

宇宙太陽光発電に適する軌道とは

— 静止軌道と準天頂軌道を比較する —

大分県立日田高等学校

森 海晴, 森山己太郎, 藤本 健心

1. 研究動機・先行研究・研究目的

近年、クリーンエネルギーの需要が高まっていることから、私たちは究極の太陽光発電「宇宙太陽光発電システム (Space Solar Power System : 以後 SSPS)」に着目した。SSPS は静止軌道上を運行する衛星に設置した太陽光パネルで発電し、その電力を地上に設置した受電レクテナに向けてマイクロ波等で無線送電するという計画で、マイクロ波が雲を通り抜けられるため、天候に左右されずに安定した電力供給ができることや、受電レクテナを置けばどこでも電気を受け取れるなどの利点がある。一方で実現に向けて①送電や受電の効率化、②静止軌道上の衛星数の飽和、という課題がある。課題①については、坂井ら⁽¹⁾が、世界最高の電力変換効率を達成するなど、現在も研究が進められている。課題②については、長友⁽²⁾によって SSPS の軌道に関する考察がなされているが、その他で議論は深められていない。よって私たちは「静止軌道と同程度かそれ以上に効率よく送電できる宇宙太陽光発電衛星の軌道を見つけ出す」ことをテーマに研究を行うこととした。

2. 前提条件

- 条件①：地球に電力を送る際にはマイクロ波を用いる
- 条件②：夏至の1日で地球での受信電力量を比べる
- 条件③：送信機のアンテナは常に受信点を向くが、アンテナの制御に電力は消費しない
- 条件④：マイクロ波は以下に示すフリスの公式に則って空間を伝わるとする

$$Pr = \frac{ArAt}{d^2\lambda^2} Pt$$

Pr : 受信電力, Pt : 送信電力, Ar : 受電レクテナの実効開口面積, At : 送電レクテナの実効開口面積, λ : 波長, d : 送受信機間の距離

3. 仮説

『静止軌道より準天頂軌道の方が地球での受信電力量が大きくなる』とした。私たちが注目した準天頂軌道は、日本上空を高くゆっくり周回し、日本から見ると8の字に見えるという特徴がある(図1)。つまり日本上空で静止軌道に比べて仰角が大きくなるため、受信時の電力損失が小さく

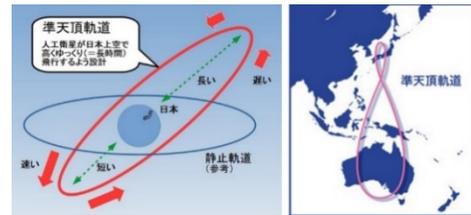


図1 準天頂軌道の概略図⁽⁶⁾⁽⁷⁾

なると考えた。

4. 研究 I (定義式の導出)

〈4・1〉 予備実験① (距離によるマイクロ波の減衰)

距離によってマイクロ波はどれほど損失するのかを調べるため、NaRiKa マイクロ波送信機・受信機、SHIMADZU ワイヤレス電圧計を用いて実験を行った。送信機と受信機を一直線上に設置し、受信機で計測された電流と電圧から電力を算出した。送受信機間の距離を 40cm~110cm まで 10cm おきに計測した(図2)。

実験結果(図3)より、曲線的なグラフが得られたため、マイクロ波においてもフリスの公式を用いてよいと判断した。

〈4・2〉 予備実験② (角度によるマイクロ波の減衰)

マイクロ波送信機と受信機の角度 θ により、マイクロ波がどれほど損失するかを調べるため、送受信機間の距離を 40cm に保ちながら、 θ を $0^\circ \sim 50^\circ$ まで 10° おきに電力を計測した(図4)。なお、 $\theta = 0^\circ$ の電力を 1 とし、 θ の変化による受信電力の減衰率を測定した。その結果から、

$$y = -8 \times 10^{-7} \theta^4 + 1 \times 10^{-4} \theta^3 - 0.0037 \theta^2 + 0.0145 \theta + 1$$

という関数が得られた。これを θ による減衰関数 $R(\theta)$ とした。

2つの予備実験より、今回の研究に用いる準天頂軌道は、軌道上を周回する衛星と大分県との角度が絶えず変化する軌道であることから、フリスの公式と減衰関数 $R(\theta)$ の積である 3K の公式を新たに作成した。

$$3K \text{ の公式 } Pr = \frac{ArAt}{d^2\lambda^2} Pt \times R(\theta)$$

この 3K の公式を利用して、静止軌道と準天頂軌道にお

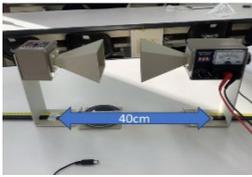


図2 距離40cmの実験の様子

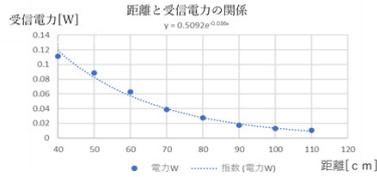


図3 距離と受信電力の関係

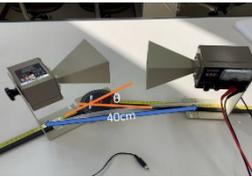


図4 角度θ=40°の実験の様子

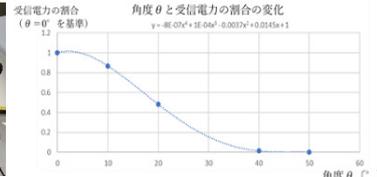


図5 角度と受信電力の割合

る送電効率を比較する。ただし、式の赤枠部分は静止軌道と準天頂軌道で変化しないため定数 (= 1.3×10^{24}) とした。この定数を 1.3×10^{24} という値にした理由は、静止軌道からの受信電力 P_r をおよそ 1.0×10^6 kW (100 万 kW) にするためである。

5. 研究Ⅱ (受信電力量の算出)

〈5-1〉 本実験① (静止軌道の場合の受信電力量)

静止軌道上で衛星を周回させた場合の1日の受信電力量を算出するために、シミュレーションソフト Matlab を用いた。以下は計算条件である。

- 地球を球体とみなし、その半径は 6371 km
- 受信点は大分県 (緯度 N33°14'22", E131°36'34")
- 衛星は地球を中心とした円軌道上を等速円運動する
- 軌道傾斜角は 0° で赤道上空を運動する
- 衛星の公転周期と地球の自転周期はともに 24 時間
- 24 時間の 100 分の 1 (864s) ごとに d と θ を算出し、以下の積分式で1日の受信電力量を計算する

$$W = \int_0^{24h} \frac{ArAt}{d^2 \lambda^2} P_t \times R(\theta) dt$$

図6のようなシミュレーションを行い、 d と θ に関して図7, 図8の結果を得た。図7で縦軸の d が一定の値を示していないが、 d の変化量が極端に小さい値で、わずかな差であるため、受信点から衛星までの距離 d は常に 3.67×10^7 m であるといえる。また、図8より θ は常に 37° を指しており、シミュレーションによって得られた d と θ の値は、実測値と概ね一致している。常に $\theta = 37^\circ$ と得られたが、地球に置いた受電レクテナも 37° 傾けて設置すれば、衛星から発射されるマイクロ波を垂直に受信できると考えられるため、 θ の値を 0° とみなせ、 $R(\theta) = 1$ とできる。求めた d と $R(\theta)$ から、1日の受信電力量 W を計算した結果、 $W = 2.4 \times 10^7$ kWh となった (図9)。

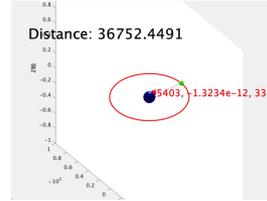


図6 Matlabでの静止軌道の再現

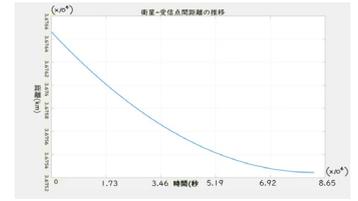


図7 衛星-受信点間の距離dの推移

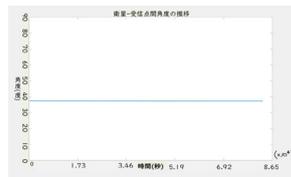


図8 衛星-受信点間の角度θの推移

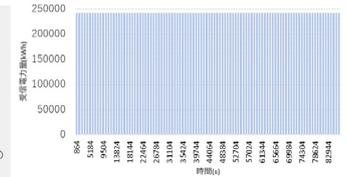


図9 静止軌道における受信電力量Wの推移

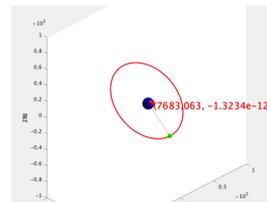


図10 Matlabでの準天頂軌道の再現

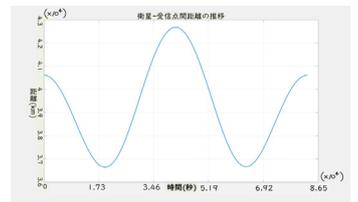


図11 衛星-受信点間の距離dの推移

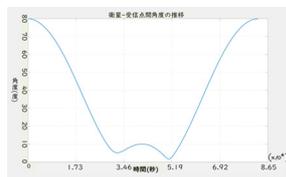


図12 衛星-受信点間の角度θの推移



図13 準天頂軌道における受信電力量Wの推移

〈5-2〉 本実験② (準天頂軌道の場合の受信電力量)

準天頂軌道における1日の受信電力量を、Matlabを使用して算出した。本実験①から変更した計算条件を以下に示す。

- 衛星は離心率 0.075 の楕円上を運動し、楕円焦点の1つに地球を配置する
- 衛星の楕円軌道は赤道面に対し 40° の軌道傾斜角をもつ

図10のようなシミュレーションを行い、図11, 図12から、 d が大きくなった時に、 θ が小さくなることを確認できるため、準天頂軌道の特徴を表した結果となっている。求めた d と θ から、1日の受信電力量 W を計算した結果、 $W = 8.4 \times 10^6$ kWh となった (図13)。また、図13の特徴として、①受信電力量が0の時間が1日の40%程度あること、②受信電力量の最大値は 2.0×10^5 kWh であり、静止軌道よりも値が小さいことが確認できる。①の原因として、 $\theta > 40^\circ$ の時間が長く生じるためだと考える。

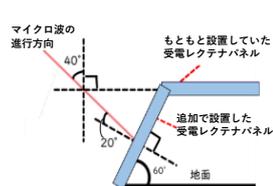


図14 地上から60°傾けた受電レクテナを1枚追加設置する場合の模式図

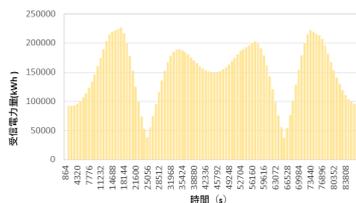


図15 準天頂軌道において60°傾けた受電レクテナを追加設置した場合の受信電力量 W の推移

6. 考 察

準天頂軌道で受信電力量が0である時間を減らすことはできないかと考えた。そこで、図14のように地表面から60°傾けた受電レクテナをもう1枚設置するとして1日の受信電力量 W を計算すると、 $W=1.5 \times 10^7$ kWh となり、静止軌道と遜色ない結果となることが判明した。ゆえに、SSPSの軌道として、衛星が飽和状態になりつつある静止軌道に代わって、受電レクテナ2枚の準天頂軌道も候補に挙げられることを発見した。

7. 今後の展望

受信電力量の大きさは、 d に強く依存しているため、地球からの距離が近いISS軌道などについても調査することを検討している。また、予備実験②をより細かい角度変化で実験したい。

8. 謝 辞

この研究を行うにあたって、日々指導・助言をいただきました日田高校の工藤督右先生、訪問時に助言をいただきました九州大学の花田俊也教授、QPS研究所の大西俊輔様、市來敏光様、九州大学の八坂哲雄名誉教授、メールで助言をいただきました京都大学の篠原真毅教授に心より感謝申し上げます。

文 献

- (1) 坂井尚貴・野口啓介・伊東健治：「短絡スタブ装荷ダイポールアンテナを用いる5.8GHz帯高効率1Wレクテナ」, 信学技報, Vol.122, No.411, pp.60-65 (2023)
- (2) 篠原真毅：「宇宙太陽光発電システムの開発動向」, 電学誌, Vol.137, No.12, pp.841-844 (2017)
- (3) 長友信人：「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」, 第2回宇宙太陽発電システム (SPS) シンポジウム講演要旨, pp.88-92 (1999)
- (4) 西山淳一・小泉 悠・依田達郎：「宇宙に関する基本情報. 科学技術に関する調査プロジェクト2016報告書 宇宙政策の動向」, pp.7-25 (2016)
- (5) 宇宙航空研究開発機構 (JAXA) 研究開発部門：「宇宙太陽光発電システム (SSPS) について」, JAXA, <https://www.kenkai.jaxa.jp/research/ssps/ssps-ssps.html> (アクセス日 2024-9-30)
- (6) Science Portal：「日本版GPS「みちびき初号機後継機」打ち上げ成功高精度測位に貢献」, 科学技術振興機構 (JST) (2021-10-27), https://scienceportal.jst.go.jp/newsflash/20211027_n01/index.html, (アクセス日 2024-9-30)
- (7) みちびきウェブサイト：https://qzss.go.jp/overview/services/tech01_orbit.html