

## 放物面体を支持する骨組構造物\*

大滝英征<sup>\*1</sup>, 石川義雄<sup>\*1</sup>, 綿貫啓一<sup>\*1</sup>

## Structures Which Support the Parabolic Structural Surface

Hideyuki, OHTAKI, Yoshio ISHIKAWA and Keiichi WATANUKI

Structures which can be modified to make fine adjustments to arbitrary structural surfaces have been investigated in the construction of space structures. Considering the geometrical configuration of these structures, the same concept might be applied to structures such as those which are used in collecting sunlight. In this paper, we describe a designing method by which to build structures that can be extended and adapted to a parabolic structural surface.

**Key Words:** Design Engineering, Adaptive Structures Parabolic Surface, Geometric Configuration

## 1. ま え が き

展開時には放物面体を支持し、収納時には小容積に折り畳み運搬できる骨組構造物が、太陽熱等の効果的な収集に役立つものと期待される。このような展開あるいは収納可能な構造物に関しては、ロケットで運搬し、宇宙空間で展開することを前提とした研究が推進されている。例えば、海外にあっては、NASAを中心にして研究が推進され、その研究状況および将来的な展望が Blankenship<sup>(1)</sup> や Wada<sup>(2)</sup> らによって紹介されている。国内にあっては、宇宙科学研究所を主体として研究がなされ、成果<sup>(3)~(6)</sup>も発表されている。そして、織笠<sup>(3)</sup>らは、既に提案された展開構造物について収納、展開特性を大別し、その特長をまとめ上げている。それによると、ほとんどが3本の骨材で囲って三角平面を構成し、それをある周期性を持って組上げ基本骨組としている。しかし、このような骨組だけでは、自由度が大きく、一定の姿勢を維持する構造物を構築するのは難しい。そこで、ワイヤなどを補助的に使用して、自由度を減らす工夫がなされている。宇宙空間で組立て、頻繁に持ち運びをしないような場合は良い

が、本研究で志向しているような構造物の場合は、極力骨組だけで、自由度の小さいものを構築する必要がある。

本報では、収納時には直方体に折り畳まれ、展開時には放物面体を支持できるような骨組構造物を試作したので報告する。

## 2. 骨組構造物の単位となる骨組

図1(a)は大きな構造物を構築するに当たって、単位とした骨組(基本骨組と呼ぶことにする)を示したものである。この骨組をいくつか連結させた場合、各ジョイント部を包絡してできる面が放物面となれば放物面体を支持できることになる。

この基本骨組は、①~⑫の12本の骨材、⑬~⑯の4本の斜め材およびA, B, I, O等の12個のジョイント部から構築されている。

ジョイント部への各骨材の取付け(対偶となる部分)は、構造物全体の自由度を勘案し、その骨材が一平面内にしか回転しないようにした。例えば①、⑥、⑪等の骨材の回転はxz平面と並行な平面内に限定される。同様に、③、④、⑤等の骨材の回転はyz平面と並行な平面内に限られる。⑬、⑯等の斜め材の回転はz軸を含みx軸、y軸からそれぞれ45度の角度をなす平面

\* 原稿受付 平成4年5月8日。

\*1 正員, 埼玉大学工学部 (〒338 浦和市下大久保 255)。

内に限定されるという具合である。

さて、ここで、基本骨組の自由度を計算してみる。ジョイント部も骨材とみなすと、骨材の総数は28となる。対偶は、いずれも1自由度の回転対偶であり、その総数は32である。構造体の、自由度に関する式

$$F=6(N-1)+\sum(6-f)\cdot N_f$$

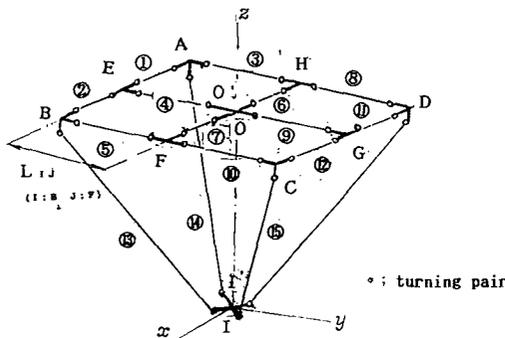
$N_f$ : 自由度  $f$  の対偶の数

$N$ : 骨材の総数

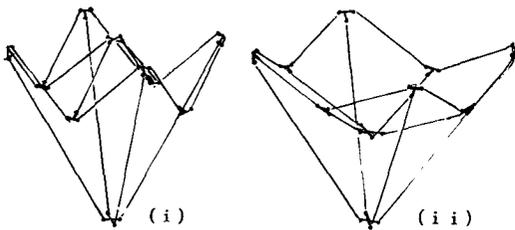
に上記の数値を代入すると、 $F=2$ となる。

自由度2ということは、いずれかの骨材を回転変位してやれば、図1(b)に示した二つの変位状態を生じることを意味している(ただし、骨材の幾何学的寸法を選択し、いずれかの形態に決めれば自由度は1として扱える)。収納時の条件を考慮し、いずれの形態を選択するかは後述する。

さて、図1(a)にては、ジョイント部O、O'およびI、I'は互いに分離している。これは、自由度を求めるに当たって、骨材の幾何学的形状寸法が考慮されていないためである。そこで、①~⑫の骨材同士の寸法および⑬~⑮の斜め材同士の寸法を等しく取ってやれば、変位はz軸に関し軸対称となるので、一体化して扱っても良くなる。以後は、骨材の寸法に上記の制約を付け、O、O'および、I、I'は一体化しているものと



(a) 骨材およびジョイント部の配置



(b) 変位形態

図1 基本骨組

して扱う。また、図1の骨組では、z軸方向の剛性が零であるので、実際的な製作時にはジョイントI'部に固着した骨材IO'を設け(自由度には関係しない)、展開時にOとO'とを接続して剛性を維持するようにした。

次に、この基本骨組を連結させた場合を検討してみる。連結の方法としては、図2に示したように、面を構成するための骨材①、②、⑪、⑫などは隣の基本骨組のものと同共有するようにする。このようにすると、左側の骨材のいずれかを回転変位してやればそれに対応した形状に連結部の骨材も変位する。連結部の骨材が変位すれば、右側の骨組自体も自由度1であるので、ある定形の形状へと終息する。このようにして、連結構造体も一つの形状を構築する。

ただし、この際、⑪、⑫などは共有しているものの、右側の基本骨組のジョイント部Q(Q'と一体化して扱える)は任意な位置に固定できる。これによって、右と、左の基本骨組にはある程度角度を持たせることができる。このことが、上部に配置されるようになるジョイント部で放物面体を支持できるゆえんである。

次に、この基本骨組では前述したように図1(b)に示した(i)、(ii)の変位形態が考えられる。この変位形態はとりもおさず、収納形態ともなる。そこで、この2者について収納という側面から検討してみた。この際、骨組自体は自由度1であり、折り畳み可能であることは言うまでもない。そこで、寸法的な許容範囲に焦点を絞って検討する。ただし、ジョイント部の寸法は骨材の寸法に比べ小さいので、骨材の寸法にジョイント部の寸法をも含め、図1中に示した $L_{ij}$ をジョイント部Iとジョイント部Jをつなぐ等価骨材長さとした。図3は等価長さで示した骨組の収納途上の形態を改めて示したものである。

(i)の収納形態；ジョイント部Oが上方に引き上げられ、ジョイント部A、B、C、Dが互いに近づく。

$$\begin{aligned} L_{IA}-L_{AE}+L_{EO} &= L_{IA}-L_{AH}+L_{HO} \\ &= L_{IB}-L_{BE}+L_{EO} = L_{IB}-L_{BF}+L_{FO} \end{aligned}$$

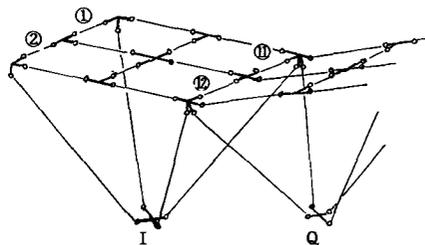


図2 基本骨組の連結

$$\begin{aligned}
 &= L_{IC} - L_{CF} + L_{FO} = L_{IC} - L_{CG} + L_{GO} \\
 &= L_{ID} - L_{DG} + L_{GO} = L_{ID} - L_{DH} + L_{HO} \\
 &\dots\dots\dots(1)
 \end{aligned}$$

ただし

$$\begin{aligned}
 &L_{IA} > L_{AE} - L_{EO}, \quad L_{IA} > L_{AH} - L_{HO} \\
 &L_{IB} > L_{BE} - L_{EO}, \quad L_{IB} > L_{BF} - L_{FO} \\
 &L_{IC} > L_{CF} - L_{FO}, \quad L_{IC} > L_{CG} - L_{GO} \\
 &L_{ID} > L_{DG} - L_{GO}, \quad L_{ID} > L_{DH} - L_{HO}
 \end{aligned}$$

(ii)の収納形態：ジョイント部Oが下方方向に押し下げられ、ジョイントA, B, C, Dが互いに、近づく

$$\begin{aligned}
 &L_{IA} - L_{AE} - L_{EO} = L_{IA} - L_{AH} - L_{HO} \\
 &= L_{IB} - L_{BE} - L_{EO} = L_{IB} - L_{BF} - L_{FO} \\
 &= L_{IC} - L_{CF} - L_{FO} = L_{IC} - L_{CG} - L_{GO} \\
 &= L_{ID} - L_{DG} - L_{GO} = L_{ID} - L_{DH} - L_{HO} \\
 &\dots\dots\dots(2)
 \end{aligned}$$

ただし

$$\begin{aligned}
 &L_{IA} > L_{AE} - L_{EO}, \quad L_{IA} > L_{AH} - L_{HO} \\
 &L_{IB} > L_{BE} - L_{EO}, \quad L_{IB} > L_{BF} - L_{FO} \\
 &L_{IC} > L_{CF} - L_{FO}, \quad L_{IC} > L_{CG} - L_{GO} \\
 &L_{ID} > L_{DG} - L_{GO}, \quad L_{ID} > L_{DH} - L_{HO}
 \end{aligned}$$

ここで、(i)の形態と(ii)の形態の特徴を比べてみる。(i)では、展開し切っ時、極端な場合には、ジョイ

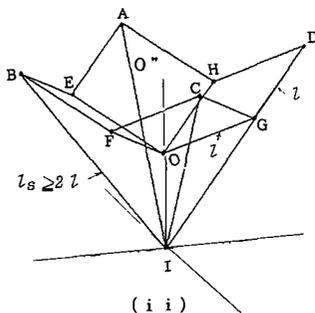
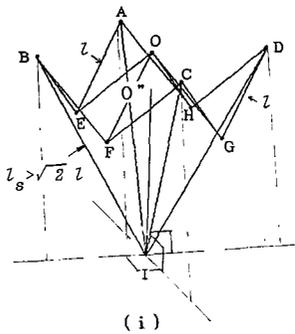
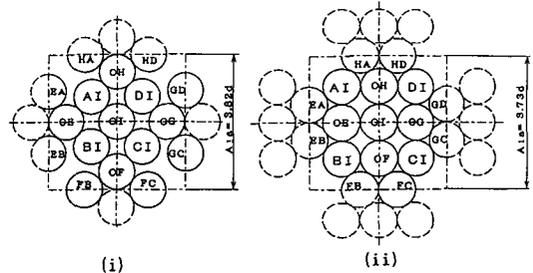


図3 基本骨組の収納形態(10"は展開時に、OとO"を接続しz軸方向剛性を維持するためジョイント部Iに面着した骨材)

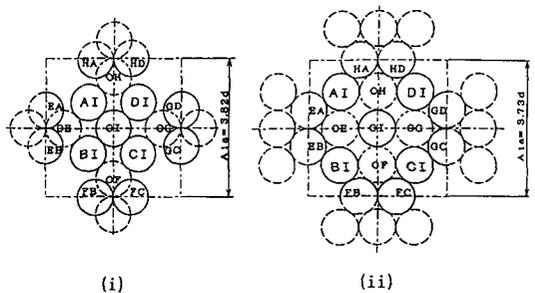
ント部Iがジョイント部Oにほぼ一致するような位置にまで来てても問題はない。それゆえ、斜め材の最小限界寸法は、上部を構成する骨材の寸法の $\sqrt{2}$ 倍となる。それ以上の寸法であれば、任意に選べるが、あまり長いと収納時における全体的な体積が大きくなる。

一方(ii)では、斜め材の長さは、図からもわかるように上部を構成する骨材の2倍以上を必要とする。また、収納時には上部を構成する骨材のうち4本が下のほうに畳み込まれるのが特徴である。

次に、収納後のジョイント部の配置と、折り畳まれた構造体の横断面の寸法および形状を比較してみた。骨材断面はすべて円形とし、収納した場合骨材同士は極力密着するようにした。収納方法としては、上記の各形態に対して図4に示したような(i), (ii)が考えられる。(i)は斜め材が中央部に、そしてその回りに上部を構成するに必要な骨材OH, OE, OF, OGが配置される。最外周には骨材HA, EA, EB, FGなどが配置される形となる。(ii)は、斜め材と上部を構成するに必要な骨材OH, OE, OF, OGが中央部において



(i)に対するジョイント部の配置



(ii)に対するジョイント部の配置

A<sub>1a</sub>: 基本骨組収納時における直方体の一辺長さ

図4 収納時のジョイント部の配置(英字は骨材の名称を意味する。点線の部材は、連結した場合の隣接骨材)

交互に配置される形になる。いずれの場合も、直方体形状に納まり、しかもその断面積には差がないようである。

本報では、収納形態としては収納時の体積をより小さく抑えうる可能性のある図3(i)を採用することとした。また、ジョイント部の配置は長寸法である斜め材と、短寸法である他の骨材とが交互に配置される図4(ii)が外観、操作性とも良いと考え、採用した。

### 3. 基本骨組の連結

次に、基本骨組を複数連結させた場合に、各ジョイント部を包絡して放物面を構築できるかどうか検討す

る。連結は簡便のため図5(a)のように9個とした。

骨材の諸元計算に当たって、各ジョイント部の名称を図5(b)のようにした。中央にくるジョイント部を(0, 0, 0)とし、*x*軸方向、*y*軸方向へそれぞれ*i, j*スパンだけずれた位置に来るジョイント部を(*i, j, 0*)とする。また、そのジョイント部の下部であたかも基本骨組のジョイント部Iに該当するジョイント部を(*i, j, -1*)と表す。そして、各ジョイント部の座標値を*x(i, j, k)*, *y(i, j, k)*, *z(i, j, k)*で表すこととした。また、ジョイント部(*i, j, k*)とジョイント部(*l, m, n*)を結ぶ骨材の等価長さを*L(i, j, k; l, m, n)*とする。展開した場合には

$$\begin{aligned}
 &L(i-1, j-1, 0; i, j, -1) - L(i-1, j-1, 0; i, j-1, 0) + L(i, j-1, 0; i, j, 0) \\
 &= L(i-1, j-1, 0; i, j, -1) - L(i-1, j-1, 0; i-1, j, 0) + L(i-1, j, 0; i, j, 0) \\
 &= L(i+1, j-1, 0; i, j, -1) - L(i+1, j-1, 0; i, j-1, 0) + L(i, j-1, 0; i, j, 0) \\
 &= L(i+1, j-1, 0; i, j, -1) - L(i+1, j-1, 0; i+1, j, 0) + L(i+1, j, 0; i, j, 0) \\
 &= L(i-1, j+1, 0; i, j, -1) - L(i-1, j-1, 0; i, j+1, 0) + L(i, j+1, 0; i, j, 0) \\
 &= L(i-1, j+1, 0; i, j, -1) - L(i-1, j-1, 0; i-1, j, 0) + L(i-1, j, 0; i, j, 0) \\
 &= L(i+1, j+1, 0; i, j, -1) - L(i+1, j-1, 0; i, j+1, 0) + L(i, j+1, 0; i, j, 0) \\
 &= L(i+1, j+1, 0; i, j, -1) - L(i+1, j-1, 0; i+1, j, 0) + L(i+1, j, 0; i, j, 0), \\
 &(i=-2, 0, 2, j=-2, 0, 2) \dots\dots\dots (3)
 \end{aligned}$$

の関係がある。

ここで、上部に配置された骨材は、すべて同一寸法であるから、上式は

$$\begin{aligned}
 &L(i-1, j-1, 0; i, j, -1) = L(i+1, j-1, 0; i, j, -1), \\
 &L(i-1, j+1, 0; i, j, -1) = L(i+1, j+1, 0; i, j, -1) \dots\dots\dots (4)
 \end{aligned}$$

と書き改められる。

次に、上部に配置された骨材だけを取り出し、そのジョイント部を包絡させて、放物面を構築させた場合のジョイント部の座標値を計算する。いま、焦点距離を*a*とし、各骨材の等価長さを*l*とおくと

$$\left. \begin{aligned}
 &\{x(i, j, 0) - x(i+1, j, 0)\}^2 + \{y(i, j, 0) - y(i+1, j, 0)\}^2 + \{z(i, j, 0) - z(i+1, j, 0)\}^2 = l^2 \\
 &\{x(i, j, 0) - x(i, j+1, 0)\}^2 + \{y(i, j, 0) - y(i, j+1, 0)\}^2 + \{z(i, j, 0) - z(i, j+1, 0)\}^2 = l^2 \\
 &\{x(i, j, 0) - x(i-1, j, 0)\}^2 + \{y(i, j, 0) - y(i-1, j, 0)\}^2 + \{z(i, j, 0) - z(i-1, j, 0)\}^2 = l^2 \\
 &\{x(i, j, 0) - x(i, j-1, 0)\}^2 + \{y(i, j, 0) - y(i, j-1, 0)\}^2 + \{z(i, j, 0) - z(i, j-1, 0)\}^2 = l^2 \\
 &z(i, j, 0) = (1/4a)\{x(i, j, 0)^2 + y(i, j, 0)^2\}
 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

また、構造体は*xz*, *yz*平面および*z*軸を含み、*x, y*軸からそれぞれ45度の角度をなす平面に対して対称となるので

$$\begin{aligned}
 &x(i, j, 0) = x(-i, j, 0) = x(i, -j, 0) = x(-i, -j, 0) = y(i, j, 0) = y(-i, j, 0) = y(i, -j, 0) = y(-i, -j, 0) = \\
 &z(i, j, 0) = z(-i, j, 0) = z(i, -j, 0) = z(-i, -j, 0) \dots\dots\dots (6)
 \end{aligned}$$

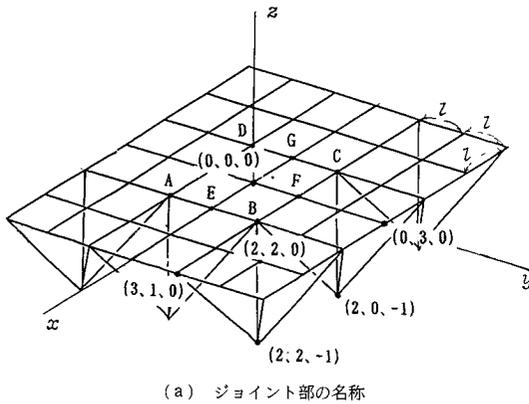
ここで、ジョイント部(0, 0, 0), (0, 1, 0), (0, 2, 0), (0, 3, 0)を放物面を規定するための基準とする。すなわち、

$$\left. \begin{aligned}
 &x(0, 0, 0) = 0 \\
 &y(0, 0, 0) = 0 \\
 &z(0, 0, 0) = 0 \\
 &x(0, 1, 0) = 0 \\
 &x(0, 2, 0) = 0 \\
 &x(0, 3, 0) = 0
 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (7)$$

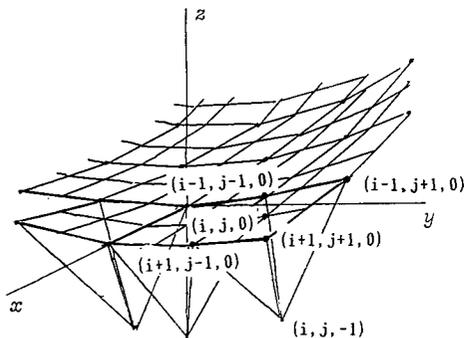
とする。

式(5)~(7)により各ジョイント部の座標値を求める。手順としては、構造体上面があたかも水平面を構成するように展開し切った状態における構造体の横幅  $D_0$  とあらかじめ設定した焦点距離  $a$  とより、 $\gamma (= a/D)$ 、ただし、 $D$ : 構造体の横幅の初期値 [図4(a)では、 $D_0=6l$ ,  $\gamma=a/D_0$ ] を求める。そして式(5)~(7)を利用してジョイント部  $(0, 0, 0)$ ,  $(0, 1, 0)$ ,  $(0, 2, 0)$ ,  $(0, 3, 0)$  の座標値を求める。この座標値より構造体の横幅  $D$  が新たに求まる。そこで、新たに求まった構造体の横幅  $D$  と、焦点距離  $a$  の比  $\gamma = a/D$  が所定の値になったかどうか、判定を加える。所定の値に至っていない場合は、 $D$  の値を少し変更し再度計算を行う。 $D$  の値の変更法は、数学的手法として周知の逐次二分法に依った。このようにして、放物面を構成するジョイント部の座標値を求めることができる。

次いでさらに、斜め材については図5(b)に示したように、4点  $(i+1, j+1, 0)$ ,  $(i+1, j-1, 0)$ ,  $(i-1, j+1, 0)$ ,  $(i-1, j-1, 0)$  より等しい距離にあるように



(a) ジョイント部の名称

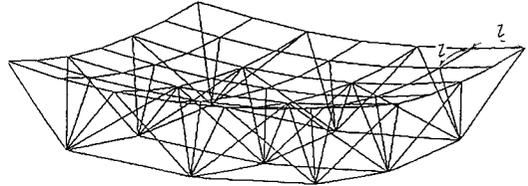


(b) 上部の面を構築する骨材と斜め材の位置関係

図5 骨組構造体の座標

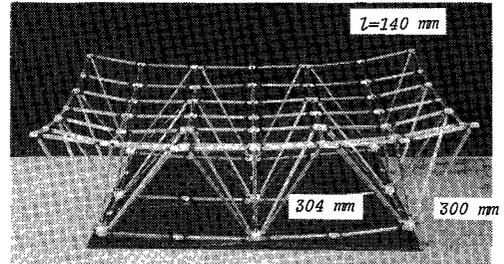
ジョイント部  $(i, j, -1)$  部の座標値を求める。その際、折り畳んだ場合の外観などを考慮したうえで、斜め材の寸法  $l_s$  は既に決定されているものとする。すると、

$$L(i+1, j+1, 0; i, j, -1) + L(i+1, j+1, 0; i, j+2, -1)$$

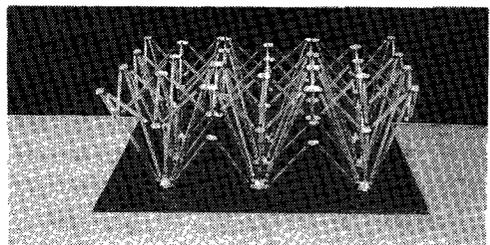


$l=140 \text{ mm}$   
 $a=835 \text{ mm}$

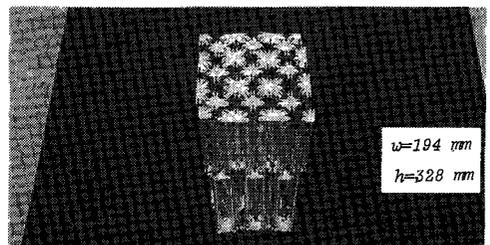
図6 放物面を構築する骨組構造体の計算例



(a) 展開し切った状態

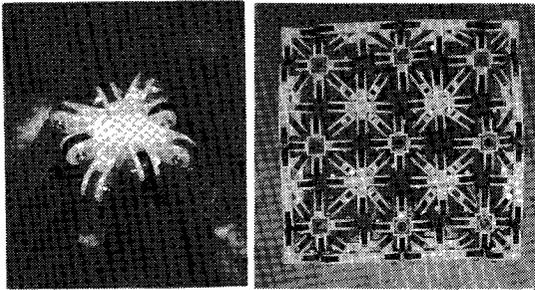


(b) 折り畳み、収納途上の状態

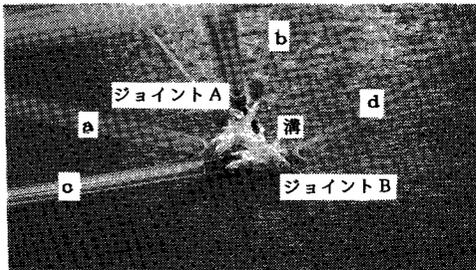


(c) 折り畳み完了の状態

図7 試作した放物面を構築する骨組構造体



(a) ジョイント部の構造 (b) ジョイント部の並び



(c) 四隅に位置するジョイント部

図 8 ジョイント部の構造および並び

$$\begin{aligned}
 & -L(i, j+2, -1; i, j, -1) - 2l = 0 \\
 & L(i-1, j+1, 0; i, j, -1) \\
 & + (i-1, j+1, 0; i, j+2, -1) \\
 & -L(i, j+2, -1; i, j, -1) - 2l = 0 \\
 & \dots\dots\dots (8)
 \end{aligned}$$

ここで、放物面を構成する各ジョイント部の座標値は既に求まっているので、この値を式(8)に代入し、斜め材の長さが所定の寸法  $l_0$  になるように、ジョイント部  $(i, j, -1)$  の座標値を求める。

以上に従って解析した結果、斜め材のジョイント部のうち、 $(0, 0, -1)$ ,  $(0, 2, -1)$ ,  $(2, 0, -1)$ ,  $(0, -2, -1)$ ,  $(-2, 0, -1)$  の座標値は求まるが、四隅に位置するジョイント部  $(2, 2, -1)$ ,  $(2, -2, -1)$ ,  $(-2, 2, -1)$ ,  $(-2, -2, -1)$  については、斜め材の寸法を一樣に  $l_0$  としたことから一義的に決定できない。そこで、寸法的な制約をこれらの骨材については解除すれば良いわけで、収納の容易さをも考慮し、これらの骨材の寸法間には

$$\begin{aligned}
 & L(i+1, j+1, 0; i, j, -1) \\
 & = L(i-1, j-1, 0; i, j, -1) \\
 & L(i-1, j+1, 0; i, j, -1) \\
 & = L(i+1, j-1, 0; i, j, -1) \\
 & \dots\dots\dots (9)
 \end{aligned}$$

の関係が成立するものとした。これによって、各ジョイント部の座標値が求まることとなった。ただし、上記四隅のジョイント部では、2組の長さの異なる骨材が組付けられていることになる。したがって、収納時には、展開時に一体となっていたジョイントを二つに分割できるようにしなければならない。

図6は上記に示した各算出式に従ってジョイント部の座標値を求め、展開し切った構造体の状態を示した例である。構造体の形状維持を図るには、下部のジョイント部を地表にでも固定すれば良い。しかし、実際の構造体を考えると、ジョイント部を地表面に固定するのは面倒なので、むしろ下部に位置するジョイント部間を骨材で結んで位置を固定してしのが得策である。図ではこの考えに従って、下部に位置するジョイント部間を骨材で結んで示してある。ただし、この骨材には内部応力を生じる。

図では、上部を構成する骨材の長さを 140 mm、四隅以外の斜め材の長さ 304 mm (四隅に使用する斜め材の長さは結果として 300 mm)、焦点距離は 835 mm とした。ただし、これらの諸寸法は、前述したようにジョイント部の寸法をも考慮した等価的なものである。

4. 展開構造体の試作

図6のシミュレーション結果に基づき展開構造体を試作した。図7はそれを示したものである。ただし、ジョイント部の寸法は、収納時に構造体が、うまく直方体に納まるよう図4の結果に従い概略値は決定したが、細部は試行錯誤の上決定した。下部に横方向に入れた骨材は、形状保持用のものである。収納時には、中央部に設けたジョイント部で折れ曲がる。

(a)は展開し切った状態を示したもので、上部に位置するジョイント部を包絡すれば放物面が構築できていることがうかがい知れる。(b)は収納途上を示したもので、最終的には(c)のように直方体の形で収納される。

図8(a),(b)はジョイント部単体の構造およびジョイント部の並びを示したものである。(c)は四隅の骨材を支えるジョイント部の構造を示したものである。これは式(9)の上式で表現される骨材に該当する骨材 a, b を支えるジョイント A と式(9)の下式で表現される骨材に該当する c, d を支えるジョイント B とで構成されている。そして、構造体の展開時には、ジョイント B の溝にジョイント A がはめ込まれ一体となる。

## 5. ま と め

ここでは、太陽熱等の効果的な収集を目的とし、放物面体を支持できるような骨組構造を検討した。この場合、いかにして、自由度の小さい基本骨組を構築するかが課題であるが、本報で述べたものは比較的容易に製作できた。しかし、収納時には問題にならないが、展開時にどうしても補助部材を入れて形状保持を図らざるを得ない側面を持つ。適切な補助部材の入れ方およびその強度などは今後に残された課題である。

## 文 献

- (1) Blankenship, C. P., *International Pacific Air & Space Technology Conference Proceedings*, (1988), 243.
- (2) Wada, B. K., *Mech. Eng.*, (1990), 41.
- (3) 織笠・ほか 4 名, 第 6 回宇宙構造物シンポジウム, (1990-11), 26.
- (4) 小野田・市田・ほか 2 名, 第 1 回宇宙構造物研究会, (1985-11), 84.
- (5) 小野田・ほか 4 名, 第 3 回宇宙構造物研究会, (1987-11), 1.