

## SPS2000構造，組立と課題

前野 潤\*・平山 寛\*\*・成尾 芳博\*\*\*

### Methods and Subjects of Construction of SPS2000

By

Jun MAENO\*, Hiroshi HIRAYAMA\*\* and Yoshihiro NARUO\*\*\*

**Abstract** : Since the SPS2000 satellite is a low-density, large-scale structure, the materials required for its construction must be packed up as small as possible by launching with a rocket. Therefore, the tasks which open packages or assemble them in space are needed. In order to build SPS2000, tasks such as assembly of the structures, deployment of the solar-cell panels, assembly of the electric power transmission antenna, and arrangement of power cables are also required. The experimental research concerning robots capable of assembling the structure of SPS2000 has been performed at the Nagatomo laboratory of the Institute of Space and Astronomical Science. This paper describes the knowledge acquired by development of the truss-beam builder and the experimental studies of beam assembly, and future subjects of construction of SPS2000.

#### 概 要

SPSは低密度かつ大規模な構造物なので，出来る限り小さく梱包しないとロケットで打ち上げることが出来ない．このため，宇宙空間で梱包物を展開したり，組み立てる作業が必要となる．SPS 2000 を建設するには，骨格の組立，太陽電池パネルの展開，送電アンテナの展開，配置，配線などの作業が必要になるが，そのうち骨格の組立及び組立に必要なロボットについての研究が，宇宙科学研究所長友研究室を中心として行われてきた．ここでは，歴代のトラスビーム組立ロボットの製作と組立実験を通して得られた知見および今後の課題について報告する．

**重要語** : SPS建設，主構造，トラスビーム，自動組立，ロボット

---

\*石川島検査計測株式会社

\*\*九州大学

\*\*\*宇宙科学研究所

## 1. 研究の目的

研究の目的は、SPSの建設（組立）を行うロボットとして最低限必要な機能を満たし、要求される建設コストで実現できる建設システムとはどのようなものであるかを明らかにすることであった。そこでまず手始めに、以下に述べる設計思想に基づいてトラスビームとロボットを設計、製作し、そのロボットがSPSの建設作業の一部を担うことが出来るかどうか検証してみることにした。

- ・ロボットは簡単なON-OFF制御をベースとして、高級な制御や機構は用いない
- ・動力源には太陽エネルギーを利用し、基本的に補給を必要としない
- ・トラスビームの基本形式はDouble-Bay Single-Laced-Beamsとするが、ロボットへの組立負荷が小さく、低コストのデザインとする

## 2. ロボット実験

設計思想を検証するため、いくつかのロボットの製作と組立実験を行った。組立作業は、SPS建設の大部分を占めるトラスの組立を対象とした。各ステップでの実験テーマを記す。パイプ部材からトラスビームを組み立てることはロボットの負担が大きくなるため、トラスビーム1スパンごとのベースとなる三角フレームはあらかじめ組み立てておくことを基本とした。

検証0：構造と組立の概念計画（1992年度）[ 2 ], [ 4 ]

ロボットによる組立を考慮した差込ラッチ式の3角トラスビーム（Double-Bay Single-Racedトラスビーム）を試作し、主構造であるトラスビームの組立を中心に建設システムの概念設計を行った。

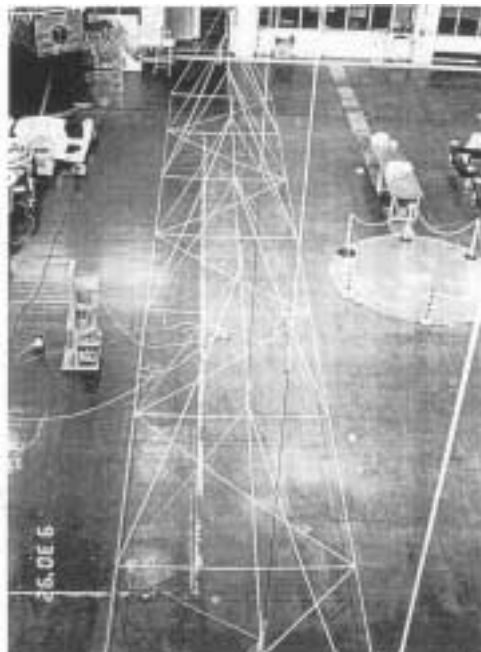


図1 試作トラス構造

図1に試作した実物大トラスを示す。このトラスの組立に必要な機能を検討し、組立作業とロボットの移動が成立する機構モデルの設計を行った。また、全体構造の姿勢安定などを考慮した主構造の建設シナリオと組立口

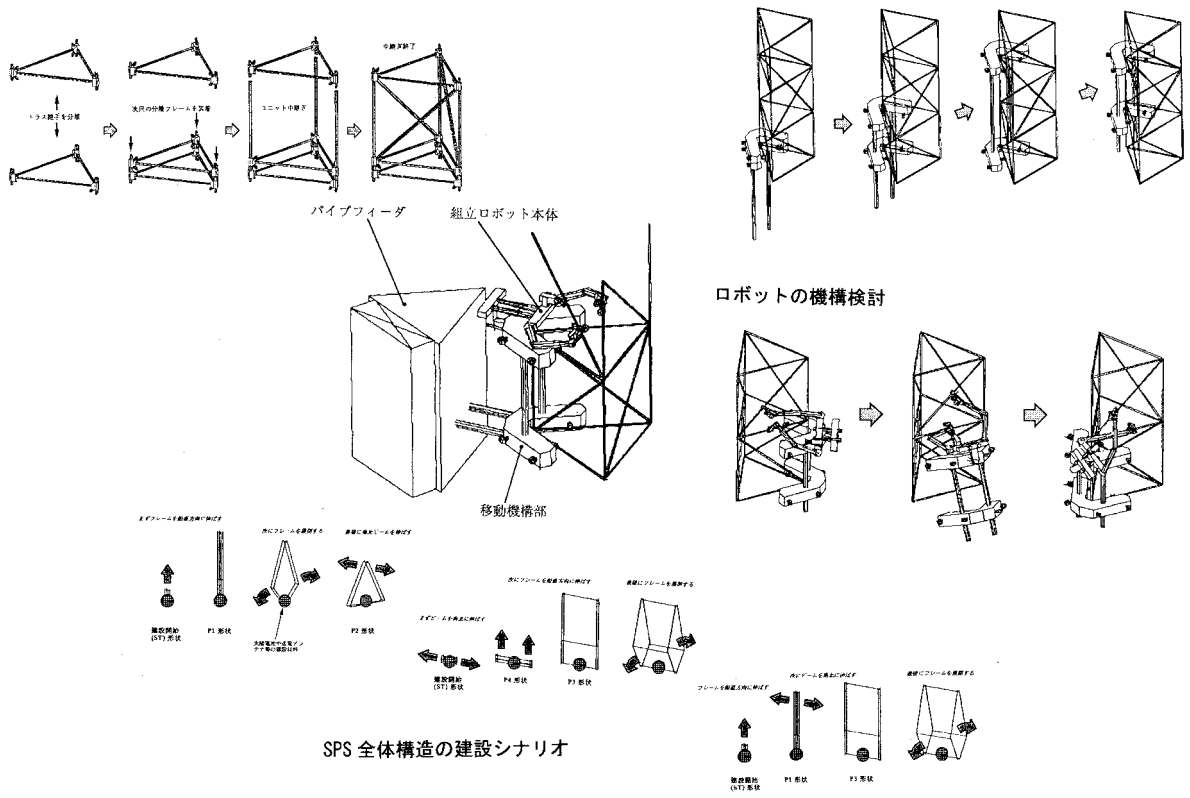


図2 建設ロボットと建設手順

ロボットの概念設計を行い、その成果は福澤によって博士論文[4]としてまとめられた(図2)。

以後、このフェーズで示された概念に基づく組立ロボットを実際に設計、製作し、検証する実験が始まった。

検証1：ロボットによるトラスビーム組立(1991年度)[1],[4],[18]

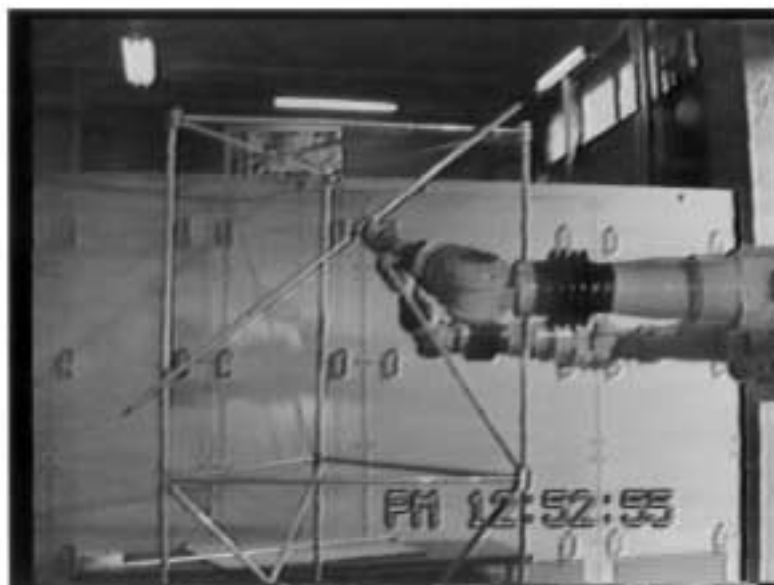


図3 中電ロボットトラス組立実験

中部電力の協力を得て配電作業用双腕ロボットを使って、組立式と展開式の2種類の3角トラスビームについて組立性の評価実験を行い、ロボットによるトラス組立が可能であることを示した。また、組立トラス実験の際、部材結合の最終段階で部材の位置・姿勢を合わせるのに、補助者が目視で確認して操作者に指示を与える必要があったことから、実際のロボットでもカメラ画像による視覚情報が有効であることが指摘された。



図4 パイプハンドラとフレームホルダ

検証2：簡単な機械によるトラスビーム組立（1994～1995年度）[3],[8],[10],[11]

制御を簡単にするため、円柱座標系を採用した5自由度の「パイプハンドラ」と、三角フレームパイプを保持する4自由度の「フレームホルダ」の2台からなる簡単なロボットを製作し、自由度の少ない簡単な機械でもトラスの組立が行えることを示した。これら2台のマニピレータ・ロボットはいずれもON-OFF動作で動作する。また、確実な接点接続を行う事を目的として光源自動追尾実験なども実施した（図4）

検証3：SPS建設を模した自動組立を行う（1996年度）[5],[9],[12],[16],[17]

実際の建設環境を模擬するため、展開構造を持つトラスパーツ群をロボットに搭載し、リレーシーケンスで実現可能な簡単な動作でトラスビームが組み立てられることを示した。この実験では重力による影響



図5 ビームビルダー



図6 トラス部品搭載作業

をキャンセルするため、ロボットは中吊とし、組立てたトラスビームを上下方向へ進展させることによって、装置内部で駆動系への重力の影響を打ち消すことができるようなビームビルダー形式のロボットとした。(図5) また、ロボットの組立負荷を最小限にするため、展開式の部品を組むことでトラスビームが組立てられる新たなトラス(I式トラス)が提案された。実験では、上下へ±10mのトラスを組む設計であったが、工作精度や剛性不足により数段の組立を行うに止まった。また、ロボット内部へトラス部品を搭載する方式であったことからトラス部品の補充方法が課題とされた。(図6)

検証4：太陽エネルギーにより自動組立を行う(1998～1999年度)[6]

ロボットに搭載した太陽電池と簡単な制御系の組み合わせにより、休み休みながらトラスの組立て作業



図7 パイプ接続ロボット

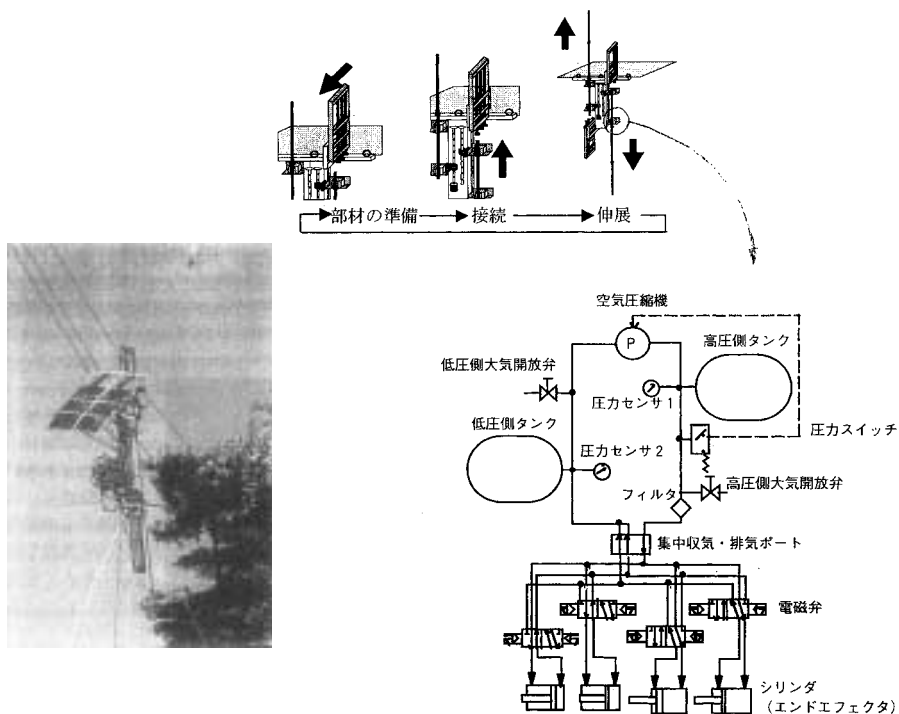


図8 ロボット動作とエネルギー蓄積システム

を行うロボットを試作した。(図7)

このロボットはパイプを接続するという単純な動作しかしないが、トラス部品の供給装置を備え、日の当たっているときだけ動作する「休み休みオペレーション」によって組立作業の継続が可能であることを示した。なお、グリッパ部アクチュエータの駆動には真空中でも成立する閉鎖系の空気圧源を用いてエネルギー蓄積を行うことでピーク電力を押さえることを試み(図8)、良好に動作することを確認した。また、わずかな電力で制御可能とするため、制御装置にはポケットコンピュータを用いた。

### 3. 主構造と試作

組立ロボットの研究と平行し、SPS 2000の現実的な構造設計・建設方法を示すため、数々の形状模型や機能モデルの試作・検討を行った。

#### 試作1：組立式トラスビームと展開式トラスビームの比較(1991年度)[1]

主構造のトラスビーム形式として、Double-Bay Single-Racedトラスビームが採用された。これを軌道上で伸展するにあたって、組立構造と展開構造のどちらを採用するかを決定する必要があった。そこで1/3スケール(スパン長1m)のトラスビームを、両形式で2スパン分製作し、収納効率と製造コストの比較を行った。この試作トラスを使って、検証1のロボット実験にて組立性の評価を行った。

実験の結果、組立トラスビームは双腕協調作業で、展開トラスビームは双腕非協調作業でも伸展可能であることが確かめられた。一方、収納効率と製造コストでは組立トラスビームの方が有利であり、両者のトレードオフの結果、三角フレーム部は結合済みで、長手方向部材と斜め方向部材を軌道上で結合する、部分組立方式が適当と判断された(図9)。

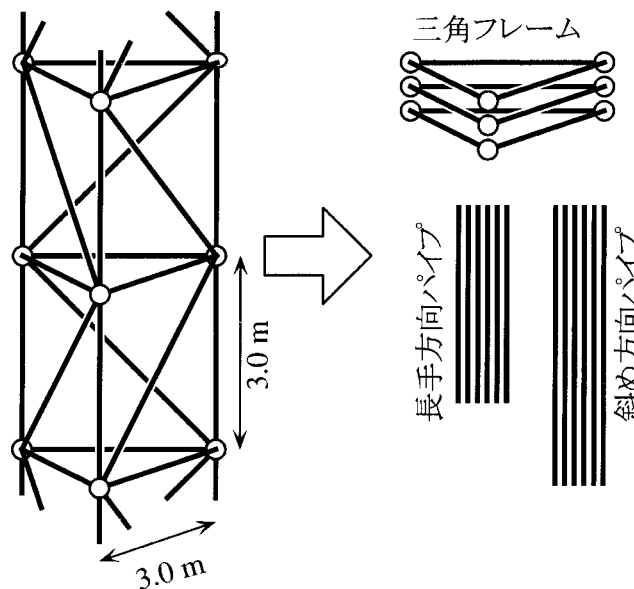


図9 部分組立式Double-Bay Single-Racedトラスビーム

#### 試作2：1/50スケールSPS 2000全体モデル(1992年度)[7]

1/3スケールトラスの試作で主構造トラスビームに関しては知見が得られたが、次に、SPS 2000の全体像を明らかにし、全体の建設で生じる問題点を洗い出すために1/50スケール(一辺約6m)のSPS 2000全体モデルを製作した。これは主構造トラス、太陽電池膜、送電アンテナで構成され、トラスビームに関しては、1スパン60mmで、トラス部材の1本ずつまで厳密に再現された。本モデルの製作の成果とし

て、以下の事項が挙げられる。

まず、SPS 2000 全体構造としての柔軟変形の様子が確認できた。とくに幅 3 m、長さ 330 m の太陽電池膜にねじれが生じやすく、発電量の低下を招く恐れのあることも判明した。

主構造トラスビーム同士のラーメン結合部の形状が具体化された。この部分は非常に複雑なトラス構造となったため、自動ロボットによる組立は困難で、ここだけは手動の遠隔マニピュレータによる組立か、展開構造とすることが妥当であろうと予想された。

### 試作 3：実サイズトラスビーム（1992 年度）[ 1 ]

検証 1 のロボットによるトラスビーム組立実験の結果を受けて、実物と同じ 1 辺 3 m の Double-Bay Single-Raced トラスビームの開発を行った。ここでは、ロボット作業で組立しやすいことと、量産を想定して製造コストが抑えられることを考慮して設計を進めた

このトラスでは、三角フレームと、長手方向・斜め方向部材の接続のために、独創的なラッチ機構を考案した。この機構を用いるとトラス部材のパイプを、ノード部品から突き出しているピンに差し込むだけでラッチされるので、組立ロボットに要求する作業能力を低く抑えることができた。またラッチ機構も簡素な構造で、製造コストを抑えることができた。(図 10)



図10 ラッチ機構

この設計によるトラスビームを 8 段分（全長 24 m）製作し、振動試験に利用した。振動試験は、構造機能試験棟でトラスビームを水平に吊し、ガスジェットスラストで加振力を与えて横振動モードの観測を行った。試験の結果、ビームとしての振動に加えて、トラス部材の局所的な振動も発生することが確認された。また、ラッチ機構のガタの効果により、理論値よりも振動減衰が大きいことも判明した。(図 1)

なお、本トラスビームは柔軟性が大きく、自重で容易に変形・破壊に至るため、地上重力下での試験に際して制限が生じた。横方向に伸展した状態では、各三角フレームを支持する必要があるため、鉛直伸展では 2 段が上限であった。

### 試作 4：1 / 150 スケール建設途中形状モデル（1993 年度）

試作 2：1 / 50 全体モデルで明らかになった建設手順の数々の問題点について、それぞれ具体策を考案

した．その妥当性を検証するために，1 / 150 スケール（全長約 2 m）で建設途中モデルを製作した．それぞれ，第 1 モジュール鉛直伸展後，第 1 モジュールの主構造三角フレーム展開後，主構造南北ビーム伸展後・送電開始時，16 モジュールで完成後，の 4 段階のモデルである．個々のトラスビームは 1 / 50 モデルの物を流用したので，縮尺に 2 重性を生ずるが，建設手順の検証目的には支障が無い．

この建設途中モデルの製作を通して，建設手順に関して検討を要する点が洗い出された．とくに，モジュール増結（南北伸展）の方法として，主構造三角フレームを結ぶ南北ビームの途中を分離して部品を挿入してゆくか，あるいは南北ビームの両端に部品を追加して延長し，それに沿って主構造三角フレームを南北へスライドさせてゆくかという選択がある．前者の場合，南北ビーム上の挿入箇所にはロボットによりアンラッチも可能な，特別な結合機構が必要となる．後者の場合，南北ビームは主構造三角フレームに内接する型式が，スライド移動しやすくできるが，その場合，主構造三角フレームを構成するビームは三角柱の凸面が外側に向き，ロボットがビーム間を乗り移る動作に必要とされる難度が上がる．

本モデルでは，主構造三角フレームは平面を外側に向けて製作した．モデルを用いて検討した結果，主構造ビームは外側に平面を向けて，ロボットの移動が容易なようにし，モジュール増結は南北ビームの特定箇所を分離して挿入する方式が実現性が高いとして選択した．

#### 試作 5：実物サイズトラスビーム（強化型）（1993 年度）

重力傾斜により太陽電池膜に生じる張力を考慮すると，1992 年に製作した実物トラスでは強度が不足することが判明した．そこで，新たな加重条件として，南北主構造ビームの 100 m の区間に分布加重される太陽電池の張力を，区間中央への 5 kgf の集中加重で代表させ，この条件下でもトラス部材が座屈を生じないように，部材寸法を再設計した．その結果，部材寸法は表 1 のように変更になり，SPS 2000 全体での

表1 トラス部材パイプの寸法

	1992年トラス 設計値		1993年トラス 設計値		1993年トラス 実製作値	
	外径	肉厚	外径	肉厚	外径	肉厚
長手方向パイプ	12	0.5	27	1.0	28	1.5
斜め方向パイプ	12	0.5	17	1.0	18	1.0
三角フレームパイプ	10	1.0	12	1.0	12	1.0

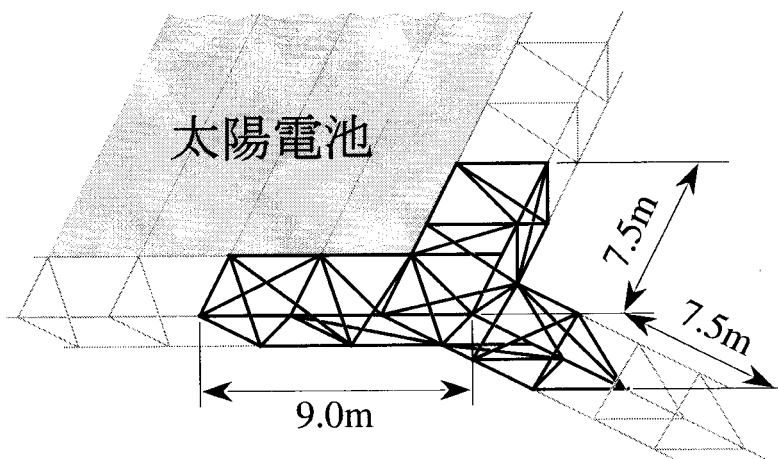


図11 トラスビーム同士のラーメン結合部



トラスビーム質量は11 tonとなった。

この強化した設計に基づき，実物トラスを製作した。このトラスは強度が向上したことにより，小スパンであれば地上重力下でも支持なしに試験が可能であった。そして，今回は試作3で振動試験に供したのと同様の直線トラスビーム10段分（全長30 m）に加え，主構造南北ビームと三角フレームのラーメン結合部を表したトラス構造体（図11）を製作した。この実物トラス製作の成果としては以下の事項が挙げられる。

まず，主構造ビーム同士のラーメン結合部の詳細設計が初めて明らかになったことである。特に，トラス部材のパイプを結合するノード部品は，直線ビーム部ではすべて同一形状で済んでいたが，ラーメン結合部では7種類の形状の異なるノード部品が必要であった。またトラス部材も，直線ビーム部と同じ部品に加えて，長さ1.5 m，3.35 m，5.41 mのパイプ材も必要になった。

このラーメン結合部トラス構造体の組立を手作業で行い，組立手順を検証した。その結果，組立の手順が判明したが，その構造が複雑なこと，扱う部品の種類が多いこと，長い部材があること等が原因で，人間にとっても作業の難度は高く，この部分の組立を自動ロボットで行うことは非常に困難であることが予想された。したがって，この部分だけは手動操縦の遠隔操作マニピュレータ・ロボットで組み立てるか，あるいは展開構造とするほうが有効であると判断した。

このトラス構造に対して，太陽電池シートとウィングサミングバス（集配電用フラットケーブル）を取り付ける治具も，初めて試作した。ロボットによる取り付けのしやすさを考慮して設計されたが，実際に取り付けてみた結果，太陽電池の張力で取り付け治具がトラス部材の軸周りに回転してしまうことが判明し，改良が必要とされた。

さらに，この設計のトラス部材を用いて，建設ロボットのための画像計測実験を行った。トラス部材の先端に設けたマーカーをビデオカメラで撮影し，リアルタイムでパソコンで処理して位置と姿勢を計測するシステムを開発した。実験の結果，トラス部材の差し込み作業に必要とされる，3 mm以下の位置精度を実現するには，カメラからの距離が500 mm以内で作業を行えばよいことがわかった。

#### 試作6：I式オクタヘドラルトラスビーム（1996年度）[ 5 ]，[ 13 ]，[ 15 ]

ビームビルダ形式のロボットで建設しやすいビームとして，対称性の高いオクタヘドラルトラスビームを検討・試作した。各トラス部材の長さは1 mで，SPS 2000のトラスとは型式が異なるが，およそ1/3スケールに相当する。これを上下方向へ10段ずつ，合計約17 m伸展することとした。地上重力下で10段分の自重による圧縮・引張に耐えるよう強度設計した。トラスは三角錐を積み重ねた形に収納され，部分的にバネで自己展開する。（図12）そしてビームビルダの簡単な上下運動と，水平回転によって伸展可能である。収納厚みは25 mm/段，重量は1.5 kg/段を実現した。また，大量生産に向くよう，プレス加工やリベット止めを多用して，低コスト化に努めた。

## 4. 得られた知見

### （1）ロボット実験

#### ア．成果

- ・単純な制御で休み休み働くロボットでも，トラス組立が行えることを示した。
- ・差し込み式やラッチ機構による組立式トラスであれば簡単なロボットで組立可能なことを確認できた。
- ・一部組立済みのトラスや，展開式のトラス部材を用いることで，ロボットの負担を減らすことができた。
- ・ガタや工作精度により接続部の位置精度が悪くとも，接続点を自動追尾する簡単なフィードバック制御

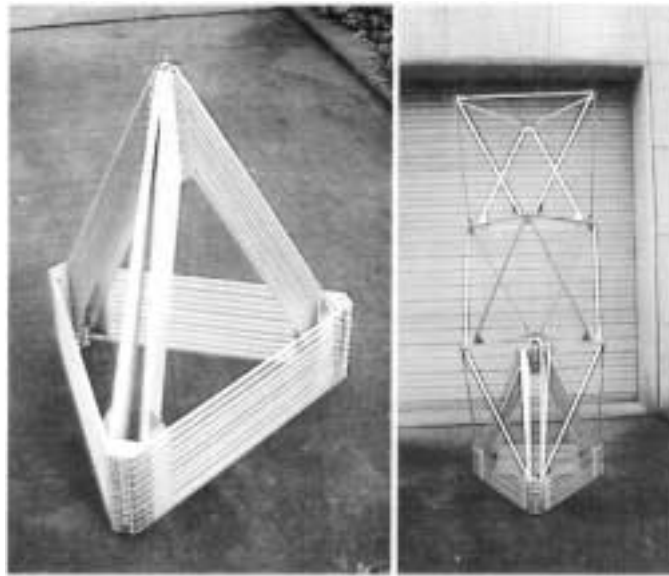


図12 式オクタヘドラルトラスビーム

を行うことで自動組立てが実現可能であることを示した。

イ．実験によって分かったこと

- ・ロボットの移動は、トラスを掴んで伸縮する尺取虫型の移動機構を採用すれば、組立と移動を兼ねることができそうなことが分かった。
- ・2 mを超えるような実スケールに近いロボットの製作では、ロボットの駆動系の工作精度やガタ、フレームの剛性不足が組立作業特にトラスの接続を困難にすることが分かった。
- ・組上げたトラスが長くなって行くと、ロボットのガタや剛性と共に、トラスのガタの影響が出てくる。実験では、組上げたトラスが長くなると傾いたり、ゆれが発生し、組立作業に支障が出るがあった。
- ・トラスの接続部（差し込みラッチ機構）のガタは、建設規模（トラスビーム長さ）が大きくなるにつれ深刻な影響をもたらすと考えられる（ドッキング時の非線形振動や、形状の安定性など）。また、無重力状態における、ガタの残った大型建造物の挙動などについては未知の部分が多い。

(1) 主構造と試作

ア．成果

- ・ロボット組立が可能な簡単な接続機構を持つトラスを実現できた。
- ・トラスビームのコーナー接続部など、SPS全体構造を考慮した実サイズトラスビームの試作と、組立の問題点抽出を行った。

イ．試作によって分かったこと

- ・全体モデルの試作を通じて、トラスビーム以外の建造物の組立上の問題点について、ある程度の知見を得ることができた。

5. 今後の課題

本研究では、主構造トラスビームの組立作業を中心に実験を行ってきた。今後、SPSのような大規模宇宙建造物の建設、運用に必用なトータルシステムを実現するためには、以下に述べる課題が残されている。

### (1) 組立ロボットとトラス

ロボットの負担を減らすには、部分組立済みトラスや展開機能を持つトラスが望ましいが、コスト高になる可能性がある。一方、最も低コストで製作できるパイプ部材組立式(差込式)トラスは、組立作業時のロボットへの負担が大きく、ある程度複雑な機構/制御が必要になる。SPSの規模に応じて、ロボットとトラスの複雑さのバランスを考える必要がある。

実験では1~10段分のトラス部品をロボットに搭載するに止まっている。実際の建設作業では、5000m程度のトラスを組む必要があることから、一度に50~100段分のトラス部品をロボットへ搭載して組立て作業を行う、あるいはトラス部品をロボットへ補充するといった作業を実現する必要がある。

建設のためには、ビーム同士の組立てや展開あるいはトラスの継足しが必要になるが、どのような方法で実現するのかについての具体的な検討及び検証は未着手である。

### (2) トラス構造

トラスの接続部(接点)の設計が要であることが分かった。組立実験を通じて、ラッチ機構のガタが累積することでトラスが傾くなどの現象が見られた。100段以上のトラスでフレームを組むSPS 2000ではこれらのガタが全体構造の剛性に与える特性が無視できない。このガタによる摩擦が振動に対するダンピングとして働く可能性など、有利な点もあるが、許容できる公差やガタを含むトラスビームの挙動などまだ不明な点が多い。

### (3) 建設システム

一連のロボット実験の成果を踏まえ、システム全体の建設と保守を含むSPSの建設に必要なロボット群(トラス組立、太陽電池モジュールの取付け、送電アンテナの組立て、部品配達、保守用クレーン、現場監督機能を持つユニットなど)を設計し、トラス組立以外の作業についてもハードウェアを用いた実証実験段階に進む必要がある。

今までの検討によって、重力安定形状を保ちながら建設を進めるためには、建設速度の下限が存在し、一方で、組立機械で利用可能な電力の制限から、建設速度の上限が存在することが分かった。建設速度によって追加モジュールの打上間隔も決定されるため、これらを考慮した総合的な建設シナリオを再構築する必要がある。

### (4) 保守作業

SPS 2000の運用期間は30年程度と想定されていることからミッション期間中に軌道上での保守作業が必要になると予想される。予想される主な作業は、故障箇所の修理・交換である。通常の故障に加えて、SPS 2000のように大面積かつ長期間のミッションでは、スペースデブリの衝突による損傷の可能性が高い。損傷の度合いによって、若干出力が低下するがそのまま運用可能な場合、修理が必要な場合、部分的に交換を要する場合、全機を破棄せざるを得ない場合、に分かれる。このように、予想される不具合を洗い出し、その場合について、何を直し、何を交換し、何を捨てるのか、そして保守ロボットにはいかなる作業能力が必要とされるのかを明確にする必要がある。

### (5) 廃棄作業

一般の工業製品のライフタイムコストには廃棄コストが含まれる、地上の原子力発電所においても、老朽化した設備の廃棄方法が確立されておらず、大きな問題となっている。SPS 2000においても、ミッション後の廃棄方法がまだ明確にされていない。候補としては、他の衛星と衝突しない軌道に移動するか、地球に落下させるかとなる。落下させる場合でも、少量ずつ分割して大気圏へ突入させるか、あるいは、全機一体のまま正確に制御して洋上に落下させるかという選択がある。これら各廃棄方法の候補について、安全性とコストの観点から研究し、設計にフィードバックすることによって「建設しやすく廃棄もしやすい宇宙構造物」を将来的には開発することが求められよう。

## 6. あとがき

本報告は1992年度から1999年度にかけて宇宙科学研究所宇宙エネルギー工学部門に在籍した東京大学と都立科学技術大学の学生が主体となって行った研究の成果をまとめたものである。

長友信人教授の指導の下で自動組立ロボットに関する研究で博士論文、修士論文あるいは卒業論文をまとめられたのは、福澤修一郎、石井忠司、稲垣直寛、後藤雅己、木俣喜美子、斎藤文雄、長川智憲の各氏である。本報告をまとめるに当たってそれぞれの論文を参考にさせていただいた。また本報告に出てくるロボットや自動組立装置は、宇宙科学研究所の一般公開でデモンストレーションすることを第一の目標として試作されたものである。一般公開の準備には宇宙エネルギー工学部門に属する学生が全員動員された。延べ人数でみると、本研究に関係した学生は8年間で75名に及ぶ。彼らの協力なくしてはこの研究は成り立たなかった。この場を借りて深く感謝いたします。

## 参 考 文 献

- [ 1 ] 福澤修一郎, 長友信人, 村井友廣: 配電作業ロボットを用いたSPS2000主構造ビーム建設実験, 第11回宇宙エネルギーシンポジウム, 1992
- [ 2 ] SPS2000タスクチーム, SPS2000概念計画書 [ 暫定版 ], 1993
- [ 3 ] 石井忠司: 太陽電池直結型宇宙用自動組立装置の可能性について, 東京大学修士論文, 1995
- [ 4 ] 福澤修一郎: 重力傾斜が作用する宇宙構造物の建設工法論および発電衛星建設への適用, 東大博士論文, 1996
- [ 5 ] 稲垣直寛: 重力を内部でバランスさせる機構を持つトラスビーム自動組立機械の試作と評価, 東大修士論文, 1997
- [ 6 ] 木俣喜美子: 太陽発電衛星への応用を目的とした自動組立装置のシステム設計と基礎的実験, 東京都立科学技術大学修士論文, 2000
- [ 7 ] 井上悟志, 長友信人: SPS2000モデル製作の工学的位置づけ, 第36回宇宙科学技術連合講演会, 2B11, 1992.
- [ 8 ] 宇宙科学研究所・太陽発電衛星ワーキンググループ・SPS2000タスクチーム, SPS2000概念計画書, 1993.
- [ 9 ] 平山 寛: 宇宙構造物の自動組立への衛星自動捕捉用画像測定技術の応用, 東京大学修士論文, 1994.
- [ 10 ] 平山 寛, 石井忠司, 吉田浩充, 小笠原正和, 成尾芳博, 長友信人: エネルギー消費を設計パラメータとする自動組立機械の考察, 第38回宇宙科学技術連合講演会講演集, 1C5, 1994.
- [ 11 ] Ishii, T., H. Hirayama: Application of Robots Directly Powered by Solar Cell Array to the Construction of SPS2000, 第14回宇宙エネルギーシンポジウム, 1995.
- [ 12 ] 石井忠司: 太陽電池直結型宇宙用自動組立装置の可能性について, 東京大学修士論文, 1995.
- [ 13 ] 平山 寛, 稲垣直寛: 地上重力下で自動組立機能が検証可能な宇宙構造物に関する実験と考察, 第12回宇宙構造・材料シンポジウム, 80-83, 1996.
- [ 14 ] 稲垣直寛, 平山 寛: 重力の影響を最小化するトラス自動組立機械に関する考察と実験, 第12回宇宙構造・材料シンポジウム, 84-87, 1996.
- [ 15 ] 福澤修一郎: 重力傾斜力が作用する宇宙構造物の建設工法論および発電衛星建設への適用, 東京大学学位論文, 1996.
- [ 16 ] 衛藤雅己: SPS2000主構造トラスビームの建設時間の実験的考察, 東京都立科学技術大学学士論文, 1997.
- [ 17 ] 平山 寛, 稲垣直寛, 衛藤雅己, 中野健二: 地上で機能検証が可能なトラスビーム組立機械の開発, 第41回宇宙科学技術連合講演会講演集, 659-664, 1997.
- [ 18 ] Hirayama, H., N. Inagaki: Development of an Automatic Truss Beam Builder for Verification on the Ground, 22nd ISTS, 98-b-12, 1998.
- [ 19 ] 福澤修一郎: ロボットによる宇宙構造物の地上組立実験, 日本航空宇宙学会誌, 383-392, 1998.