプアニューギニアのマヌス島、インドネシアのハルマヘラ島、エクアドルのキト周辺、マレーシアのジョホールバル周辺などの場所は含んでいる。それぞれ平野の上、農地の上、無人島、高い山脈の中、そして技術大学のキャンパスに造る研究専用レクテナ等の15ヶ所は選ばれた [4]。

2 赤道上低軌道のシステムの進展

上記のように始まれば、衛星の利用率は約30%になるが、各レクテナの利用率は約2%だけ。各レクテナの利用率を高くするために、複数の衛星が使用されよう。複数のチームが違う形の衛星を造れば、システムの運用についてのデータの価値は高い。赤道のレクテナの担当者は協業すれば電波エネルギーの周波数や密度や安全基準などを共同で決められる。この活動を推進するために、**International Alliance for Energy from Space (IAES)** の設立は望ましい。このシステムの長期的な進展は下記のように進むと考えられる。

2. 1 衛星の高度を高くすれば、レクテナの可能な緯度も高くなる。
2. 2 衛星の高度が高くなるにつれて、送電時間も長くなる。
2. 3 電波の密度を強くすれば、レクテナの出力は増える。
2. 4 衛星の出力が大きくなれば、レクテナの出力も増える。

3 赤道の近所の電力需要と成長

赤道上衛星の一基を造って運用したら、技術の面でも市場の面でも一步一步で進展しやすい。衛星の高度が高くなるに従って供給される緯度は広がるので、可能な需要はテラブル1のように増える。

赤道に近い都市	緯度		人口 (百万人)
Quito	0.14		1
Kampala	0.19		1.2
Singapore	1.14		4
Nairobi	1.25		2
Belem	1.28		1.5
Johor Baru	1.47		0.6
Mogadishu	2.04		2.9
Guayaquil	2.10		3
小計			16.2
Kelang	3.03		0.5
Manaus	3.08		1.6
Kuala Lumpur	3.08		1.5
Mombasa	4.02		0.6
Kinshasa	4.18		5
Bogota	4.32		7
Lubumbashi	4.47		0.9
Ipoh	4.60	0.5	
Abidjan (Cote d'Iv.)	5.19		3
小計			20.6
Jakarta	6.16		10
Dar es Salaam	6.51	2.5	
Yogyakarta	7.47		0.7
Panama City	8.58		0.5
Adis Ababa	9.03		3
Port Moresby	9.25		0.6
Cartagena	10.24		1
Caracas	10.28		3
Djibouti	11.30		0.5
Lima	12.0		7
小計			28.8 (18.8)
Managua	12.06		0.9
Salvador (Brazil)	12.56		3.2
Bangkok	13.45		7
Manila	14.35		11
Guatemala City	14.37		1
Dakar	14.40		2
La Paz	16.27		0.8
Yangon	16.50		4
Vijayawada	16.52		0.9
Santa Cruz (Bolivia)	17.48		1.2

Harare	17.49	2	
<u>Kingston (Jamaica)</u>	<u>17.59</u>	<u>2.7</u>	
小計			36.7 (25.7)
Pune	18.34	3.5	
Antananarivo	18.50	1.5	
Mumbai	19.0	18	
Vera Cruz	19.1	0.6	
Mexico City	19.26	18	
<u>Belo Horizonte</u>	<u>19.46</u>	<u>4</u>	
Hanoi	21.05	1.2	
Mecca	21.29	1	
Calcutta	22.34	13	
Shenzhen	22.39	1.2	
Rio de Janeiro	22.57	6	
Guangzhou	23.07	11	
<u>Sao Paolo</u>	<u>23.31</u>	<u>18</u>	
小計			97 (19)
総計			199.3 (100.3)

テーブル 1 : 緯度 0 度ー 2 4 度の都市の人口
(括弧内 : 千万人以上の都市以外)

上記の都市の国の経済発展のお陰で、その電力の需要は先進国のように一人当たり約 1 k W になったら、上記の都市の将来の需要は約 2 0 0 G W まで増える。その上、平均として、上記の都市の人口成長率は年に 2 % なので、2 0 4 0 年までに今の 2 倍になる。既に千万人以上の都市が成長しなくても、2 0 4 0 年の需要は 3 0 0 G W を超えると考えられる。この市場の成長している需要を赤道上軌道に乗っている衛星から供給する具体的な計画を作るために、次の様子についてのデータは使われる。

3. 1 各都市の電力需要と供給システムの計画。
3. 2 各地の大規模の蓄電システムの可能性 (ダム等)。
3. 3 各都市の経度に基づいて、複数の衛星のそれぞれの可能な供給スケジュール。

上記のデータに基づいて、赤道上軌道の衛星のシステムの拡大計画を準備することができる。確かに、低軌道の衛星からの電力供給は連続ではないが赤道上軌道は他の低軌道より強い点は：

- * 可能な需要は 3 0 0 G W まで増える。
- * 全ての軌道が同じ平面に入っているので、衛星が多くなっても衝突の事故は避けやすい。
- * 静止軌道のシステムまでも拡大しやすい。

この一步一步で大規模までの成長はメーカー、投資者、運用する企業などに望ましい。

4 他のデモンストレーター提案

近年、エネルギーの市価が上がっているにしたがって、SPSも含めて、化石燃料以外の可能なエネルギー源は望ましく見られることになっているので、研究は増えている。この中で複数のSPSの実験機の計画は提案されている。

4.1 米軍のNSSOの提案しているデモンストレーターは静止軌道を使う[5]。そのための費用、特に打ち上げ費用及び送電費用は高い[6]。また軍事用なので、日本政府に向かない。

4.2 南太平洋島国のパラウ島には1MWのレクテナを造って、モルニヤ軌道の衛星から電波を送る提案がある。強い点はその送電時間は数時間続く。それに対して、送電距離は長くて、連続に変わる弱点がある。又、送電方向も変わるのでそのレクテナの効率は低い[7]。

4.3 Space Island Group、SIG社はインド政府やドイツの電力会社やカナダの石油産業などの共同プロジェクトのために資金を調達している[8]。約300億円で低軌道衛星を造って、三つのレクテナへ数分の送電実験を計画している。研究としての結果がいろいろが費用対便益は足りないという問題はある。

5 大規模の宇宙太陽発電産業への道

政策として、赤道に近い国と協力して、SPSの実験機を造って運用すれば、日本にとって複数の便益があるだろう。長期的に、宇宙から電波エネルギー供給産業に赤道近所の都市の大きい電力市場は魅力的だろうが、短期的には次の便益もある。

5.1 始めは簡単

最初の投資として、衛星一基だけは複数のレクテナへ供給するので、国際政治活動は始まる。このため、最初の段階の低コスト状態で、その価値と可能な便益を判断することができる。

5.2 貧乏支援向き

SPSの最初の実験機は小規模なのに、赤道に近い発展途上国に役に立つ。なぜなら赤道に近い地面に電力供給がない村は多い。従って、こういう先進国と発展途上国の協力は望ましい。

5.3 一步一步の成長

赤道上ではない軌道に比べて、違う高度の赤道上軌道に乗っているSPSの運用は合わせやすい。既存の衛星の運用が変わらなくても、新しい衛星をまた違う高度の軌道に乗せて、運用を始めることは簡単。また、複数の国際プロジェクトが協力して、成長することは簡単。

5.4 外交の面で日本に合う

赤道の国が宇宙からのエネルギーを利用するために、新しい連盟を作る。これには日本政府の平和的な指導力は効果的だろう[8]。例えば、Clean Development Mechanism (CDM)により、発展途上国にレクテナをインフラストラクチャーとして供給することができる。

6 結び

外交の面でも、経済の面でも、日本人にとって、赤道の国と一緒に赤道上低軌道の太陽発電衛星システムの協力は米軍との協力より望ましいだろう。平和憲法に合うだけではなく、その上赤道に近い国々は日本が使う資源のたくさん持っている。従って、その国々との協力は日本経済と産業にいい。著者がマレーシアに現地調査していた時、マレーシア政府の代表は招待して、クアラ・ Lumpur 市での大会を支持するようお願いした [9]。

7 参考文献

- 1) P Glaser, 1968, "The Future of Power from the Sun", Proceedings of Inter-Society Energy Conversion Engineering Conference, pp 98-104.
- 2) M Nagatomo, S Sasaki & Y Naruo, 1994, "Conceptual Study of a Solar Power Satellite, SPS 2000", Proc. ISTS, Paper No. ISTS-94-e-04, also at www.spacefuture.com/archive/conceptual_study_of_a_solar_power_satellite_sps_2000.shtml
- 3) H Matsuoka & P Collins, 2004, "Benefits of International Cooperation in a Low Equatorial Orbit SPS Pilot Plant Demonstrator Project", Proceedings of 4th International Conference on Solar Power from Space-SPS '04, ESA SP-567, pp 213-217; also at www.spacefuture.com/archive/benefits_of_international_cooperation_in_a_low_equatorial_orbit_sps_pilot_plant_demonstrator_project.shtml
- 4) H Matsuoka, M Nagatomo & P Collins, 1994-2002, "Field Research for Solar Power Satellite Energy Receiving Stations", Matsuoka Laboratory Working Papers 1-16, Tokyo University & Teikyo Heisei University.
- 5) NSSO, "Space-Based Solar Power as an Opportunity for Strategic Security", 2007, www.nss.org/settlement/spp/library/nssso.htm
- 6) M Nagatomo, 2005, "Solar Power Satellites are not Science but Business", Proceedings of 8th SPS Research Symposium, Japan SPS Research Society, pp 59-62, (in Japanese).
- 7) P Collins & H Matsuoka, 2008, "Comparative Benefits of a Low Equatorial Orbit Microwave Solar Power Satellite (SPS) Operational Demonstrator", Proc. IEEE Radio-Frequency and Microwave Conference, RFM 2008, Kuala Lumpur.
- 8) www.spaceislandgroup.com
- 9) H Matsuoka, M Nagatomo & P Collins, 1998, "Field Research for Solar Power Satellite Energy Receiving Stations: Malaysia", Matsuoka Laboratory Working Paper 9, Teikyo Heisei University.