

SPS Research Led by Prof. Makoto Nagatomo

Susumu Sasaki

The Institute of Space and Astronautical Science (ISAS),

Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA)

Sagamihara, Kanagawa 229-8510 Japan

*sasaki@isas.jaxa.jp

Prof. Makoto Nagatomo, a distinguished leader in SPS research, passed away on April 17 this year. It is deeply regretted by all members of the Space Solar Power Research Society of Japan, especially in the recent situation revealing that the human society will not sustain without a new energy system substituted for the existing power plants with a large CO₂ load. Prof. Nagatomo left great achievements in several engineering fields, but this article is concentrated to looking back his research in the field of SPS.

There are three phases in his SPS research activities. The 1980's was the "starting-up phase". He was appointed a professor of the Division for Space Power Systems of the Institute of Space and Astronautical Science (ISAS) which was founded in 1981 by reorganizing the Institute of Space and Aeronautical Science of the University of Tokyo. He selected the SPS as the major research subject for his division. He also started "ISAS Space Energy Symposium". In that period, he investigated 10 MW class SPS as a near future SPS based on the NASA reference system. In the mid-eighties, he proposed a microwave power transmission experiment with a small space platform. He organized "SPS Working Group" in 1987 aiming to propose SPS-related projects. The 1990's was the phase of "engineering research" for near future demonstration experiment. In 1990, he proposed new baseline requirements, quite different from those of the NASA reference system, to design a realistic and low cost 10 MW class SPS. The new model, named as "SPS-2000", was designed by a task team organized by about 50 researchers from universities, national laboratories, and private companies. The study results were presented at the SPS international conference in 1991 and the SPS'91 award was given to the authors (Prof. Nagatomo and Itoh). After the conceptual design of SPS-2000, he started an activity to set up a larger research plan covering space transportation, economical aspects and environmental issues, as well as SPS technologies. The research plan was prepared for application for the "Juten Ryouiki Kenkyu" (Emphasized Research Field) of the Japanese Ministry of Education, Science Culture's research grant. It was submitted to the MOE three times but was not accepted. In his review of three years' campaign, he concluded that "we can draw the shape of the SPS engineering which will bring SPS from fantasy to reality with professional method in cooperation with space engineering". In the same year, he organized the Space Solar Power Research Society of Japan to promote the SPS study more widely free from the ISAS framework. In the 2000's after his retirement from ISAS, he continued to guide SPS research in Japan in a higher and broader view from the "industry", "business", and "space exploration". He has a clear-cut opinion especially on the space transportation and orbit selection for SPS. He claimed that the airline type operation is the only solution for the space transportation in the SPS era. As for the SPS orbit, he insisted that the low earth equatorial orbit and geosynchronous orbit are the most potential candidates for the SPS. He also emphasized the need of standardization of the SPS system, sub-system, and component for commercialization.

Prof. Nagatomo has two major dreams in his life. One is the reusable launch vehicle (RLV). The other is the SPS. A preliminary RLV project recently started in Japan. We, SPS researchers, are now expected to start the first step SPS project in the near future.

長友先生とSPS 長友先生のSPS研究の歴史

宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究本部
佐々木進

はじめに

我が国の太陽発電衛星（SPS）の研究を立ち上げリードされた長友信人先生は去る 4 月 17 日にお亡くなりになりました。新しいクリーンなエネルギー源が開発されない限り人類社会は大きな試練を受けることが避けられないことが明らかになりつつあるこの時期に、SPS に高い見識をお持ちであった長友先生を失ったことは極めて残念です。長友先生は SPS だけでなくロケットをはじめとする幾つかの分野で大きな功績を残されていますが、本稿では先生の SPS の研究の足跡をふり返ります。

3つの研究フェーズ

長友先生の SPS 研究の足跡は、大きく 3 つのフェーズに分けることができます。最初のフェーズである 1980 年代は我が国における SPS 研究の立ち上げの時期です。1981 年に発足した文部省直轄の宇宙科学研究所では宇宙エネルギー工学部門が創設されました。この部門の教授となられた長友先生は同部門の主な研究対象として SPS を選ばれました。1982 年には宇宙エネルギーシンポジウムをスタートさせ、1987 年には同研究所の宇宙工学委員会の下に SPS ワーキンググループを設置されました。続く 1990 年代は

表 1 長友先生の宇宙エネルギーシンポジウム及び S P S シンポジウムでの講演タイトル

(宇宙エネルギーシンポジウム)

Japanese Motivation to Develop Solar Power Satellite (1982)
Introductory Note on the 10 MWSPS Conceptual Study (1983)
A Concept of Microwave Power Transmission Experiment with a Small Space Platform,
M. Nagatomo & K. Nakatsuka (1986)
パネル討論「太陽発電衛星 10MW モデルの電力送電に関する諸問題」(1990)
ストローマン研究に関する提案(1991)
SPS2000 研究の進捗状況(1992)
SPS2000 概念設計結果について(1993)
太陽発電衛星の研究を実現する展望(1994)
平成 6 年度「太陽発電衛星システムに関する総合研究」の概要(1995)
宇宙太陽発電所のための宇宙工学分野の研究課題一科研費申請作業をふりかえる(1996)
太陽発電衛星と地球環境（パネルディスカッション）(1997)
宇宙エネルギー工学をふりかえって（特別講演）(2000)

(SPS シンポジウム)

太陽発電衛星のためのロケットの研究とはいかなるものか？(1999)
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(1999)
低高度軌道 SPS のシステム設計に関する考察(2000)
宇宙太陽発電の産業化にむけて（長友・松本対談）(2001)
宇宙太陽発電所の工学基準の必要性について(2001)
軌道上建設を必要とする SPS の設計と建設計画に関する軌道工学的考察(2002)
宇宙輸送の貨物としての太陽発電衛星の特性に関する考察(2003)
太陽発電衛星に対する不信心(2004)
総合討論：「民営化」のかけ声に、忘れた「常識」を思い出す(2005)
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(2005)
先行的な宇宙発電研究として月・火星研究プロジェクトに参加する意義(2006)

SPS 設計研究のフェーズと言えます。SPS-2000 の概念設計研究とそれを更に発展させることを目指した科研費総合研究を推進されました。1997 年には宇宙工学者だけでなく人文社会系の研究者を加えた SPS 研究者の組織として、太陽発電衛星研究会の創設に中心的な役割を果たされています。長友先生は 2000 年に宇宙科学研究所を停年でお辞めになりましたが、それ以降も亡くなる直前まで、技術だけでなくビジネスや開発戦略を含むより広い立場から SPS の研究を精力的に進められ私たちを指導されました。

長友先生の SPS 研究の成果は主に宇宙エネルギーシンポジウムで報告されていますが、1997 年に SPS 研究会が発足した以降は、本研究会が主催する SPS シンポジウムに発表の場を移されました。表 1 にこれら 2 つのシンポジウムでの長友先生のご講演のタイトルを示します。

1980 年代の研究

図 1 に第 1 回目の宇宙エネルギーシンポジウムのプロシーディングの表紙と長友先生の講演 ”Japanese Motivation to Develop Solar Power Satellite”の結論部分を示します。結論は、1. SPS 技術開発は政府よりも民間で、2. 国際協力で実施、その枠組み作りは政府の役割、3. 宇宙関係者は SPS 時代の輸送系の研究を、というもので、25 年後の現在で

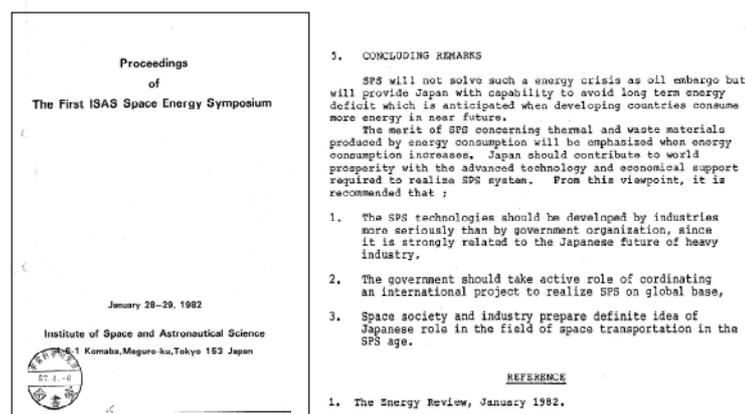


図 1 第 1 回の宇宙エネルギーシンポジウムのプロシーディングの表紙と長友先生のご講演 ”Japanese Motivation to Develop Solar Power Satellite”の結論の部分

も重要な所見と言えます。国際性の重要さを意識されたせいと思いますが、当時は宇宙エネルギーシンポジウムのプロシーディングは英文で書くことが求められていました。

図 2 は第 2 回の宇宙エネルギーシンポジウムでの原稿の一部です。当時 SPS と言えば数 km サイズの NASA リファレンスモデルのことを指す時代でしたが、この時期に長友先生は早くも早期着手の観点から 10MW クラスの SPS の重要性を意識されたようです。NASA リファレンスシステムよりはるかに小さく、当時概念の検討が始められていたスペースステーションよりもかなり大きいという設定でした。

長友先生はこの時期スペースステーションとそれと組み合わせて運用する小型宇宙プラットフォームにも関心を持たれていたのです。それらを利用した

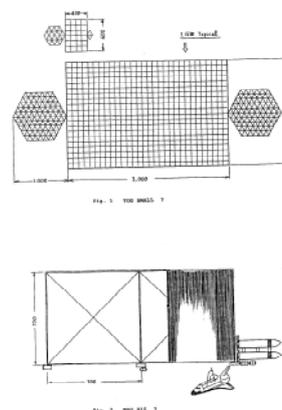


図 2 第 2 回の宇宙エネルギーシンポジウムでの長友先生のご講演 ”Introductory Note on the 10 MWSPS Conceptual Study”で示された 10MW 級 SPS の大きさ

マイクロ波送電実験の構想についても検討をされていきました。10MW 級の SPS については民間の研究者とも協力して検討を進められ、図 3 に示すような概念の案をまとめられました。NASA リファレンスシステムのミニチュアでは実現性とコストに難があるとして必ずしも満足されませんでした。

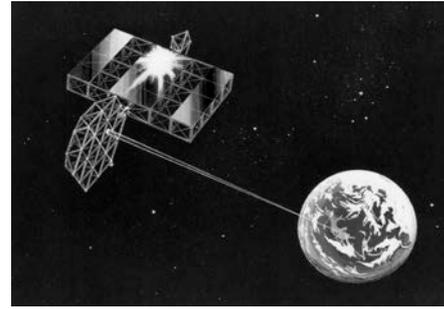


図 3 NASA リファレンスシステムをベースにした 10MW 級 SPS のモデル

1990 年代の研究

1991 年の宇宙エネルギーシンポジウムでは低コストで早期実現の観点から表 2 に示すような設計条件を設定され、ストローマン設計研究と称して新たな発想に基づく SPS の検討を始められました。これは長友先生の NASA リファレンスシステムからの訣別と言って良いと思います。この時期には現実的な SPS の検討に当たっては地上の電力システムを勉強すべきだと考えられ、火力発電所や図 4 の写真に示すような太陽光発電所を精力的に訪問調査されました。

表 2 SPS ストローマンモデル設計のための新たな設計条件

4.1 設計条件の設定

上記の方針、すなわち、低高度赤道軌道に安上りの衛星を打ち上げる、という考えを設計に反映させるために次の条件を仮定した。

1. 打ち上げロケットは商業用を使用し、新規開発はしない
2. 衛星は一体構造とし姿勢制御は重力安定および地磁気によるものとする
3. 組み立ては無人で行う：構造と自動化
4. マイクロ波を電力伝送に用いる

このストローマンモデルは研究メンバーの一人であったコリンズさんにより

SPS-2000 と名付けられ、大学や国立研究所の研究者や学生、企業の研究者など約 50 名で構成されるタスクチームを組織して設計研究が行われました。SPS-2000 の構想は 1991 年のパリでの SPS 国際会議で SPS' 91 Award を受賞しました。SPS-2000 の設計結果は図 5 のような 300m スケールの三角柱形状を持つ 10MW 級発電所としてまとめられ、1993 年 7 月には概念計画書が発行され一段落しました。SPS-2000 の設計研究は、前述の SPS ワーキンググループの一つのプロジェクトとして行われましたが、この時期 SPS ワーキンググループでは、SFU でのエネルギー実験の企画、ISY-METS と名付けられた観測ロケットによるマイクロ波送電実験の実施、マイクロウェーブガーデン計画（生態系へのマイクロ波の影響を調べるためのフィールド実験計画）を推進しました。



図 4 四国の太陽光発電所を視察されている様子

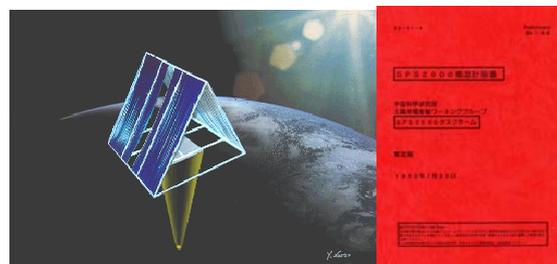


図 5 設計された SPS2000 と概念計画書

SPS-2000 の設計研究が一段落した後、長友先生は人文科学や環境科学を含むより大きな枠組みでの SPS の研究を指向され、その枠組みとして科研費の重点領域研究を目指されました。重点領域を設定するための準備研究活動である総合研究が科研費の調査研究として認められ、1994 年には図 6

に示すような、“宇宙発電所の基本技術”、“地球規模の環境とエネルギー問題”、“宇宙発電所建設の基盤技術”の3本柱からなる本格的なSPSの研究計画を文部省に提出しました。その後も2回にわたり研究計画を練り直して重点領域設定に挑戦されましたが、結局、SPS研究は重点領域としては認められませんでした。1996年の第15回宇宙エネルギーシンポジウムでは、“宇宙太陽発電所のための宇宙工学分野の研究課題一科研費申請作業をふりかえる”と題して講演され以下のように結ばれています。

結び

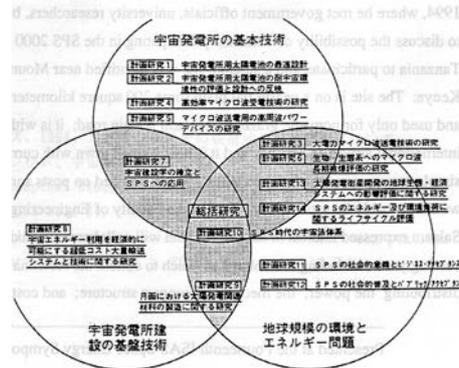
科研費の重点領域申請を3回作成して、その研究課題の中で従来の宇宙工学にかかわるものが減って、逆に、電力、電子、資源、材料、建設などの分野により多くの知識が求められるようになった。今後は、宇宙に太陽発電所を作るときに宇宙理工学者はいかなる分野で貢献できるかという視点が重要になる。この意味で、SPS宇宙プロジェクトの企画やアイデアコンテストの次の段階の研究活動を組織化すべきである。

長友先生は2000年3月に宇宙科学研究所を退官されましたが、その年の第19回宇宙エネルギーシンポジウムで特別講演を行われ、SPS-2000についてはNASAリファレンスシステムに代わる現実的な発電衛星を探し当てたと高く評価されています。また最後に残ったのはコストの問題で、衛星は現在の1/1000、宇宙輸送費は現在の1/100にしなければ宇宙エネルギーはエネルギーとして受け入れられることはないと言われています。

2000年代の研究

太陽発電衛星研究会は1997年10月に発足しましたが、太陽発電衛星研究会が主催するSPSシンポジウムは1999年1月から年度毎に開催されるようになりました。長友先生は第1回のSPSシンポジウムから亡くなられる半年前の第9回SPSシンポジウムまで必ず出席し、講演されていました。第1回SPSシンポジウムでは、“太陽発電衛星のためのロケットの研究とはいかなるものか？”というタイトルで講演され、“エアラインはSPSのような大きな需要を満たすロケット輸送のあり方を示すものであり、一段式で航空機と同じような体制で運用できるようにすれば毎回の運航費は燃料の価格の違い程度でエアラインと同じ程度になるはずである”と述べられています。

長友先生はSPS-2000の概念設計後は長い間具体的なSPSの形状に言及されることはありませんでしたが、現実的なSPSの構想が中々浮上しないことから、2000年の第3



「宇宙太陽発電システム」と本重点領域研究の関係

図6 重点領域設定を目指したSPSの研究計画の構成(1994年)

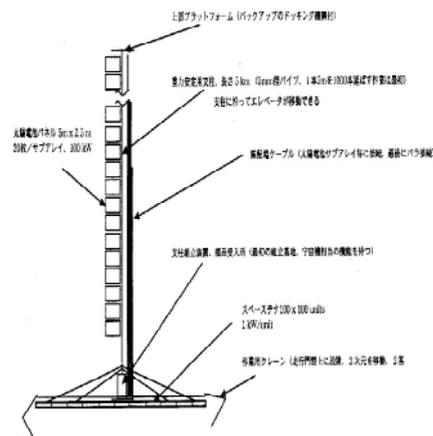


図3 最初のSPSのシステム構成 (システム設計の素案)

図7 低高度軌道SPSの具体例(2000年)

回 SPS シンポジウムでは図 7 に示すような案を示されました。この中で現実的なシステム設計研究が個々の技術の研究と開発のより明確な方向を示すことが必要な時代になっていると強調されました。また 2001 年の第 4 回 SPS シンポジウムでは、“宇宙太陽発電所の工学基準の必要性について” という講演の中で、SPS のような長期に運用される電力事業用巨大システムには工学的な基準や規格が必須であるとして、その適用例を示されました。

民営化をテーマとした 2005 年の第 8 回 SPS シンポジウム (図 8) では、“総合討論:「民営化」のかけ声に、忘れた「常識」を思い出す” というタイトルで講演され、1. 発電衛星研究の原点はエネルギー収支: 事業としての必要なコスト算出と需要の確保、2. 発電事業の計画を開始するための第一条件: 大衆の宇宙旅行ができるくらい安い宇宙輸送の見通しが立つこと、3. 今後研究する価値ある軌道は 2 つ: 静止衛星軌道と赤道衛星軌道、と締めくくられました。

長友先生最後のご講演となった 2006 年 10 月の第 9 回 SPS シンポジウムでは、電力伝送技術に不確定要素があり具体的な SPS のシステム設計が困難な状況にあるとして、SPS 研究会は先行的な宇宙発電研究として月・火星研究の科学ミッションを提案する活動を開始するよう提案されています。

結び

宇宙研では毎年夏に研究成果を一般の方に見ていただくための一般公開が行われます。長友研究室では SPS 関係のだしものを毎回研究室の総力を挙げて準備し展示していました (図 9)。長友先生は学生たちに数ヶ月前から展示物の仕様を決めさせ工程表に従って開発を進めさせることにより、一般公開を SPS に関わる技術だけでなくプロジェクトの進め方についての教育の場とされてきました。無論私たち職員にとっても学びの場であり、これらの活動を通じて、“考えること (思想) の大事さ”、“自ら手を下してものを作ることの大事さ”、“早く実行することの大事さ” を学びました。長友先生には 2 つの大きな夢がありました。一つは再使用型ロケットそしてもう一つが SPS です。再使用型ロケットは最近ついに予備的なプロジェクトの段階に至りました。もう一つの長友先生の夢である SPS についても関係者の力を合わせて軌道上実験プロジェクト実現への第一歩を踏み出すことができるよう全力を尽くしたいと思います。



図 8 第 8 回 SPS シンポジウムでのご講演の様子(2005 年)



図 9 一般公開での自立型太陽発電衛星自動組立装置のデモの様子 (1999 年)