

液体金属を用いた SSPS 用 ロータリージョイントの可能性検討[†] Examination of the possibility of rotary joints for SSPS using liquid metal

原川 健一^{*1}・篠原 真毅^{*2}
Kenichi HARAKAWA, Naoki SHINOHARA

1970年代にNASA/DOEがSSPSの概念設計を行った。このシステムは、静止軌道上で常に太陽方向に太陽電池パネルを向け、マイクロ波ビーム放射器が地球上のレクテナを指向する形態であった。この間には、大電力送電可能なロータリージョイントが必要になる。しかしながら、大電力送電可能なロータリージョイントの製作が困難であった。以後は太陽電池パネルとマイクロ波アンテナが一体化した構造物が提案されている。今回、液体金属を用いたロータリージョイントについて検討した。GWクラスの直流電力を直接送電でき、発熱がわずかで、軽量かつ小型に製作できる可能性のあることが判ったので報告する。

NASA / DOE designed the concept of SSPS in the 1970s. In this system, the solar panel was always directed toward the sun in geosynchronous orbit, and the microwave beam radiator was oriented toward the rectenna on the earth. Between these, a rotary joint capable of transmitting high power is required. However, it was difficult to manufacture a rotary joint capable of transmitting high power. Since then, a structure in which a solar cell panel and a microwave antenna are integrated has been proposed. This time, we examined a rotary joint using liquid metal. We report that it has possibility to transmit GW class DC power directly, generate little heat, and make it lightweight and compact.

Keywords : Liquid metal, High power transfer, Rotary joint, DC direct transfer

1. はじめに

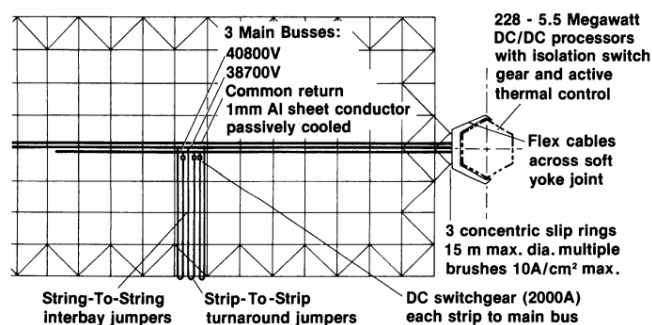
地球環境保全の一環として、静止軌道に置いた太陽電池のエネルギーをマイクロ波で地球に送電する「宇宙太陽光発電システム(Space Solar Power System: SSPS)」を実現することは優先度の高い事業である。

1968年に提案されたものの、実現には至っていない。1978年には、DOE(United States Department of Energy)が具体的な提案をしている¹⁾。その中で、ロータリージョイント部について記載されており、第1図に代表的なものを示す。

この中では、スリップリングが用いられている。しかしその後の研究では、GWクラスのものを製作するのは困難とのことであり、日米ではロータリージョイントなしのサンドイッチ構造のテザー型が最近の主流になっている²⁾。

長年 GWクラスのロータリージョイントの製作が困難とされてきたが、液体金属を用いることで製作できる可能性がある

ことが判ったので報告する。



第1図 SSPSのPower Distribution

2. 回転系における電力伝送方式の比較

2.1 検討条件 SSPSで利用可能な回転系を比較検討したい。そのためには、どのような条件で利用されるのかを整理してみた。

- ・目標とする送電電力: 1.3 GW
- ・静止軌道上に置かれ、高真空中(1×10^{-8} Torr)に置かれる。
- ・衛星軌道上の日なたの温度は121 °C, 日陰の温度は-121 °C
- ・3軸稼働で日周運動させる。

[†] 第6回宇宙太陽発電シンポジウム, 2020年12月4-5日, オンラインにて発表

^{*1} 株式会社 ExH

〒270-1356 千葉県印西市小倉台 3-1-8-106, ExH Corporation, 3-1-8-106, Oguradai, Inzai, Chiba 270-1356, Japan e-mail: kenichi_harakawa@exh-energy.com

^{*2} 京大大学生存圏研究所

〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄京都大学宇治キャンパス, Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University, Kyoto University Uji-Campus, Gokasho, Uji-shi, Kyoto 611-0011, Japan e-mail: shino@rish.kyoto-u.ac.jp

©SSPSS

2.2 回転系電力伝送技術の比較 第1表に、回転系電力伝送技術を比較して示す。

第1表 回転系電力伝送技術の比較

方式名	技術概要	特徴・問題点
電界結合方式	ステータ電極とロータ電極で構成される容量を用いて電界結合により送電する。	・GWインバータ開発困難 ・電極間の距離の保持は、磁石吸引方式で行う。
電磁誘導方式	磁気コアに巻かれたコイルを対向させ、磁気回路を構成して送電する。	・GWインバータ開発困難 ・磁気コア、コイルが重い。 ・表皮効果、磁性損による発熱が大きい。
磁気共鳴方式	送電コイル、受電コイルを同一周波数で共鳴させ、磁気結合により送電する。	・GWインバータ開発困難 ・空間に電磁波を放射 ・表皮効果による発熱が大きい。
スリップリング方式	回転系にフィラメントを接触させ、剛体電極同士を接触させて送電する。	・直流をそのまま流せる。 ・剛体金属同士の接触のため、接触抵抗を小さくすることが困難、フィラメント数を多くする必要がある。
液体金属方式	液体金属をロータとステータ間に保持させて送電する。	・直流をそのまま流せる。 ・接触抵抗を極めて小さくでき、小型化が可能

第1表で示したように、太陽電池パネルから送られてくる1.3 GWの電力を高周波化して非接触で送電し、整流してマイクロ波放射器に直流送電する。技術として、電界結合方式、電磁誘導方式、磁気共鳴方式が選択できるが、現実的ではない。1.3 GWの高周波の発信・整流だけで、大きな装置が必要であり放熱問題等にも対処しなければならない。送電効率も高くなく、磁性体、コイル等で発熱する。

磁気共鳴方式は、電磁波放射が大きい点も問題である。

これに対し、スリップリング方式、液体金属方式は太陽電池パネルで発生する直流電力を直接流すことができる。

ただし、スリップリングは、フィラメントを回転電極に接触させる方式である。抵抗を低減するためにフィラメントとしてブラシを使用し、回転電極の円周上に多数配置し、接点数を増大させる方法がある。しかし、所詮は剛体金属同士の接触であるため、ミクロ的に見れば接触はごく限られた点接触の集合でしかない。このため、1.3 GWもの大電力を流すと、接点が発熱し、変質してしまう。これにより、摩耗がすすみ、切削粉が発生する。

これに対し、液体金属を用いた場合には、液体同士または液体と金属の接触であるため、接触抵抗を極めて低くすることができる。1.3 GWの電力において、電圧が低く電流が大きな場合でも、発熱は極めて少ない。

3. Ga系液体金属

3.1 Ga系液体金属 液体金属として知られているものに水銀がある。水銀は人体に対して毒性が強く、RoHS指令によって使用が制限されている。

これに対して、毒性がない液体金属として、Ga系液体金属がある。この金属は、Ga, In, Snの共晶合金であり、融点が-19℃である。特性は第2表に示した。

名前は、Galinstanと呼び、gallium, indium, and stannum (Latin for "tin")からの合成語で有り、ドイツメーカーの登録商標である。

第2表 Galinstanの物理特性³⁾

項目	値
沸点	> 1300℃
融点	-19℃
蒸気圧	< 10 ⁻⁸ Torr (at 500℃)
密度	6.44 g/cm ³ (at 20℃)
粘度	0.0024 Pa·s (at 20℃)
熱伝導率	16.5 Wm ⁻¹ K ⁻¹
導電率	3.46x10 ⁶ S/m (at 20℃)
表面張力	s=0.535-0.718 N/m (at 20℃)
比熱容量	296 Jkg ⁻¹ K ⁻¹

第2表から、沸点を見ると1300℃以上とあり、水銀の沸点(356.7℃)と比して安心して使用できる。

融点は、-19℃であり宇宙空間における日陰温度よりは高く、ヒーター等によって温度を維持する必要がある。

蒸気圧は10⁻⁸Torr以下であるため、真空中に放置された状態でも長期間保持できる可能性はある。封止した環境では問題ないと思われる。

粘度は、潤滑油の0.058 Pa·sよりも低く、滑らせて使用することができる。

導電率は3.46 x10⁶ S/mであり、ステンレス鋼より少し高い値であり、銅より一桁以上低い。

我々の行った実験の範囲では、アルミニウムを激しく脆化させる。鉄、ステンレス、カーボンには濡れ性を示さなかった。他方、銅、ガラス、ポリエステルには濡れ性を示した。

3.2 外観 第2図にGa系液体金属をSUS板上に滴下した様子を示している。温度は、約20℃である。

図に示すように、強い表面張力を有した液体状の金属である。



第2図 Ga系液体金属外観

3.3 導通実験結果

第3図には、銅板上に約1mm³のGa系液体金属を滴下し、鉄プローブを接して電流を流した様子を示している。

10Aの電流を流すと鉄プローブは赤熱している。

Ga系液体金属は、鉄に濡れたように垂れ下がっている。この状態で9時間放置した。

電流密度は、約1.2 kA/cm²である。

実験後、Ga系液体金属は表面張力の強い液体としての特性を保持していた。酸化膜が、防護していると思われる。銅板は、接触角でみ限りGa系液体金属と濡れているようであるが、Ga系液体金属を拭き取った後は反応している様子は見られなかった。

鉄プローブの先端は、まったく変化していなかった。



第3図 銅板上のGa系液体金属に通電している様子

3.4 回転送電系に適用した結果 次に、回転送電系を製作して通電の様子を確認した。第4図に、実験装置の外観を示している。内部に円盤状の回転電極とそれを挟む液体金属含侵フェルトを内包したバックが二組入っていて、それぞれから導線が外に伸びている。

両端に軸受けがあり、その内側に磁性流体シールを配している。窒素で内部の空気を置換した。

3000 rpm で動かしたが、第5図の結果となった。

二つの回転電極を直列に接続した抵抗値を示しているため、一つの電極当りの抵抗はこの半分の値である。抵抗値は、 $0.9\text{ m}\Omega \sim 3\text{ m}\Omega$ の間で変化しているのだが、40分を過ぎた辺りから抵抗値が増大し始め $200\text{ }\Omega$ 以上まで急速に増大した。抵抗値の増大と共に、トルクも大きく増加している。

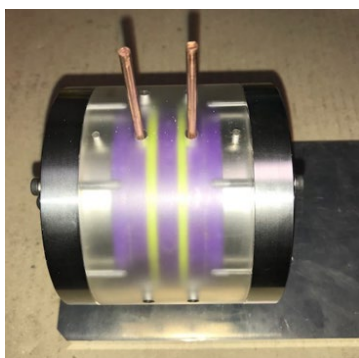
実験後、分解して調べると、銀色の液体金属が黒色の炭状に変化していた。

他の予備実験では、回転時に液体金属が灰色の粘土状に変化し、トルクも大きく増大することがわかっている。(シールなしの手回し実験)

第4図の試験体を用いた結果は、シールが完全でなく、スローリークがあったと思われる。回転電極とフェルト含侵液体金属間で、空気が混合され、酸化が進んだものと思われる。第3図の静止状態では酸化膜が、液体金属を防護するが、回転系では酸化物も攪拌されてしまい、防護機能は働かないと思われる。

以上の結果から、液体金属は高い導電率を有するものの、酸化に対して極めて脆弱であり、大気中での使用には注意を要することがわかった。

逆に言えば、真空中では使用可能であることを示している。



第4図 試験装置外観



第5図 液体金属ロータリージョイントの抵抗変化

4. SSPS 用ロータリージョイントへの適用検討

4.1 液体金属を定位させる方法 前述の実験では、液体金属を定位させる方法として、フェルト(ポリエステル)に含侵させて使用していた。これにより、第2図で示す表面張力の強い液体金属を面電極として使用できるようになった。しかし、宇宙空間での使用を考えると、日なたの温度は $121\text{ }^\circ\text{C}$ にもなり、材料に熱的余裕がなくなる。このため、銅を用いることとした。Ga系液体金属は銅とは濡れ性が良いことも選択した理由である。第6図に、焼結銅繊維に含侵させた様子を示している。

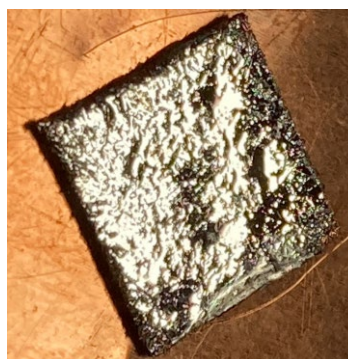
この焼結銅繊維は、単に、繊維の塊ではないため寸法精度が良い。

フェルトに比して液体金属の含侵が容易であり、半田が使用できるため固定も容易である。

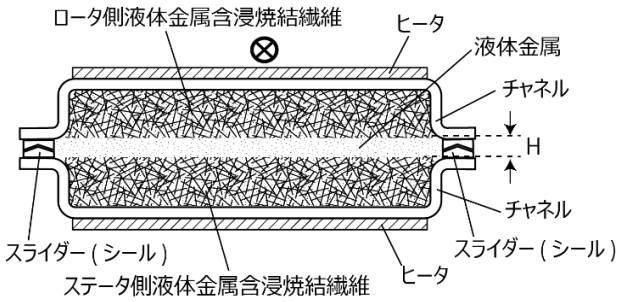
第7図には、焼結銅繊維をリング状のチャンネルに埋め込んで固定し、液体金属を含侵させたものを対向させている。一つはステータ電極であり、他方はロータ電極である。シール部にはスライダ機能を持たせており、内周部と外周部に付けている。第7図は、リングの一方の断面図を見たものである。

各チャンネルには、ヒーターがつけられており、液体金属が液体として機能する温度範囲に設定する。

ステータ側電極とロータ電極の間隔(H)は、約 2 mm を見込んでおり、その空間を液体金属で満たしている。



第6図 銅メッシュに含侵させた液体金属



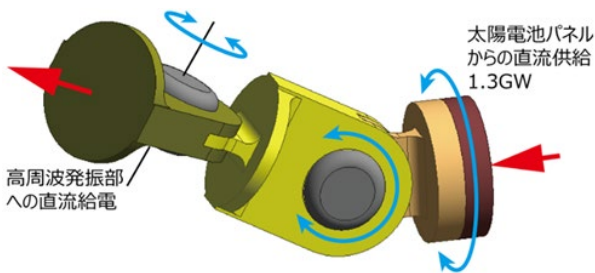
第7図 SSPS用ロータリージョイントとして用いた場合のロータ及びステータの断面図

4.2 SSPS用ロータリージョイントのイメージ 目標が3軸稼働であるため、第8図のようなものになると思われる。接触式で、インバータ等がないため、このようなコンパクトなものが可能になる。

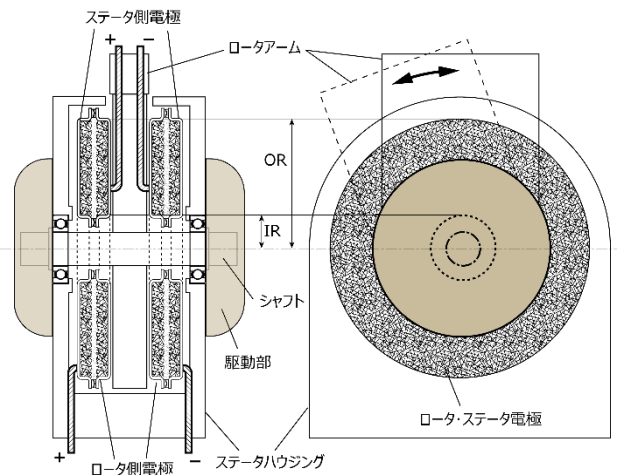
第8図に示す3自由度ロータリージョイントの具体的な構造案を第9図に示している。第7図で記載したリングが2セット入っており、回路が構成できる。

ステータ側の電極が両サイドに在り、ステータハウジングに固定されている。ロータ側電極は内側にあつて、それぞれのステータ側電極と対向しつつ、ロータアームに接続されている。駆動モータはステータ側ハウジングの外側に付けられている。

電極同士は、ドーナツ状に面対向していて、外側の半径がOR、内側の半径がIRである。



第8図 SSPS用3自由度ロータリージョイントのイメージ



第9図 ロータリージョイントの構造

4.3 SSPS用ロータリージョイントの負荷トルク計算

ロータリージョイントにおいて、負荷トルクは大変重要なファクターである。液体金属の粘度が求まっていることから、ロータリージョイントのトルクを計算してみた。計算にあたって、第10図に示す寸法を用いた。

この寸法に基づいてトルクを計算すると、(1)式が得られた。

なお、 μ は粘度であり、Hは電極間ギャップで有り液体金属層の厚さになる。

ω は、日周運動の角速度であり、 7.272×10^{-5} rad/s である。

$$T = \frac{2\pi\mu\omega}{H} \int_{r_1}^{r_2} r^3 dr$$

$$= \frac{\pi\mu\omega}{2H} (r_2^4 - r_1^4) \tag{1}$$

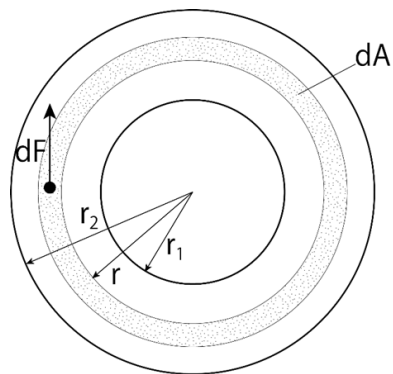
$r_2(OR)$ を2.0 m, $r_1(IR)$ を1.5 mとして計算すると、第3表の結果になった。

第3表 トルク計算結果

トルク(1電極)	$1.5 \times 10^3 \text{ N}\cdot\text{m}$
トルク(2電極)	$3.0 \times 10^3 \text{ N}\cdot\text{m}$

十分に小さい値である。ただし、スライダー(シール)部のトルクが加算されていないことを注意されたい。

焼結金属が毛羽立ち、金属細線同士がぶつからないことが前提である。このためにも、焼結金属は有効である。



第10図 電極の諸寸法

4.4 液体金属部の抵抗及び発熱

$r_2(OR)$ を2.0 m, $r_1(IR)$ を1.5 mとし、液体金属部の厚さを両側の焼結金属の厚さを3 mm, 液体金属部の層厚(H)2 mmとして、総計して8 mmとした。さらに、二つの電極対を直列接続して計算した。以上より、液体金属部の損失を、1.3 GW送電における電圧・電流の配分を4ケースに分けて計算し、第4表に示した。

第4表 1.3 GWの各種電圧・電流比での液体金属部損失

送電電圧[V]	5 k	10 k	50 k	100 k
送電電流[A]	260 k	130 k	26 k	13 k
損失電力[W]	56.9	14.2	0.569	0.142
電流密度[A/cm ²]	4.7	2.4	0.5	0.2

第4表の結果を見る限り、電流が大きなケースでも、損失が小さく問題がない。今回は、 $r_2(OR)$ を2mとした。直径は電極部だけで4mである。ハウジング等を入れても、5mには達しない。

計算結果からは、さらに小さくすることも可能である。

これは、H3 ロケットの衛星フェアリング外形5.2mよりも小さく、搭載可能である。3軸ロータリージョイント部だけを地上で組み立てることが可能になる。重量は算出していないが、重い構成要素がない。

薄くて面積の大きな要素の電力損失を求めただけなので、損失が小さいのは当たり前である。それよりも、この電極に電流を導く導線自体からの発熱が大きい。

液体金属は、打ち上げ時の加速度の影響を受けることが心配されるが、軌道に乗るまでの間、融点以下に温度を下げて固体化しておくことで対応可能である。

5. 結論

一切高周波化せずに、直流をそのまま送電できるメリット

は大きい。さらに、3軸の制御精度が上がるのならば、フェーズド・アレイ・アンテナの位相器も簡略化できるかもしれない。フェーズド・アレイ制御によってビームの振り角を大きくすれば、効率も落ちるため、なるべく正面放射が好ましいはずである。

このように、液体金属を用いたロータリージョイントは一構成要素ではあるが、SSPSの設計に影響を与える可能性がある。SSPSの早期実現に寄与できることを願う次第である。

参考文献

- 1) DOE and NASA: Satellite Power System Concept Development and Evaluation Program Reference System Report, DOE/ER-0023 (1978), pp. 19-23.
- 2) Sasaki, S., Tanaka, K., Kawasaki, S., Shinohara, N., Higuchi, K., Okuizumi, N., Senda, K., Ishimura, K. and USEF SSPS Study Team: Conceptual Study of SSPS Demonstration Experiment, *URSI Radio Science Bulletin*, **2004**, 310 (2004), pp.9-14.
- 3) Wikipedia The free encyclopedia: Galinstan, 7 January 2022, <https://en.wikipedia.org/wiki/Galinstan>.

(2022.2.14 受付)