可変長部材を有する展開トラス構造の設計に関する研究*

中村 邦彦^{*1}, 菊地 正明^{*2}, 古川 功一^{*3}Design of a Deployable Antenna Truss Structure
with Variable-Length Members

Kunihiko NAKAMURA, Masaaki KIKUCHI and Kouichi FURUKAWA

We describe how to build three-dimensional deployable truss structures from the viewpoint of deployment reliability. We propose a method for designing a closed-loop deployable truss structure for a future large space antenna by using a kinematic degree-of-freedom analysis of the mechanical system. Using this method, it is possible to attain a truss structure with the appropriate constraints. We have designed and fabricated a prototype of the proposed antenna truss structure, and have achieved successful deployment under the microgravity environment yielded by the parabolic flight trajectory of an aircraft. Thus we have demonstrated the effectiveness of the deployable truss structure design using the kinematic degree-of-freedom analysis.

Key Words: Design, Computer Aided Analysis, Machinery, Design Engineering, Space Equipment, Dynamics, Measurement, Multibody System

1. 緒 言

今後予想される通信需要の増大, 高度化, 多様化の要求を満たすためには, 経済的な衛星通信システムの構築が必要とされ, 衛星に搭載されるアンテナに対して大形化の要求が強まっている. 搭載アンテナの大形化は, アンテナ利得の向上による地球局の小形化, 伝送容量の増大等の利点を生み, またマルチビーム技術の併用で周波数資源の有効活用を図れる等, 衛星通信システムの経済性向上を実現する上で不可欠の開発要素であると考えられている.

アンテナの大形化は, 打ち上げロケットのフェアリングサイズの制約から構造上の工夫を必要とする. 現状では, 打ち上げ時は小さく折り畳み, 軌道上で自動展開する展開構造が有力である. 展開構造にはいろいろなタイプがあるが, 軽量, 高収納性, 高剛性および高精度等の性能に加えて, 大規模構造への拡張性という点でトラス構造が優れ, そのなかでも伸縮する可変

長部材をもつトラスが曲面形成の上で有利になると考えられる.

展開トラスは, 多数のリンク部材をジョイントで連結し, 斜部材を伸縮させて収納展開運動を行わせる. したがって展開運動はその可否も含めてジョイントの構成の仕方に大きく影響される. 過拘束にすると剛性が高くなる一方で運動学的には余剰拘束が多くなり, 誤差の影響を受けやすくなって展開途中で動けなくなることあり得る. 逆に拘束の極端に少ない構成では系の自由度が増え, 斜部材だけでは駆動部分が足らなくなり, 目標とする展開姿勢を得るのが困難になることが予想される.

展開トラス構造物に関する研究は, 今までに展開構造の概念^{(1)~(4)}や振動特性^{(5)~(7)}に関して数多くの報告がなされている. しかし, 展開の信頼性という観点から三次元展開トラス構造の構成法を論じたものは, ほとんどみられないようである.

本論文では, アンテナバックストラクチャを構成する閉ループの展開トラス構造を設計するにあたり, 機構の運動自由度に着目した解析をトラスの構成決定に導入することを提案する. この設計法に基づいてアンテナトラスを設計, 試作し, 航空機の放物飛行によって得られる微小重力環境下で展開試験を行って, 本

* 原稿受付, 1995年10月6日.

^{*1} 正員, (株)東芝 研究開発センター (〒210 川崎市川崎区浮島町4-1).^{*2} (株)東芝 研究開発センター (〒210 川崎市幸区小向東芝町1).^{*3} (株)東芝 小向工場 (〒210 川崎市幸区小向東芝町1).

設計法の有効性を検証した。

2. トラス構成の決定

2.1 モデル化 トラスを構成する各リンク部材を剛体として、トラスを nb 個の剛体で構成される機構システムと考える。座標系は直交座標系をとり、慣性座標系 $x-y-z$ に対する各剛体の重心に設定されたローカル直交座標系 $x'-y'-z'$ の原点位置と座標軸の方向を一般化座標にとる。慣性座標系の原点からローカル座標系の原点までのベクトルを $\mathbf{r}$ で表し、座標軸の方向を記述する一般化座標にオイラーパラメータ $\mathbf{p}^{(8)}$ を用いると、 i 番めの剛体および機構システム全体に関する一般化座標ベクトルは、それぞれ次式で表せる。

$$\mathbf{q}_i = [\mathbf{r}_i^T, \mathbf{p}_i^T]^T = [\mathbf{r}_i^T, e_{0i}, \mathbf{e}_i^T]^T \\ = [x_i, y_i, z_i, e_{0i}, e_{1i}, e_{2i}, e_{3i}]^T \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\mathbf{q} = [\mathbf{q}_1^T, \mathbf{q}_2^T, \dots, \mathbf{q}_{nb}^T]^T \quad \dots\dots\dots (2)$$

剛体間を連結するジョイントを幾何学的な拘束とし、摩擦を無視するものとすれば、これはよく知られているようにホロノミックな拘束式で表せる⁽⁹⁾。剛体上にローカル座標系での位置ベクトルが $\mathbf{s}^P$ である点 P をとり、点 P を原点とする直交座標系 $x''-y''-z''$ を剛体に追加し、ジョイントの設定軸を z'' 軸にとってジョイント座標系を定義する。ジョイント座標系 $x''-y''-z''$ の原点 P の慣性座標系 $x-y-z$ における位置ベクトルは

$$\mathbf{r}^P = \mathbf{r} + \mathbf{A}\mathbf{s}^P \quad \dots\dots\dots (3)$$

で表せる。ここで $\mathbf{A}$ はローカル座標系から慣性座標系への回転変換マトリックスで次式⁽⁸⁾で与えられる。

$$\mathbf{A} = (2e_0^2 - 1)\mathbf{I} + 2(\mathbf{e}\mathbf{e}^T + e_0\tilde{\mathbf{e}}) \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで $\mathbf{I}$ は単位マトリックスである。

ジョイント座標系の各座標軸の方向にそれぞれ単位ベクトル $\mathbf{f}, \mathbf{g}, \mathbf{h}$ をとり、座標系 $x_i''-y_i''-z_i''$ の原点 P_i から座標系 $x_j''-y_j''-z_j''$ の原点 P_j へのベクトルを $\mathbf{d}_{ij}$ とする。

トラスを構成するジョイントのうち伸縮する可変長部は、連結される二つの剛体 i と j とがおおのこのジョイント設定軸 z_i'' 軸、 z_j'' 軸およびベクトル $\mathbf{d}_{ij}$ が同一直線上にあって z'' 軸回りに回転しないという幾何学的条件を満足しなければならない。これは並進ジョイントの幾何学的な定義⁽⁹⁾に一致し次式で定式化できる。

$$\left. \begin{aligned} \Phi^{K_{a1}}(\mathbf{f}_i, \mathbf{h}_j) &= \mathbf{f}_i'^T \mathbf{A}_i^T \mathbf{A}_j \mathbf{h}_j' = 0 \\ \Phi^{K_{a1}}(\mathbf{g}_i, \mathbf{h}_j) &= \mathbf{g}_i'^T \mathbf{A}_i^T \mathbf{A}_j \mathbf{h}_j' = 0 \\ \Phi^{K_{a2}}(\mathbf{f}_i, \mathbf{d}_{ij}) &= \mathbf{f}_i'^T \mathbf{A}_i^T (\mathbf{r}_j + \mathbf{A}_j \mathbf{s}_j^P - \mathbf{r}_i) \\ &\quad - \mathbf{f}_i'^T \mathbf{s}_i^P = 0 \\ \Phi^{K_{a2}}(\mathbf{g}_i, \mathbf{d}_{ij}) &= \mathbf{g}_i'^T \mathbf{A}_i^T (\mathbf{r}_j + \mathbf{A}_j \mathbf{s}_j^P - \mathbf{r}_i) \\ &\quad - \mathbf{g}_i'^T \mathbf{s}_i^P = 0 \\ \Phi^{K_{a1}}(\mathbf{f}_i, \mathbf{f}_j) &= \mathbf{f}_i'^T \mathbf{A}_i^T \mathbf{A}_j \mathbf{f}_j' = 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

ここで、上付き文字 K_{a1} は座標軸方向の単位ベクトルのスカラー積、 K_{a2} は座標軸方向の単位ベクトルとベクトル $\mathbf{d}_{ij}$ とのスカラー積で表されるキネマチックな拘束をそれぞれ表す。 $\mathbf{f}', \mathbf{g}', \mathbf{h}'$ は単位ベクトル $\mathbf{f}, \mathbf{g}, \mathbf{h}$ を $x'-y'-z'$ 座標系で表したもので

$$[\mathbf{f}', \mathbf{g}', \mathbf{h}'] = \mathbf{C}[\mathbf{f}, \mathbf{g}, \mathbf{h}] \quad \dots\dots\dots (6)$$

$\mathbf{C}$ は $x''-y''-z''$ 座標系から $x'-y'-z'$ 座標系への変換マトリックスで、 $x''-y''-z''$ 座標系の $x'-y'-z'$ 座標系に対するオイラーパラメータを $\mathbf{p}'' = [e_0'', \mathbf{e}'']^T$ として

$$\mathbf{C} = (2e_0''^2 - 1)\mathbf{I} + 2(\mathbf{e}''\mathbf{e}''^T + e_0''\tilde{\mathbf{e}}'') \quad \dots\dots\dots (7)$$

から求められる。

式(5)で拘束されない z'' 軸方向には、この軸上にあるジョイント座標系原点 P_i, P_j 間の距離をある時間関数で変化させて系に運動を与えるアクチュエータを設けることが可能である。このアクチュエータによる駆動拘束を上付文字 D で表すと次式⁽⁹⁾で定式化できる。

$$\Phi_i^D(\mathbf{q}, t) = \Phi^{K_{a2}}(\mathbf{h}_i, \mathbf{d}_{ij}) - C_i(t) = 0 \quad \dots\dots\dots (8)$$

伸縮する可変長部以外のトラス各部のジョイントには並進運動を拘束する幾何学的条件が最低限要求される。この最低限の拘束条件は連結される剛体 i と j のジョイント座標系原点 P_i, P_j が一致することであり、球ジョイント、ユニバーサルジョイント、回転ジョイントがこの条件を満たす。ユニバーサルジョイントには設定軸である z_i'' 軸、 z_j'' 軸が直交する拘束が、回転ジョイントには設定軸の方向が等しい拘束がそれぞれ付け加わる。座標原点が一致するキネマチックな拘束を上付文字 K_s を付けて表すと、球、ユニバーサル、回転の3種類のジョイントはそれぞれ式(9)～(11)で定式化できる。

$$\left. \begin{aligned} \Phi^{K_s}(P_i, P_j) &= \mathbf{d}_{ij} = \mathbf{r}_j + \mathbf{A}_j \mathbf{s}_j^P \\ &\quad - \mathbf{r}_i - \mathbf{A}_i \mathbf{s}_i^P = 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (9)$$

$$\left. \begin{aligned} \Phi^{K_s}(P_i, P_j) &= \mathbf{d}_{ij} = \mathbf{r}_j + \mathbf{A}_j \mathbf{s}_j^P \\ &\quad - \mathbf{r}_i - \mathbf{A}_i \mathbf{s}_i^P = 0 \\ \Phi^{K_{a1}}(\mathbf{h}_i, \mathbf{h}_j) &= \mathbf{h}_i'^T \mathbf{A}_i^T \mathbf{A}_j \mathbf{h}_j' = 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (10)$$

$$\left. \begin{aligned} \Phi^{Ks}(P_i, P_j) &= d_{ij} = r_j + A_j s_j^P \\ -r_i - A_i s_i^P &= 0 \\ \Phi^{Ka1}(f_i, h_j) &= f_i^T A_i^T A_j h_j = 0 \\ \Phi^{Ka1}(g_i, h_j) &= g_i^T A_i^T A_j h_j = 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (11)$$

2・2 拘束の決定 可変長部を式(5)で表される並進ジョイントとし、それ以外を式(9)～(11)で表される3種類のジョイントから任意に選んでトラスを構成した場合、得られるキネマチックな拘束式は必ずしも独立にはならない。拘束式の中に従属なものがあればその拘束は冗長となって機構システムとしてのトラス構造は誤差の影響を受けやすくなり、これは展開信頼性に影響する。高い展開信頼性が要求される展開トラス構造にとって冗長な拘束は好ましくない。

そこでここでは、トラスに配置すべき拘束の種類を自由度解析の手法を使って決定することにより、独立な拘束式で表されるトラス構造を得るようにする。すなわち、ジョイントの種類を特定できる可変長部を式(5)で表し、それ以外のジョイントの種類が特定できない箇所に対して式(9)～(11)で表される3種類のジョイントをパラメータとして機構システムを構成し、それらの中からキネマチックな拘束式のヤコビアン行列 Φ_q^k の行の階数がフルランクとなるものを探し出すことによって独立な拘束式で表されるトラス構造を得るものである。

フルランクとなるヤコビアン行列の行の階数が m であるキネマチックな拘束式は、 nb 個の各剛体のオイラーパラメータ拘束⁽⁸⁾とともに次式で表せる。

$$\Phi^K(q) = [\Phi_1^K(q), \Phi_2^K(q), \dots, \Phi_m^K(q)]^T = 0 \dots\dots\dots (12)$$

$$\Phi^P(q) = [p_1^T p_1 - 1, p_2^T p_2 - 1, \dots, p_{nb}^T p_{nb} - 1]^T = 0 \dots\dots\dots (13)$$

このとき nb 個のオイラーパラメータの拘束式は独立であるから $n = 7nb - m - nb$ 個の一般化座標が独立である。可変長部材を有する展開トラス構造では伸縮する可変長部材が唯一駆動可能であるから、この独立な一般化座標の数は可変長部材の総数 nd 以下でなければならない。これから

$$n \leq nd \dots\dots\dots (14)$$

式(14)を満たす式(12)の m 個の拘束式で表されるトラス構造はキネマチックな拘束に過不足がない。この場合トラスの自由度は n であるから、 n 箇所の可変長部に式(8)で表される駆動拘束を与えて得られる n 個の拘束式の組

$$\Phi^p(q, t) = [\Phi_1^p(q, t), \Phi_2^p(q, t), \dots, \Phi_n^p(q, t)]^T \dots\dots\dots (15)$$

が互いに独立で、かつ式(12)とも独立となることが必

要であり、これを満たすように駆動拘束を付け加える可変長部を選ばなければならない。

この駆動箇所の選定に再び自由度解析の手法を用いる。トラス構造を構成する拘束式は式(15)を式(12)に付け加えた次式で表せる。

$$\Phi(q, t) = \begin{bmatrix} \Phi^K(q) \\ \Phi^P(q, t) \end{bmatrix} = 0 \dots\dots\dots (16)$$

ここで n 個の拘束式の組 Φ^p について、 nd 箇所の可変長部の中から n 箇所を選ぶ選び方を変えることにより異なる組の Φ^p を作り、そのおのおの Φ^p に対して式(16)のヤコビアン行列 Φ_q をとり、その行の階数がフルランクとなるような n 個の拘束式の組 Φ^p を探し出す。このとき、キネマチックな拘束式 Φ^K は式(12)の段階ですでに独立な拘束式で表されているから、式(16)のヤコビアン行列の行の階数がフルランクとなる Φ^p の n 個の拘束式は互いに独立であり、かつ Φ^K に対しても独立である。

式(14)を満たす式(16)で表される $6nb$ 個の独立な拘束式と式(13)の nb 個のオイラーパラメータ拘束とによってトラスの運動特性を決定できる。

2・3 展開駆動力 多剛体システムに対する変分形式の Newton-Euler の運動方程式は、ローカル直交座標系では次式⁽⁹⁾で表される。

$$\delta r^T [M \ddot{r} - F^A] + \delta \pi'^T [J' \dot{\omega}' + \dot{\omega}' J' \omega' - n'^A] = 0 \dots\dots\dots (17)$$

M は質量マトリックス、 J' は慣性テンソル、 F^A 、 n'^A は外からかかる力とトルクである。また δr はローカル座標系 $x'-y'-z'$ 原点の仮想変位、 $\delta \pi'$ は慣性座標系 $x-y-z$ に関するローカル座標系 $x'-y'-z'$ の仮想回転 $\delta \pi$ をローカル座標系で表したベクトル量、 ω' は慣性座標系でのローカル座標系の角速度ベクトル ω をローカル座標系で表したベクトル量である。 $\delta \pi'$ 、 ω' は次の関係⁽⁹⁾を用いてオイラーパラメータで表せる。

$$\delta \tilde{\pi}' = A^T \delta A = 2G \delta G^T = 2(\tilde{G} \delta p) \dots\dots\dots (18)$$

$$\tilde{\omega}' = A^T \dot{A} = 2G \dot{G}^T = 2(\tilde{G} \dot{p}) \dots\dots\dots (19)$$

ここで、 $G = [-e, -\tilde{e} + e_0 I]$

拘束方程式(13)、(16)を時間固定で微分して

$$\Phi_p^s \delta p = 0 \dots\dots\dots (20)$$

$$\Phi_s \delta r + \Phi_p \delta p = 0 \dots\dots\dots (21)$$

式(20)、(21)を満足するすべての変分 δr 、 δp に対して式(17)が成り立たなければならないから、Lagrange の未定乗数法を導入し、式(17)に式(20)、(21)を追加して連立方程式を導く。すなわち式(20)、(21)にそれぞれ Lagrange の乗数 λ^p 、 λ をかけ、これらの式を、式(18)、(19)から回転の変数をオイラーパラメータに書き換えた式(17)に加えると、変分 δr と δp の係数

がともに零でなければならないことから、次式が得られる。

$$\left. \begin{aligned} M\ddot{\mathbf{r}} - \mathbf{F}^A + \Phi_r^T \lambda &= 0 \\ 4\mathbf{G}^T \mathbf{J}' \mathbf{G} \ddot{\mathbf{p}} - 8\mathbf{G}^T \mathbf{G} \dot{\mathbf{G}}^T \mathbf{J}' \dot{\mathbf{G}} \mathbf{p} - 2\mathbf{G}^T \mathbf{n}'^A & \\ + \Phi_p^T \lambda + \Phi_p^{PT} \lambda^P &= 0 \end{aligned} \right\} \dots (22)$$

式(13)、(16)の時間微分をとってそれぞれの速度方程式を求めると

$$\left. \begin{aligned} \Phi_p^T \dot{\mathbf{p}} &= 0 \\ \Phi_r^T \dot{\mathbf{r}} + \Phi_p \dot{\mathbf{p}} + \Phi_t &= 0 \end{aligned} \right\} \dots (23)$$

また加速度方程式はそれぞれ

$$\left. \begin{aligned} \Phi_p^T \ddot{\mathbf{p}} &= -2[\dot{\mathbf{p}}_1^T \dot{\mathbf{p}}_1, \dot{\mathbf{p}}_2^T \dot{\mathbf{p}}_2, \dots, \dot{\mathbf{p}}_{nb}^T \dot{\mathbf{p}}_{nb}]^T \equiv \gamma^p \\ \Phi_r^T \ddot{\mathbf{r}} + \Phi_p \ddot{\mathbf{p}} &= -[\Phi_r \dot{\mathbf{r}} + \Phi_p \dot{\mathbf{p}} + 2\Phi_{rt} \dot{\mathbf{r}} \\ + 2\Phi_{pt} \dot{\mathbf{p}} + \Phi_{tt}] &\equiv \gamma \end{aligned} \right\} \dots (24)$$

となる。ここで γ は式(5)、(9)、(10)、(11)および式(8)で表される拘束方程式を式(24)の第2式に代入することによって求められ、座標軸方向の単位ベクトル $\mathbf{f}$, $\mathbf{g}$, $\mathbf{h}$ をベクトル $\mathbf{a}$ で代表させると、拘束式の種類 $d1, d2, s$ および D に対する γ はそれぞれ次のように表される。

$$\gamma^{d1} = -\mathbf{a}_j^T [A_j^T A_i \tilde{\omega}_i' \tilde{\omega}_i' + \tilde{\omega}_j' \tilde{\omega}_j' A_j^T A_i] \mathbf{a}_i' + 2\omega_j'^T \tilde{\omega}_j' A_j^T A_i \tilde{\omega}_i' \dots (25)$$

$$\gamma^{d2} = 2\omega_i'^T \tilde{\omega}_i' A_i^T (\dot{\mathbf{r}}_i - \dot{\mathbf{r}}_j) + 2s_j'^{PT} \tilde{\omega}_j' A_j^T A_i \tilde{\omega}_i' \mathbf{a}_i' - s_i'^{PT} \tilde{\omega}_i' \tilde{\omega}_i' \mathbf{a}_i' - s_j'^{PT} \tilde{\omega}_j' \tilde{\omega}_j' A_j^T A_i \mathbf{a}_i' - d_{ij}^T A_i \tilde{\omega}_i' \tilde{\omega}_i' \mathbf{a}_i' \dots (26)$$

$$\gamma^s = A_i \tilde{\omega}_i' \tilde{\omega}_i' s_i'^P - A_j \tilde{\omega}_j' \tilde{\omega}_j' s_j'^P \dots (27)$$

$$\gamma^D = \gamma^{d2} + \ddot{C}(t) \dots (28)$$

式(22)、(24)から機構システムの運動方程式は

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M} & 0 & \Phi_r^T & 0 \\ 0 & 4\mathbf{G}^T \mathbf{J}' \mathbf{G} & \Phi_p^T & \Phi_p^{PT} \\ \Phi_r & \Phi_p & 0 & 0 \\ 0 & \Phi_p^T & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{r}} \\ \ddot{\mathbf{p}} \\ \lambda \\ \lambda^P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{F}^A \\ 2\mathbf{G}^T \mathbf{n}'^A + 8\mathbf{G}^T \mathbf{G} \dot{\mathbf{G}}^T \mathbf{J}' \dot{\mathbf{G}} \mathbf{p} \\ \gamma \\ \gamma^P \end{bmatrix} \dots (29)$$

式(13)、(16)、(23)を満足する初期条件 $\mathbf{r}$, $\mathbf{p}$, $\dot{\mathbf{r}}$, $\dot{\mathbf{p}}$ のもとに機構システムは式(29)に従って運動する。このとき剛体 i に注目し、これに働く拘束力のうち拘束 k に対応するものを考えると、その仮想仕事と拘束 k のジョイント座標系原点に働く拘束反力 $\mathbf{F}_i''^k$ および反作用トルク $\mathbf{T}_i''^k$ の仮想仕事との和は零である。式(29)における Φ_r , Φ_p , λ の剛体 i の拘束 k に関するものをそれぞれ、 Φ_{ri}^k , Φ_{pi}^k , λ^k で表し、また、ジョイント座標系原点での仮想変位を $\delta \mathbf{r}_i''^P$, 仮想回転を

$\delta \pi_i''$ とすると式(7)、(18)から、

$$\delta \pi_i'' = \mathbf{C}_i^T \delta \pi_i' = \mathbf{C}_i^T 2 \mathbf{G}_i \delta \mathbf{p}_i = 2 \mathbf{C}_i^T \mathbf{G}_i \mathbf{C}_i \delta \mathbf{p}_i''$$

であり

$$\delta \mathbf{r}_i^T \Phi_{ri}^{kT} \lambda^k + \delta \mathbf{p}_i^T \Phi_{pi}^{kT} \lambda^k + \delta \mathbf{r}_i''^{PT} \mathbf{F}_i''^k + 2\delta \mathbf{p}_i''^T \mathbf{C}_i^T \mathbf{G}_i^T \mathbf{C}_i \mathbf{T}_i''^k = 0 \dots (30)$$

ここで式(3)の変分をとって $\delta \mathbf{r}_i$ を $\delta \mathbf{r}_i''^P$, $\delta \mathbf{p}_i$ で表すと

$$\begin{aligned} \delta \mathbf{r}_i &= \delta \mathbf{r}_i''^P + \mathbf{A}_i \tilde{\mathbf{s}}_i'^P 2 \mathbf{G}_i \delta \mathbf{p}_i \\ &= \mathbf{A}_i \mathbf{C}_i \delta \mathbf{r}_i''^P + 2 \mathbf{A}_i \tilde{\mathbf{s}}_i'^P \mathbf{G}_i \mathbf{C}_i \delta \mathbf{p}_i'' \end{aligned}$$

これを式(30)に代入して

$$\delta \mathbf{r}_i''^{PT} (\mathbf{F}_i''^k + \mathbf{C}_i^T \mathbf{A}_i^T \Phi_{ri}^{kT} \lambda^k) + \delta \mathbf{p}_i''^T (2 \mathbf{C}_i^T \mathbf{G}_i^T \mathbf{C}_i \mathbf{T}_i''^k + 2 \mathbf{C}_i^T \mathbf{G}_i^T \tilde{\mathbf{s}}_i'^{PT} \mathbf{A}_i^T \Phi_{pi}^{kT} \lambda^k + \mathbf{C}_i^T \Phi_{pi}^{kT} \lambda^k) = 0$$

これが任意の $\delta \mathbf{r}_i''^P$, $\delta \mathbf{p}_i''$ について成り立たねばならないから

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_i''^k &= -\mathbf{C}_i^T \mathbf{A}_i^T \Phi_{ri}^{kT} \lambda^k \\ \mathbf{T}_i''^k &= -\mathbf{C}_i^T \left(\frac{1}{2} \mathbf{G}_i \Phi_{pi}^{kT} + \tilde{\mathbf{s}}_i'^{PT} \mathbf{A}_i^T \Phi_{pi}^{kT} \right) \lambda^k \dots (31) \end{aligned}$$

ジョイントに働く反力と反作用トルクを表す式(31)は、式(8)、(15)の駆動拘束によって与えられる運動を実現するために、これらの駆動拘束に必要とされる駆動力とジョイント座標系原点回りの駆動トルクを表す。

3. アンテナバックストラクチャ トラスの設計

3.1 展開構造 設計対象として、三角柱形状を基本モジュールとした三次元展開トラス構造を取上げ

Fig. 1 Basic module of a truss structure with variable-length members

Fig. 2 ANTENNA-MODEL composed of six basic modules

る。図1に基本モジュールを示す。左は収納状態、右は展開状態を示している。この展開構造は斜部材が軸方向に伸縮可能で、収納・展開動作は縦の面内にある斜部材を伸縮駆動することによって得る。つまり、斜部材が対角線となっているおのおのの四辺形を斜部材を伸ばすことで畳み、縮めることで拡げて、全体の形状を変形させる。このとき対向する各縦部材および各横部材はそれぞれが平行移動する。駆動可能な部材は面内にある斜部材に限られる。面外方向の斜部材は展開後のトラスの剛性をあげるために設けられており、展開運動に伴って軸方向に伸縮するが従動である。

基本モジュールを組合せて得られる六角柱形状でアンテナバックストラクチャを形成するものとし、これをアンテナモデルと呼ぶことにする(図2)。アンテナモデルは、図1右側に示す基本モジュールの左端の縦部材がアンテナモデルの中心の縦部材となるように6個の基本モジュールが組合され、各モジュールはこの中心の縦部材を共有し、また隣合うモジュール間の側面部材はそれぞれ一組を共有するように構成される。ここで、基本モジュールに追加した五つのモジュールには、図7に示すように外周部の斜部材がそれぞれ1本ずつ足りない。これは3・3節に述べるアンテナの軽量化要請に基づくもので、アンテナモデルは中心に対して非対称である。構成部材数は縦部材が19、横部材が48、面内斜部材が19および面外斜部材が18である。

3・2 アンテナ鏡面パラメータ アンテナ形式をオフセットパラボラとする。設計するアンテナモデル

Table 1 Design value of the parabolic reflector

Design parameter	Symbol	Design value
Effective aperture diameter	D	1700 mm
Focal length	F	2202.35 mm
Feed offset angle	θ_0	40°
Clear height	h_1	753.18 mm
Clear height angle	θ_{lower}	19.4°

Fig. 3 Offset parabolic reflector configuration

の鏡面パラメータを図3および表1のように定める。ここでアンテナの開口径は、4章に述べる展開試験を行う際のスペースに制約があることから、それを考慮して決定した。パラボラ鏡面は、座標系(X-Y-Z)でFを焦点距離として次式で表される。

$$Z = \frac{X^2 + Y^2}{4F} - F$$

ここで、Z-X平面内で、鏡面上の点P₁、P₂を結ぶ線分の中点を通り、線分P₁P₂に直交する直線と鏡面との交点に新たに原点をとり、座標系(x-y-z)を図3のように定める。以下、アンテナモデルの設計はこの座標系(x-y-z)を用いる。

3・3 部材諸元 パラボラ鏡面は無心であるため、この面をそのままトラスで構成しようとするとトラスは非対称となる。しかし、ここではパラボラ鏡面を球面で近似することにより、トラスを対称形として取扱う。これによりトラス部材の共通化が可能になり、製作が格段に容易になる。パラボラ鏡面は、球面を構成するトラス縦部材の中心線の端点(以降、単に端点と呼ぶ)上にスタッドを立て、これにメッシュを取付けて、メッシュがつくる面によって得る。ここで、トラスの縦部材端点に設けるスタッドの高さ(ここでは公称値20 mmとする)を個々に設定することで、球面で近似した誤差を吸収する。これによりメッシュによ

Table 2 Node coordinates

Node number	x-y-z Coordinates			(Unit:mm)	
	x	y	z	Parabolic mirror (z)	Difference of z
1	904.533	522.233	-109.5	-107.911	-1.589
2	904.533	0.0	-80.8	-76.859	-3.941
3	904.533	-522.233	-109.5	-107.911	-1.589
4	452.266	783.350	-80.8	-84.761	-3.961
5	454.994	262.691	-27.5	-25.133	-2.367
6	454.994	-262.691	-27.5	-25.133	-2.367
7	452.266	-783.350	-80.8	-84.761	-3.961
8	0.0	1044.465	-109.5	-116.213	6.713
9	0.0	525.382	-27.5	-29.314	1.814
10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
11	0.0	-525.382	-27.5	-29.314	1.814
12	0.0	-1044.465	-109.5	-116.213	6.713
13	-452.266	783.350	-80.8	-84.285	3.485
14	-454.994	262.691	-27.5	-28.250	0.750
15	-454.994	-262.691	-27.5	-28.250	0.750
16	-454.266	-783.350	-80.8	-84.285	3.485
17	-904.533	522.233	-109.5	-104.277	-5.223
18	-904.533	0.0	-80.8	-76.858	-3.942
19	-904.533	-522.233	-109.5	-104.277	-5.223
20	904.533	522.233	290.5		
21	904.533	0.0	319.2		
22	904.533	-522.233	290.5		
23	452.266	783.350	319.2		
24	454.994	262.691	372.5		
25	454.994	-262.691	372.5		
26	452.266	-783.350	319.2		
27	0.0	1044.465	290.5		
28	0.0	525.382	372.5		
29	0.0	0.0	400.0		
30	0.0	-525.382	372.5		
31	0.0	-1044.465	290.5		
32	-452.266	783.350	319.2		
33	-454.994	262.691	372.5		
34	-454.994	-262.691	372.5		
35	-452.266	-783.350	319.2		
36	-904.533	522.233	290.5		
37	-904.533	0.0	319.2		
38	-904.533	-522.233	290.5		

て作られる面はパラボラ面となる。

本展開構造では斜部材の長さを可変にする必要があり、ここでは2本のパイプ部材の一方が他方の内壁面をしゅう動する構成にすることによって斜部材の長さを可変にする。このうち、伸縮駆動を行う斜部材には3・6節に述べる駆動機構を内蔵させ、その他の斜部材には駆動機構を内蔵させず従動とする。この伸縮駆動機構を内蔵する必要があることから斜部材径が決まる。他の部材、すなわち縦部材および横部材はアンテナモデルの収納直径を念頭において決定する。ここでは、4章に述べる展開試験を実施する際の運搬等の関係から、アンテナモデルを収納直径280 mm以下、収納高さ900 mm以下、重量10 kg以下で設計するものとし、収納直径を端点径で260 mmとする。これから各部材直径を表4のように定める。この場合収納直径は外径で272 mmとなる。これら各構成部材は炭素繊維強化プラスチック製の中空円筒とする。

x 軸方向にアンテナモデルの短径を配するものとし、トラスの縦部材長を400 mmとして、各端点(図2における端点番号)の座標を表2に示す。これは展開時の縦部材の位置を表す。球面近似による誤差は最大で6.7 mm強であり、これはスタッドによる高さの調整範囲(20 mm)に入っている。図4は決定された縦部材の端点を結ぶ線図でトラスの形状寸法を示す。

次に縦部材に横部材および斜部材を取付けるためのオフセットを縦部材に対して垂直に出し、まず仮の寸法を与える。横部材の取付けに対するオフセットを a と b で表し、斜部材に対しては縦部材の軸方向に d を設け、さらにそこから縦部材に対し垂直方向に c を設ける。縦部材の位置は既に決まっているから縦部材に付けたオフセットの端点を結ぶ線図(横部材および

Fig. 4 The dimension of the truss node

(a) Radially arranged members

(b) Outside arranged members

(c) Outward direction members which contains the member G

(d) Outward direction members which contains the member H

(e) Outward direction members which contain the member I

Fig. 5 Line charts of members in deployed and stowed (Bold line: deployed, Alternate long and short dash line: stowed)

斜部材となる)が描ける。図5に、このようにして得られたアンテナモデルの構成要素ごとの展開時および収納時の線図を示す。

なお、収納時の線図は次のようにして得られる。すなわち、本展開構造では対向する縦部材および横部材は平行を保って動くから、ある縦部材〔例えば図5(a)で真ん中の縦部材〕を基準にとると、収納時にはそれに隣接する縦部材の中心線は、設計値である端点径 260 mm(隣接する縦部材の中心線間距離 65 mm)を満たす位置に移動する。ここで横部材を連結するオフセット a , b は縦部材に直角であり、また横部材の長さは変化しないから、移動した縦部材の中心線に対してオフセット a , b の平行線をひき、また基準縦部材の両端のオフセット端からそれぞれ横部材長を半径として弧を描いたとき、これらの弧と平行線との交点は移動した縦部材に付けられたオフセット端を表す。これによって収納時の縦部材の位置が決まる。次にこの縦部材上にオフセット d をとり、これに垂直にオフセット c をとると、この点は移動した縦部材と斜部材との連結点であり、この点と基準縦部材の斜部材との連結点を結ぶ線が収納時の斜部材の中心線となる。このようにして収納姿勢の線図が得られる。

図5(a)はアンテナトラスの半径方向の面内構成要素、図5(b)は周方向の面内構成要素、図5(c)~(e)はそれぞれ面外構成要素である。各端点にはおのおのそに対応する端点番号を付記した。また各部材に付した A , B 等の記号は図1での各部材の説明記号に対応している。

次に、ここで得られた収納時の線図に対して表4に示す部材径を当てはめ、部材が干渉しないようにまずオフセット a および c を求める。収納時の線図でオ

フセット値を求める理由は収納時が部材と部材とが最も接近するからである。オフセット c を与える点は斜部材上にあり、斜部材は展開姿勢においてこれを囲む四辺形の対角線となっているから、展開姿勢におけるオフセット c を与える点の位置(座標)からオフセット d が求まる。オフセット b は、部材の干渉回避のためには小さい値ほど望ましいが、ここでは収納時の横部材をできるだけ立てて折り畳むことによりこの部分を小さく折り畳む(収納径には寄与しないが)ことを狙い、収納時の横部材と斜部材とがほぼ平行になるようにオフセット b を決めた。表3にオフセットの値を示す。実際に製作する際にはこのオフセット寸法をもつフィッティングを製作して縦部材に装着し、これに横部材および斜部材を取付けて展開構造を構成する。

なお、図5(a)~(e)に、決定したオフセットを与えたときの各構成要素ごとの収納高さ寸法を示した。アンテナモデルとしての収納高さは図5(a)に示される 877.389 mm となり、これは仕様値 900 mm 以下を満足する。また表4に各部材諸元を示す。

3・4 ジョイント構成 2・2節に述べた方法に従ってジョイント構成を求める。ここで、部材の両端を球ジョイントで構成した場合にはその部材は軸回りに回転してしまい、これはトラス構造として好ましくない。また両端がともに回転ジョイントである場合は一部の部材に使える可能性はあるが、基本的に拘束が過剰になることが予想される。そこで、ここでは、可能なジョイントの組合せをすべて検討するのではなく、部材の両端を回転と球、回転とユニバーサル等、異種の

Table 3 Offset values

(Unit : mm)			
a	b	c	d
34.5	14.0	18.0	13.7

Table 4 Dimensions

Member Symbol		Length in stowed [mm]	Length in deployed [mm]	Outer diameter [mm]	Mass [kg]
Longitudinal member	A	400.0	400.0	12.0	0.056
	B	477.674	477.674	12.0	0.031
Transverse member	C	474.602	474.602	12.0	0.031
	D	850.484	598.823	20.0	0.396
	E	850.484	663.348	20.0	0.402
In-plane diagonal member	F	847.411	630.448	20.0	0.399
	G	376.792	645.206	20.0	0.102
	H	370.662	580.390	20.0	0.095
Out-of-plane diagonal member	I	373.727	615.082	20.0	0.098

Table 5 Summary of kinematic characteristics

Joint configuration	Basic module		Antenna model	
	Number of degrees of freedom	Number of redundant constraints	Number of degrees of freedom	Number of redundant constraints
Conventional method	3	48	7	217
Presented method	6	0	13	1

Fig. 6 Joint configuration (Basic module) (r : Revolute, u : Universal, s : Spherical, t : Translation)

Fig. 7 Driver members arrangements

ジョイントで構成する場合に絞る。これは可能性の低い組合せをあらかじめ除外することによって、拘束ヤコビアンを評価する回数をリーズナブルな値にまで減らすためである。以下に作業手順を示す。

まず、すべての部材がそろっている基本モジュールに対してジョイント条件を変えて自由度解析を実施し、拘束ヤコビアンがフルランクとなり、機構システムの自由度数が面内の斜部材数である6以下となるジョイント構成を求める。このジョイント構成をアンテナモデルに適用して同様の自由度解析を実施し、拘束に過不足が生じる場合には基本モジュールに戻って同様の作業を繰り返す。自由度解析には汎用機構解析ソフト DADS⁽¹⁰⁾ を使用した。その結果、部材両端を異種のジョイントで構成する場合には、横部材を回転と球で、斜部材をユニバーサル、並進、球で構成し、隣接する同種の部材および上下の面とでジョイントの種類を対称に配置した場合に限り、ほぼ満足できるジョイント構成を得られることがわかった。図6に基本モジュールの場合を示す。 r は回転、 u はユニバーサル、 s は球面、 t は並進の各ジョイントをそれぞれ表す。ここで、横部材の r と s および斜部材の u と s をそれぞれすべて入れ替えた場合も同様の結果が得られた。

表5に運動特性を示す。表5では比較のために、従来しばしば用いられている、可変長部の並進ジョイント以外をすべて回転ジョイントで構成する場合を付記した。なお、アンテナモデルでは余剰拘束が一つ現れている。この余剰拘束は、トラス周辺部の縦部材と半

Table 6 Diagonal member which can be substituted for the driving member

	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m
x1	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×
x2	○	○	×	×	○	○	○	○	○	○	○	×	○
x3	×	×	×	×	×	○	○	○	○	○	○	○	×
x4	○	○	○	○	○	○	○	×	×	○	○	×	○
x5	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	×
x6	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×

○ possible, × impossible

Fig. 8 Structure of the driver member

径方向の横部材とを連結している一箇所の球面ジョイント部で生じており、縦部材の軸方向の拘束が余剰となっている。この場合、実設計では、例えばこのジョイントを縦部材の軸方向に移動可能に支持する等の工夫が可能であり、これによりこの余剰拘束は除去できる。

3・5 駆動部材配置 表5からアンテナモデルの自由度数は13で、19本ある面内斜部材の中から互いに独立な13本を駆動する必要がある。駆動部材の選定は2・2節に述べた方法に従って決定する。駆動拘束として互いに独立となる13本の駆動部材の組には唯一性はない。ここでは中心から放射状に位置する斜部材の中からできるだけ多くを選ぶものとし、残りをすべての部材がそろっているモジュールの周方向に位置する斜部材を優先して選んだ。結果を図7に示す。太線は駆動すべき斜部材 $a \sim m$ を示す。駆動しない6本の斜部材 $x1 \sim x6$ には3・6節に述べる駆動機構を内蔵せず、面外斜部材と同様に従動とする。

表6はここで選んだ駆動すべき斜部材 $a \sim m$ のそれぞれが、駆動しない6本の斜部材 $x1 \sim x6$ に対して置き換え得る場合を○で、置き換え得ない場合を×で示した。例えば、 m の代わりに斜部材 $x2$ を駆動することが可能であり、この場合は駆動部材を対称に近い形に配置できる。また表6から $a \sim m$ の駆動に加えて例えば $x3$ をも駆動する場合には、 $x3$ は f, g, h, i, j, k, l のおのおのに対して冗長となることがわかる。

3・6 ドライバの構成 展開に必要な駆動力を求めるにあたり、アンテナモデルの運動を想定する必要がある。ここではアンテナモデルが中心にある縦部材を軸に外に向かって一様に展開して行くものとし、駆動部材を等速で駆動してそれぞれ所定の長さを得るものとして、駆動拘束を表す式(8)における $C(t)$ を求

める。駆動部材の可変長さは、曲面を形成する関係上、中心から放射状に配置される斜部材の内側と外側、それに周側とで異なり、本設計例の場合それぞれ、251.7 mm, 187.2 mm, 217.0 mm である。また展開時間は4章に述べる航空機を用いた微小重力環境下での試験を想定して20秒として $C(t)$ を求めた。この3種類の駆動拘束で構成される式(15)の13個の駆動拘束によって運動が与えられたとき、これらの拘束に対応するジョイント反力を表す式(31)から、駆動部材のドライバに必要とされる駆動力が求まる。

図8にドライバの構成を示す。モータの回転を滑りねじによって直線運動に変換し、駆動部材を伸縮駆動する。モータに必要とされるトルク T_i は式(31)から軸方向力を表す F_i^{rk} の z 成分 F_i^{rk} と滑りねじのリード L 、効率 η とから求められ、次式で表せる。

$$T_i = F_i^{rk} L / (2\pi\eta) \dots\dots\dots (32)$$

本設計例では滑りねじはリードが0.01 m、効率が50%のものをいい、式(32)から必要駆動トルクを後述の図11, 12のように算出し、この値を十分に満足するように、13個のモータすべてを定格トルクが0.3 N・mのDCサーボモータで構成した。

4. 微小重力下展開試験

4.1 試験方法 2章および3章の設計法が三次元展開トラス構造の設計に有効であることを検証するために、3章に述べた設計に基づいてアンテナモデルを試作し、展開試験を行った。展開試験は、地上における展開過程での重力補償が困難なことが予想されるため、ここでは航空機の放物飛行⁽¹¹⁾によって得られる微小重力環境下で行った。放物飛行によって微小重力状態が得られる時間は20～25秒程度であることから、3.6節で述べたように、アンテナモデルの展開時間を20秒として図8のモータを駆動した。モータの駆動パターンはそれぞれを等速駆動とした。

Fig. 9 Deployment testing under the microgravity environment

展開試験はフリーフロート法で行い、航空機が微小重力環境に入ったことを確認した後、収納状態のアンテナモデルをキャビンに解放して、宙に浮かせた状態でモータの駆動を始め、展開させた。実験スペースは航空機の形状からキャビンの前後方向には十分な余裕があるが、横断面方向が幅2.92 m、床面から1.98 mが利用可能な最大寸法である。これに対して展開後のアンテナトラスは図4に示すように長径2.09 m、短径1.81 mになり、幅方向の余裕に乏しい。このため、図9に示すように、微小重力下を自在に浮遊するアンテナモデルの周囲を実験者が取囲み、その側面を軽く触れるように押すことによりキャビンの中央で床面に平行に展開していくようにした。実験者は、キャビンの床に足を固定して浮遊しないようにした者と何の固定もせず空間を自在に動き得る者とに分かれ、特に後者はアンテナモデルの天井面へのぶつかり防止を担当した。モータのコードは部材に沿わせてアンテナモデルの中心に集め、束状にして長さに十分な余裕を持たせて駆動および計測装置に接続した。

4.2 試験内容 モータの駆動トルクと展開運動変位を測定した。モータトルクは、図8に示すように、部材内部にトルクセンサを組込んで測定した。このセンサは、一軸異方性を与えたアモルファスはくを軸の表面に貼付け、微小なねじれによって生じるアモルファスはくの磁化の変化を検出コイルによって非接触で検出するもの⁽¹²⁾で、小形化でき部材の内部に納めることが可能なことから、この試験のために専用開発した。図10にトルクセンサの構成を示す。

展開運動変位の測定は、アンテナモデルに取付けたターゲットを2台のハイスピードビデオカメラで撮影し、この2台のカメラの二次元情報を三次元情報に変換するソフトウェア⁽¹³⁾を用いて、ターゲットの三次元座標とその移動速度を求めた。

4.3 結果 展開時のモータトルクを図11, 12に示す。モータの記号は図7におけるドライバの記号に対応している。図11は全展開時間にわたってモータ c のトルクを示し、図12はモータ c 以外の12個のモータについて展開開始後10秒までのトルクを示して

Fig. 10 Structure of the torque sensor

いる。また、図 11 には重力変化の様子も示した。トルクカーブは細線が測定値、太線が式(32)の計算値である。

トルクは展開開始直後に急しゅんなピークをもち、このピーク値が駆動すべきトルクの大きさを支配している。また、このピーク値に関してはすべてのモータで測定値と計算値とがほぼ一致している。この展開直後のピーク値は、展開開始時には部材間の角度が小さく斜部材の駆動が展開力に有効に変換されないという展開トラスの構造上の要因に起因しているものと考えられる。ピーク値を示した時点以降 7 秒までについてみると、モータ *a, c, i, k* および *m* はトルクの時間変化が測定値と計算値とでほぼよい一致を示しているが、それ以外のモータでは測定値がピーク値以降も高い値が持続しており計算値との間に明らかな差異が認められる。特にモータ *e, f, g* および *h* には 5 秒から 6 秒にかけて幅広の第 2 のピークが出現している。

これに対して展開時間を 7 秒から 10 秒に限ってみ

Fig. 11 The torque of motor C and changes in gravity

れば、値としては若干大きいものの、すべてのモータトルクの測定値は計算値と同様の傾向を示している。

展開直後のピーク値と 7 秒以降については、すべてのモータのトルクは測定値と計算値とがほぼよく一致していることから、ピーク値以降 7 秒までの間で計算値と異なった挙動を示している 8 個のモータに対して試験上何らかの外力が働き、トルクが増大したことが考えられる。8 個のモータのうち、測定値が第 2 のピークをもつ *e, f, g* および *h* の四つのモータは、図 7 から、隣合って放射状に配置されている斜部材に集まっており、また、残りの *b, d, j* および *l* の四つのモータは放射状配置の外側あるいは外周に配置された斜部材を駆動していることが注目される。

この展開試験はフリーフロート法で行ったが、4・1 節で説明したように、完全ではなく実験者が介在している。アンテナモデルはキャビンに解放されたときの初期姿勢をもとに展開していくため、展開に伴ってキャビンの内壁等に衝突して展開運動が継続不能に陥らないように、キャビンの中央に寄せる実験者の作業は特に展開の初期に必要な。これはアンテナモデルがキャビンに解放されたときの姿勢が床面に対して傾いてしまうからである。航空機の放物飛行によってほぼ 0 G の微小重力環境を得る際、0 G が得られる前後のおおの約 20 秒間は重力がほぼ 2 G となり、2 G から 0 G へは 2~3 秒で変化する。特にこの重力変化直後の数秒間は重力環境に順応すること自体が実験者にとって容易でないが、実験者の作業はおもにこの期間に要求される。試験では特別の訓練を受けた技能者の支援を受けたものの、試験の運営は著者らが中心にな

Fig. 12 The torque of the other 12 motors for the first 10 seconds of the deployment motion
(— Measured, ——— Calculated)

って行ったものであり、この通常経験し得ない過酷な条件下での作業のため、必然的に展開開始のタイミングは遅れ気味になり、展開初期に要求される軽く触れて押すという作業が必ずしもそのとおりに行えた保証はない。

キャビンに設置されたビデオの映像記録によると、収納状態のアンテナモデルをキャビンに解放した際の姿勢が床面に対して垂直でなく傾いたために修正している作業が記録されており、映像上では実験者が一部の部材をつかんでいるようにみえる(図9)。

第2のピークをもつ e, f, g および h の四つのモータは隣合う斜部材に集まっており、前述のビデオの映像記録において実験者が部材をつかんでいると思われる場所とタイミングが一致している。第2のピークは実験者が部材を強く拘束したことによるものと考えられる。

また展開の初期に計算値と異なった挙動を示している b, d, j および l の四つのモータは、実験者が触れやすいトラスの外側あるいは外周に配置されており、上述の不適切な作業の影響を受けてトルクが増大したことが考えられる。

ただモータ m に関しては外周に配置されているにもかかわらず測定値は計算値によく一致している。ここでモータ m に要求される力の方向が他のモータと異なり逆であることが注目される。これはモータ m にはブレーキ力が要求されていることを意味する。3・6節で述べたようにここではアンテナモデルを中心から放射方向に一樣に展開していくように駆動している。このとき、モータ m が駆動すべき斜部材が、一樣展開に必要とされる駆動力以上の力を隣接する部材の運動から受けていると考え、この斜部材は運動の順方向に力を受けながら一樣な展開運動を維持する必要がある。このように考えると、モータ m にブレーキ力が要求される理由が説明できる。この点が他のモ

ータにとって抵抗力となっている外力の影響をモータ m は受け難いのではないかと考えられる。

測定されたトルクが計算値と違ったふりまを示すモータがある原因として、上述のような試験の運営上のトラブルの他に、部材の製作精度等の精度不足の可能性も否定できない。特に、本設計ではモータの回転を直線運動に変換する要素部品として3・6節に説明したように滑りねじを用いた。これは同じ機能が得られるボールねじ等、他の要素部品に比べ精度が劣るが、これをあえて用いた理由は、本論文のトラス設計法が拘束に過不足のないトラス構成を得るものであり、展開動作に対して本質的に諸誤差の影響を受け難い構造になるはずであることから、この設計法の有効性を検証するのにむしろ適していると考えたからである。この狙いが外れ、一部のモータのトルクを増大させる結果に終わった可能性は否定できない。

しかし、展開直後のピーク値と7秒以降のふりまがすべてのモータで測定値と計算値とがほぼよく一致していることや計算値と異なるふりまを示すのが展開初期に限られていることに対して、これを精度によるものとして説明するのは無理があるように思える。ここでは、得られたデータと試験状況のビデオの映像記録等から、上述したように試験の運営上のトラブルに原因があったとするほうが妥当であると考え。試験スペースに対するアンテナの大きさ、展開時間等、試験の運営に関しては今後の課題である。

なお、図11で16秒以後においてモータトルクが増大しているが、これは、展開開始のタイミングが遅れたために0 Gが展開開始後16秒で終わったことに原因している。

図13は、トラスの中心に設けたターゲットとトラス外周に設けたターゲットとの間の距離が、トラスが展開することによって変化する様子を示したものである。細線は測定値、太線は駆動が理想的に行われた場合の計算値である。展開運動の変位および速度とも、測定値は計算値によく一致しており、展開運動としては設計どおりの運動が得られていることがわかる。

上述したようにモータトルクが計算値と違ったふりまを示すモータがあることから、試験が理想的に行われたとはいえないが、設計どおりの展開運動が得られていることは、一部のモータが過大な負荷トルクを受けつつも正常に回転し得たことを示している。

5. 結 言

閉ループ構造の三次元展開トラス構造に対して、機構の運動自由度に着目した解析から拘束に過不足のな

Fig. 13 Distance and its velocity between a target provided at the center of the truss and another target on the periphery of the truss in the course of the truss's deployment motion.

いトラス構成を決定する設計法を提案した。これは各ジョイントの拘束の種類と機構を駆動するドライバの配置をパラメータとして、拘束ヤコビアンを評価することによってトラス構成を決定する方法である。この設計法に基づいて開口径 1.7 m のアンテナバックストラクチュアトラスを試作し、航空機の放物飛行によって得られる微小重力環境下で展開試験を行った。その結果、設計どおりの展開運動が得られることを確認でき、自由度解析を導入した本設計法の有効性を検証できた。

本研究は宇宙通信基礎技術研究所からの委託研究「移動体通信衛星用大型展開アンテナ」の一環として実施したものである。また、微小重力環境下での展開試験にあたり、航空機による微小重力実験サービスを提供しているフランスの NOVESPACE 社およびフランス空軍の関係者等多数の協力を得た。記して謝意を表す。

文 献

- (1) Miura, K. and Furuya, H., Adaptive Structure Concept for Future Space Applications, *AIAA J.*, **26**-8 (1988), 995-1002.
- (2) Fager, J. A., Status of Deployable Geo-truss Development, Large Space Antenna Systems Technology-1982, *NASA CP-2269*, Part 1, (1983), 513-525.
- (3) Coyner, J. V., Box Truss Development and Its Applications, Large Space Antenna Systems Technology-1984, *NASA CP-2368*, Part 1, (1985), 213-233.
- (4) Onoda, J., Two-Dimensional Deployable Truss Structures for Space Applications, *J. Spacecraft and Rockets*, **25**-2 (1988), 109-116.
- (5) Anderson, M. S. and Nimmo, N. A., Dynamic Characteristics of Statically Determinate Space-Truss Platforms, *J. Spacecraft and Rockets*, **23**-3 (1986), 303-307.
- (6) Dorsey, J. T., Vibration Characteristics of a Deployable Controllable-Geometry Truss Boom, *NASA TP-2160*, (1983), 30.
- (7) Natori, M., Ogura, S., Murohashi, S. and Kuwao, F., Control of Truss Structures Using Member Actuators, *Mechanical Systems and Signal Processing*, **7**-4 (1993), 321-333.
- (8) Nikravesh, P. E., Spatial Kinematic and Dynamic Analysis with Euler Parameters, Computer Aided Analysis and Optimization of Mechanical System Dynamics, *NATO ASI Series*, vol. F9, (1984), 261-281, Springer-Verlag.
- (9) Haug, E. J., Computer-Aided Kinematics and Dynamics of Mechanical Systems, vol. 1, *Basic Methods*, (1989), 343-347, 361-387, 440-445, Allyn and Bacon.
- (10) *DADS Revision 7.5 Reference Manual*, 1, 2 (1993), CADSI.
- (11) ZERO-G CARAVELLE Parabolic Flights User Manual, (1991), 3-45, NOVESPACE-CEV (The Flight Test Center of the French Defense Ministry).
- (12) Sahashi, M., Kobayashi, T., Domon, T. and Inomata, K., A New Torque Sensor of Circumferential Excitation Type Using Magnetostrictive Amorphous Ribbons, *Proc. 6th Sensor Symp.*, (1986), 79-85.
- (13) Abdel-Aziz, Y. I. and Karara, H. M., Direct Linear Transformation from Comparator Coordinates into Object Space Coordinates in Close-Range Photogrammetry, *Proc. Symp. Close-Range Photogrammetry*, (1971), 1-18.