論文 CONTRIBUTED PAPERS

大形展開アンテナ地上展開試験法の検討^{*1} A Study on Ground Testing Method for Large Deployment Antenna

目 黒 在^{*2}
Akira MEGURO

Key Words : Deployable Antenna, Ground Test, Ground Effects, Communication Satellite

Abstract

The ground testing of large antenna deployment is important in verifying its deployment capability in geostationally orbit. But the exact simulation of deployment motion by ground testing is significantly inhibited due to prominent gravitational or atmospheric effects on deployment motion. As a part of verification activity, the object of this study is to estimate these ground effects on deployment motion quantitatively and to define the best method for ground deployment tests. Ground testing equipment was constructed in such a way that gravity effects were canceled by means of suspending reflector from the point at 10 m high. Analytical results with careful consideration to friction torque and air drag torque obtained in the simple model tests closely corresponding to the results of ground testing for actual antenna reflector.

1. はじめに

近い将来に打上げが予定されているマルチビーム通信衛星には、開口径 3 m 以上の大型アンテナ鏡面の搭載が予定されている。このようなアンテナ鏡面の場合、打上げ時には、鏡面を折り畳んでロケットフェアリングに収納し、静止軌道上で展開させる展開方式を採用する必要があるが、したがって、その展開機構設計、試験技術が搭載用アンテナのキーテクノロジーの一つに挙げられる。従来のアンテナ鏡面は開口径が 1 m 程度と小径で重量も軽く、鏡面構造の剛性も高かったため、展開試験も比較的簡単な重力補償方法で済んでいた。ところが、近年のアンテナ鏡面の大型化とそれに伴う鏡面構造の軽量化のために地上試験において従来あまり問題とならなかった重力、大気といった

地上試験環境が試験結果に重大な影響を与える領域に入ってきた。したがって、その影響の評価あるいは補償を正確に行い、試験評価項目に応じた的確な地上展開試験を行うことがアンテナ鏡面の軌道上展開動作の保証にとって最も重要な課題の一つになる。

地上試験における地上試験環境の影響は Land Mobile Satellite System, Large Deployable Reflector, Space Station といった超大型宇宙構造物の地上試験に及ぼす重力の影響^{1,2)}でクローズアップされてきており、我が国では今後試験技術の発展が必要とされている分野である。地上展開試験における展開試験装置および装置構成は、詳細な報告例は少なく、おもに Wrap Rib Antenna, Expandable Truss 等の大型展開構造物の検証実験のなかでの簡単な記述^{3,4)}や実機アンテナの一連の機能確認試験のなかの一つとしての記述⁵⁾に限定されている。

国内においては、従来のアンテナ鏡面直径が小径であったため、アンテナ鏡面よりむしろ太陽電池パドルへの適用例を見いだせるが、アンテナとの要求精度の違いや展開方向の違いから同様の方法を直接アンテナ鏡面に適用することはむずかしい。大気については、その展開運動に及ぼす影響を定量化した例は少なく、振動制御のダイナミクスに及ぼす大気の影響を研究した例⁶⁾に展開運動方程式への導入の可能性を見いだすことができる程度である。

本研究では、アンテナの地上展開試験評価法を提言することを目的とし、大型展開アンテナ展開試験結果に影響を及ぼす地上試験環境のうち、大気、重力について、アンテナ鏡面流体モデルを用いた大気流体抵抗の定式化と展開機構軸受摩擦の定式化、重力補償法の検討、設定誤差要因の検討を行い、展開運動に関わる各要因の定量化を行っている。

^{*1} 昭和 63 年 2 月 6 日原稿受理

^{*2} 日本電信電話(株)NTT 無線システム研究所

2. 地上試験環境要因

大型展開アンテナの地上展開試験の目的として大きく分けて以下の2点が挙げられる。

- (1) 展開機構特性の把握と軌道上展開の可否判断のために必要なデータを取得する。
- (2) 鏡面保持機構の動作およびアンテナ鏡面の解放が確実に行われることを確認し、さらにラッチ衝撃による鏡面構造への影響を調べ、強度、展開精度を確認する。これらの試験目的に対し、最も大きな阻害要因となる地上環境要因は重力および大気であり、逆にこれらの要因以外には大きな阻害要因は考えられない。

2.1 重力

(a) 重力の影響によって生ずる問題点：地上試験環境のうち最も展開運動への影響が大きいのが重力であり、以下のような問題点が生ずる。

- (1) 鏡面構造が柔軟である場合、鏡面のたわみにより形状あるいは重心位置が変化する。
- (2) アンテナ鏡面展開ヒンジ軸回りのモーメントが生ずる。
- (3) 展開機構部に荷重を受けることによって軸受摩擦、クリアランスが変化し、機構部全体の摩擦特性が変化する。

以上の問題点のなかでも、機構部への荷重の大きさは近年の大型アンテナではとくに大きく、展開の可否判断に支障をきたす等、本来の機構特性の把握に重大な誤差を与える。加えて自重による回転モーメントが展開方向へ生じた場合、そのモーメントは展開駆動トルクと比較して遙かに大きな値となるため展開速度、加速度が増加して展開プロファイルを変化させるのと同時に展開を終了してラッチ固定される際の衝撃力が増大して機構部を破壊する危険さえ生ずる。したがって、重力の効果をなんらかの方法で補償することが必要となる。

(b) 重力補償方法：重力の効果を補償する方法としては、従来エアベアリング、水槽、落下、航空機のゼロG飛行、ばね、吊り下げ等が考えられてきたが、実用性や供試体への影響を考えればアンテナ鏡面の展開試験に適用しうる重力補償方法としてはいくつかに限定される。それらのうちトルクばねを展開軸に取り付け、重力による運動エネルギーをばねの弾性エネルギーに吸収する方法⁷⁾およびアンテナ鏡面をいくつかの点で吊り下げ、常に静的にも釣り合やす方法について検討を行った。前者は複数の異なった方向の展開軸に対し同時に重力補償を行うことができ、有効な方法の一つであるが、鏡面構造に対する重力補償が行えない

第1図 横吊りによる重力補償方法

いことと展開軸への取付け時に機構部の加工が必要であることにより検証試験という立場から好ましくない。一方、後者には吊り下げ方法、アンテナ鏡面の設定方法によりいくつかの方法が考えられるが、現在までに重力方向へ展開する鏡面を上方の固定点から伸びの大きな線材で吊り下げる方法⁸⁾および水平方向へ展開する鏡面を上方の固定点から伸びの小さい線材で吊り下げる方法について検討を行った。その結果、アンテナ鏡面全体のはね上げといった一軸回りの運動に限った場合には不確定要因が最も少ないという意味からアンテナ鏡面を水平方向に設置する方法が最適であるという結論を得た。

(c) 横吊りによる重力補償方法：これは第1図に示すように、アンテナ鏡面を横置きに設定し、展開ヒンジ軸の上方延長線上から糸で吊り下げることによって展開ヒンジ軸回りに生ずる重力のモーメントと展開ヒンジ部へ作用する並進・モーメント荷重とをなくすることができる方法である。各自由度方向には以下の五つの釣合式が成立する。

X 方向並進成分

$$\sum_{i=1}^n F_i \cos \alpha_{zi} \sin \alpha_{xi} = R_{x1} + R_{x2} \quad (1)$$

Y 方向並進成分

$$\sum_{i=1}^n F_i \cos \alpha_{zi} \cos \alpha_{xi} = F_g - R_{y1} + R_{y2} \quad (2)$$

Z 方向並進成分

$$\sum_{i=1}^n F_i \sin \alpha_{zi} = R_{z1} + R_{z2} \quad (3)$$

X 軸回りの回転成分

$$\sum_{i=1}^n Z_i F_i \cos \alpha_{zi} \cos \alpha_{xi} = Z_g F_g + R_{x1} D + R_{x2} D \quad (4)$$

Z 軸回りの回転成分

$$\sum_{i=1}^n X_i F_i \cos \alpha_{xi} \cos \alpha_{xi} \\ = X_g F_g + R_{x1} D + R_{x2} D \quad (5)$$

展開ヒンジ部へ作用する並進・モーメント荷重は3本の吊り糸を用いることにより相殺することができるが、吊り糸の設定条件の取りうる値に幅をもたせると同時に各吊り糸の許容力を考慮することにより5本の吊り糸を用いた。

(d) 軸受の荷重依存性：アンテナ鏡面の展開軸には、転がり軸受あるいは球面軸受等の軸受が取り付けられている。この軸受に荷重が作用した場合、荷重の大きさ、方向の変化に応じて、摩擦抵抗トルクが変化するため、この変化分の定量的な見積が必要である。しかし、軸受の摩擦機構は複雑であり、また同一の規格、寸法であっても個々の特性が異なるため、モデル計算のみに頼った高精度な見積は困難である。そこで、ここでは転がり軸受を対象にして、転がり摩擦に対する簡単なモデルを仮定し、実験結果を用いて軸受摩擦のラジアル荷重依存性を定式化した。

実験は後述する大気流体抵抗の測定装置において鏡面ダミーの代りに質量ダミーを設置して行った。第2図は軸受の摩擦トルクをいくつかのラジアル荷重に対して測定した結果である。この結果より実験式を得るため、J. A. Greenwoodらによる転がり摩擦のモデル⁹⁾を考えた。J. A. Greenwoodらは、剛な球体がゴムの溝を転がる場合、転がり面の法線方向の荷重 W に対し、摩擦力 F_b が $F_b = 3\alpha W b / 16R$ で与えられることを示した。ここで、 α は与えられた弾性エネルギーのうち弾性ヒステリシスによって失う分率、 R は球体の半径、 b は接触楕円面の転がり方向の短径であり、 $b = m(nW)^{1/3}$ と表すことができる (m, n は球径、溝径、溝の材料定数で決まる定数)。転がり軸受の場合、ボールおよび内、外輪の材料は鋼であるが、内、

外輪には潤滑用の被膜処理が施されており、溝表面の剛性が小さくなることを考えれば、モデルを適用させることができる。このモデルでは摩擦力 F_b は接触面の法線方向荷重 W の $4/3$ 乗に比例することがわかる。そこで、 $F_b = aW^{4/3}$ を用いて曲線近似すると

$$F_b = 0.561 W^{4/3} \times 10^{-3} \text{ [Nm]} \quad (6)$$

となる。

2.2 大気

(a) 大気の影響によって生ずる問題点：大気の影響も、重力に劣らず大きな影響を展開運動に及ぼし、以下に示すような問題点が生ずる。

(1) 鏡面の展開運動に対し展開ヒンジ軸回りの流体抵抗トルクを生じる。

(2) 大気が静止していない場合、展開運動に対し外乱トルクとして作用する。

(3) 展開機構軸受部の潤滑面に作用し、潤滑特性を変化させる。

以上の問題点のうち(1)、(2)については、今後アンテナ鏡面が大型化されるに伴ってその影響度が著しく大きくなると考えられる。そこで、ここでは大気が展開運動に及ぼす影響として大気流体干渉に着目した。

(b) 大気の影響の評価：大気の流れがアンテナ鏡面に作用する力のうち最も大きなものは動圧による分である。この力は流れの状態、鏡面の形状、寸法によ

第3図 大気流体抵抗測定装置

第2図 軸受摩擦トルクのラジアル荷重依存性

第4図 大気流体抵抗トルク

って決まり、流速と抵抗係数によって整理される。しかし、抵抗係数は理論計算によってはなかなか精度よく求まらないものであり、ここではアンテナ鏡面を単純な円板に置き換えたモデルを作製し、実験結果を用いて定式化を行った。第3図に測定装置を示す。装置はアンテナ鏡面ダミー、回転駆動機構、固定台により構成されている。アンテナ鏡面ダミーは固定台に水平に取り付けられた回転軸の回りに回転し、重力によって生ずる回転方向へのトルクを相殺するために回転軸に対して対称な位置に同一形状、同一重量、重心のアンテナ鏡面ダミーが取り付けられている。第4図に3種類の円板直径のモデルに対して等回転速度運動を行わせた場合の抵抗トルクの測定結果を示した。得られた結果がそれぞれ曲線 $F_a = a\omega^b$ 上にあるとして近似すると、各鏡面直径 D に対して $b=1.7, 2.2, 1.9$ とほぼ2に近い値をとる。ここで、回転円板に作用する抵抗トルクが動圧のみに起因し、かつ回転軸と円板周縁との距離が直径に比べ十分に小さいと仮定した場合の回転円板に作用する抵抗トルクの簡易数学モデルを考えると

$$F_a = 7C_d \rho D^5 \omega^2 / 256 \quad [\text{Nm}]$$

となり、回転速度 ω に関しては2乗に、円板直径 D に関しては5乗にそれぞれ比例することがわかる。そこで、 $b=2$ として再び曲線近似し、それぞれの円板直径に対する係数を整理して大気流体抵抗トルク F_a を

$$F_a = 0.788 D^{4.7} \omega^2 \quad [\text{Nm}] \quad (7)$$

と求めた。ただし、本実験式の適用範囲はレイノルズ数で16,000以下である。

3. 地上展開試験装置

展開試験装置固有の問題点を挙げ、展開挙動への影

第5図 重力補償展開試験装置

響を指摘するため、実鏡面展開アンテナ鏡面を対象に地上展開試験装置を作製し、展開試験を実施した。

3.1 試験装置の構成 横吊りによる重力補償展開試験装置の構成を第5図に示す。試験装置は供試体アンテナ鏡面を水平に固定するための治具、アンテナ鏡面展開軸の延長線上にある上方二つの吊り下げ点を固定するための吊り下げ装置、およびその吊り下げ装置を上方に固定するための治具、さらにアンテナ鏡面を吊り下げる糸から構成される。展開ヒンジ軸には角度検出用のポテンショ・メータ、吊り糸には張力検出用のロードセルがそれぞれ取り付けられている。

試験装置設置に伴う設定誤差は、光学式の三次元測定装置により測定した。

3.2 試験装置の誤差要因 展開試験装置に含まれる誤差要因のうち、とくに展開運動への影響が大きいものとして、展開ヒンジ軸の水平面に対する傾きと上方二つの吊り下げ点に対するずれが考えられる。ここで第6図に示すように、吊り下げ装置の鉛直方向座標軸を y 軸、アンテナ鏡面半径方向を x 軸、鏡面に垂直な方向を z 軸としたアンテナ鏡面上の座標を取り、設定誤差要因として x, z 軸方向のずれ $\Delta x, \Delta z$ 、 x, z 軸回りの傾き $\Delta \psi_x, \Delta \psi_z$ を考える。

(a) x, z 軸方向のずれ: i 番目の吊り糸の吊り下げ点がヒンジ軸から x, z 軸方向に $\Delta x, \Delta z$ だけずれていた場合、この吊り糸の張力ベクトルはアンテナ鏡面に対して (x, z 軸に対して) $\Delta \gamma_x, \Delta \gamma_z$ の角度をもち、展開方向あるいは逆方向の成分を生ずる。 $\Delta \gamma_x, \Delta \gamma_z$ は展開角度 θ の関数であり、

$$\begin{aligned} \sin \Delta \gamma_x \\ = \Delta x \sin (\pi - \theta) \end{aligned}$$

第6図 試験装置設定誤差要因

$$\begin{aligned} & \sqrt{x^2 + \Delta x^2 - 2x\Delta x \cos(\pi - \theta)} \\ \sin \Delta \gamma_z & \\ & = \Delta z \sin(\pi/2 - \theta) \\ & \sqrt{x^2 + \Delta z^2 - 2x\Delta z \cos(\pi/2 - \theta)} \end{aligned}$$

で与えられる。また、展開角度 θ における吊り糸の長さを l'_x, l'_z , $\theta=0$ のときの吊り糸の長さを l_x, l_z , 吊り下げ点の高さを y_x, y_z とすれば,

$$\begin{aligned} l_x &= \sqrt{(\Delta x + x)^2 + y^2} \\ l'_x &= \sqrt{x^2 + \Delta x^2 - 2x\Delta x \cos(\pi - \theta) + y^2} \\ l_z &= \sqrt{x^2 + \Delta z^2 + y^2} \\ l'_z &= \sqrt{x^2 + \Delta z^2 - 2x\Delta z \cos(\pi/2 - \theta) + y^2} \end{aligned}$$

吊り糸のばね定数を k とすれば、張力の変化 ΔF_{ix} , ΔF_{iz} は

$$\Delta F_{ix} = k(l'_x - l_x), \quad \Delta F_{iz} = k(l'_z - l_z)$$

したがって、 i 番目の吊り糸のずれによって生ずる展開方向へのモーメント M_i は,

$$\begin{aligned} M_i &= (F_i + \Delta F_{ix}) \cos \alpha \Delta x \sin \theta x_i \\ & \sqrt{x^2 + \Delta x^2 - 2x\Delta x \cos \theta} \\ & + (F_i + \Delta F_{iz}) \cos \alpha \cos \theta x_i \\ & \sqrt{x^2 + \Delta z^2 - 2x\Delta z \sin \theta} \end{aligned} \quad (8)$$

ここで、 α は吊り糸の水平面に対する角度であり、

$$\tan \alpha = y_i/x_i$$

(b) x 軸, y 軸に対する傾き: アンテナ鏡面ヒンジ軸が x, z 各軸回りに $\Delta \psi_x, \Delta \psi_z$ だけ傾いた場合に生ずる重力ベクトル F_g の x, z 各軸方向成分は,

$$F_{gx} = F_g \sin \Delta \psi_x, \quad F_{gz} = F_g \sin \Delta \psi_z$$

である。これらの成分により生ずる展開方向のモーメントを M_{gx}, M_{gz} , 重心の座標を x_0, z_0 とすれば,

$$M_{gx} = F_{gx} x_0 \cos \theta = x_0 F_g \sin \Delta \psi_x \cos \theta$$

$$M_{gz} = F_{gz} z_0 \sin \theta = z_0 F_g \sin \Delta \psi_z \sin \theta$$

となる。これらをまとめると,

$$\begin{aligned} M_g &= F_g x_0 (\sin \Delta \psi_x \cos \theta \\ & + \sin \Delta \psi_z \sin \theta) \end{aligned} \quad (9)$$

となる。以上はアンテナ鏡面の自重によって生ずる分であるが、アンテナ鏡面が傾いた場合、同時に吊り糸のずれも生ずるため、(1)の吊り糸のずれによる展開方向へのモーメントも加えなければならない。

4. 地上展開試験評価方法

4.1 試験条件

(a) 展開試験装置設定条件: 第7図に示すように、アンテナ鏡面のヒンジ軸軸受に異なったラジアル方向荷重を与える二つの吊り下げパターンを考えた。式(1)~(5)を用いてこれらの吊り下げパターンにおける各吊り糸張力の値およびラジアル方向荷重を計算すると、第1表に示すようになる。

吊り下げパターン 1

吊り下げパターン 2

第7図 アンテナ鏡面吊り下げパターン

第1表 展開試験装置設定条件

	吊り下げパターン 1	吊り下げパターン 2
吊り糸張力		
吊り糸 1	1.509 N	63.33 N
吊り糸 2	34.30 N	13.84 N
吊り糸 3	61.61 N	27.35 N
吊り糸 4	7.458 N	29.40 N
吊り糸 5	58.80 N	29.40 N
ラジアル荷重	9.996 N	9.085 N

第2表 展開試験条件

試験条件番号	吊り下げパターン	初期展開トルク
1 (5)	1 (2)	0.371 Nm
2 (6)	1 (2)	0.324 Nm
3 (7)	1 (2)	0.277 Nm
4 (8)	1 (2)	0.229 Nm
ばね定数	0.181 Nm/rad	

(b) 展開試験条件: アンテナ鏡面展開機構には合計2個の駆動ばねが取り付けられており、各駆動ばねの初期ねじり角度を変化させて組み合わせることにより駆動ばねトルク値を変えて試験条件を設定した。第2表に試験条件を示す。

4.2 アンテナ鏡面地上展開シミュレーションモデル アンテナ鏡面の地上展開運動は、以下のような運動方程式によって考えた。

$$I \cdot d\omega/dt = T_s - F_a - F_b + M_g + \sum M_i \quad (10)$$

ここで、 I : アンテナ鏡面の慣性モーメント, T_s : 展開駆動トルク, F_a : 大気流体抵抗トルク, F_b : 摩擦抵抗トルク, M_g : アンテナ鏡面の傾きによって生ずるモーメント, $\sum M_i$: 吊り糸のずれによって生ずるモーメントであり、これらのうち I は実測値, M_g , $\sum M_i$ はすでに述べてきた実験式あるいは実測値, T_s は試験条件表によっている。大気抵抗 F_a については、本試験条件ではレイノルズ数は10,000以下にな

第3表 展開試験結果

試験条件番号	展開時間 (s)	最終角速度 (rad/s)	最大角速度 (rad/s)
パターン1			
1	18.88	0.0651	0.0883
2	20.69	0.0487	0.0799
3	22.99	0.0335	0.0730
4	—	—	0.0618
パターン2			
5	19.14	0.0555	0.0860
6	20.09	0.0522	0.0813
7	23.88	0.0290	0.0703
8	—	—	0.0597

第4表 地上展開シミュレーション計算結果

試験条件番号	展開時間 (s)	最終角速度 (rad/s)	最大角速度 (rad/s)
1	18.57	0.0700	0.0840
2	20.38	0.0630	0.0764
3	22.71	0.0520	0.0705
4	25.86	0.0386	0.0613

り実験式の適用範囲にある。 F_0 は本来展開機構全体として評価される摩擦抵抗値であるが、ここでは軸受単体の摩擦抵抗トルクとして実験式(6)を用いた。

4.3 試験結果

(a) 試験装置設定誤差測定結果：アンテナ鏡面上吊り下げ点および上方吊り下げ点の三次元測定によりアンテナ鏡面の傾きおよび吊り糸の傾きを求め、それらにより生ずる展開方向へのトルクを計算すると、パターン1で0.070 Nm、パターン2で-0.17 Nmである。

(b) 展開試験結果：第3表には展開試験によって得られた各試験条件における展開時間、ラッチ固定時の角速度、最大角速度を、第4表にはシミュレーション計算によって得られたパターン1に対する展開時間、ラッチ固定時の角速度、最大角速度をそれぞれまとめて示した。第8図には試験条件番号1の展開角度、角速度の時間変化を試験結果と計算結果とを比較して示した。展開角度の時間変化には顕著な特徴は現れないが、角速度を見ると速度の増加に伴って大気の影響が現れ、加速度が低下してゆく様子やラッチ固定時の急激な減速と、ラッチ爪の山を越えた後の一瞬の加速の様子がわかる。駆動トルクが最も小さい条件では（試験条件番号4、8）ではラッチ固定まで至らず、展開は終了しなかった。また、シミュレーション計算結果については、ラッチ機構による外力トルクを計算モデルに取り入れていないため、展開の終了付近における展開プロファイルあるいは最終展開角速度に多少

第8図 展開角度、角速度の時間変化

のずれが生じているが、展開時間、最大角速度において両者は非常に一致を示しており、要因見積りに著しい誤りがないことが確認された。

4.4 検討および考察 試験装置設定誤差により生ずる展開方向へのトルクは吊り糸のずれによる分とアンテナ鏡面の傾きによる分とがほぼ同程度で反対の方向であるため、両者の相殺により結果として小さくなるが、吊り糸の釣合いに大きく影響されるため、吊り下げパターンの違いは軸受ラジアル方向荷重よりむしろ設定誤差により生ずるトルクのほうに大きな影響を与える。本試験で展開を完了しなかった条件について考えてみる。試験によって得られた角加速度プロファイルから推定して、アンテナ鏡面がラッチ爪に当たるのは、展開角度 $\theta=1.01$ rad前後であり、このとき試験条件番号4と8の場合の展開角速度 ω は、 $\omega=0.045$ rad/s、角運動エネルギー $I\omega^2=0.045$ J、駆動トルク $T_s=0.0441$ Nmである。展開試験結果の角加速度プロファイルから得たラッチ爪による減速の最大値は $0.0035\sim0.0052$ rad/s²であり、このときトルクは $0.08\sim0.12$ Nmである。また、アンテナ鏡面がラッチ爪に当たってからラッチ爪によるトルクが最大になるまでの角度は約 0.122 radであるので、この間にアンテナ鏡面が受ける角運動エネルギーの損失は約 0.061 Jとなる（線形に変化するとした場合）。したがって、アンテナ鏡面はラッチ爪を押し上げることができず、展開は終了しない。それでは軌道上ではどうであろう。第9図は大気抵抗トルク F_0 が0の場合の展開プロファイルをモデルにより計算したものである。この場合、ラッチ爪に当たる瞬間の角速度は 0.112 rad/sに、運動エネルギー $I\omega^2=0.287$ Jに増加し、ラッチ爪による角運動エネルギーの損失を十分に上まわ

第9図 大気抵抗のない場合の展開プロファイル

第10図 地上試験環境の影響

るため、展開トルクが小さくとも展開が終了することが推定される。これは大気の影響分だけ考えた場合であり、軌道上条件に直接対応しているわけではないが、展開の可否判断を地上展開の可否だけではできないことは言える。第10図は、二つの試験装置設定条件において、地上試験環境によって生ずる要因である大気流体抵抗トルク、軸受への荷重によるトルク増分、およびアンテナ鏡面設定誤差に生ずるトルクについて、それぞれの最大値が全体トルク中に占める割合を示したものである。図示した摩擦抵抗トルクは試験装置によって付加的に生じているものであり、本来機構のもつ摩擦の分は含まれていない。供試体の設定に伴う微調整治具が不十分であったため、誤差の追込みが甘く、設定誤差の占める割合が大きくなっている。また、大気による抵抗トルクも駆動トルクに近い値であり、重力の補償ならびに大気の見積りに高い精度が必要であることがわかる。とくに大気については鏡面直径の増大に対して飛躍的に増大するために、今後ますます慎重な検討が必要である。

5. おわりに

大型展開アンテナの展開試験を地上で行う場合に、全ての条件を軌道上宇宙環境に合わせることは非常に困難であり、設定可能ないくつかの環境条件下において行う試験結果の総合的な判断により機能の検証を行

わざるをえない。したがって、試験環境および試験装置の特性を正確に把握することが必要である。本研究では常温、常圧、重力下でアンテナ鏡面の展開試験を行い、軌道上動特性を予測する方法を検討した結果、以下のような結論を得た。

- (1) アンテナ鏡面の一軸回りの動作に及ぼす重力の影響の補償には、横吊りによる方法が最適である。
- (2) 地上試験では大気による付加トルクと軸受摩擦増加は避けられず、展開速度は軌道上動作より60%減少する。
- (3) 地上試験によって展開機能の評価を行うには、大気や軸受摩擦による付加的なトルクの増加のほかにも設定誤差の影響を定量的に考慮する必要がある。

本研究において、大気、軸受摩擦、設定誤差による付加的なトルクの見積り方法を定量化し、その妥当性を実験的に確認すると同時に、重力補償試験方法の一つを提案できた。今後のアンテナ鏡面の大型化に伴い、地上展開試験のもつ意味がますます重要になってくると本試験方法は有効な手段となると考える。

参考文献

- 1) Hanks, Brantly R. and Pison, Larry D.: Large Space Structure Raise Testing Challenges, Astronauts & Aeronautics, Oct. 1983, pp. 34-53.
- 2) Hanks, Brantly R.: Control of Flexible Structure (COFS) Flight Experiment Background and Description, Large Space Antenna Systems Technology, December 4-6, 1984, pp. 893-908.
- 3) Brazzini, G., Broustet, Y., Garnier, C. and Picard, P.: Kinematic Analysis of Large Deployable Truss Antenna, IAF-85-74 (1985).
- 4) Development of the 15 Meter Diameter Hoop Column Antenna, NASA CR-4038 (1986).
- 5) Stella, D., Morgnti, F. and Nielcen, G.: Contraves' Antenna Tip Hinge Mechanism for Selenia Spazio's 20/30 GHz Antenna, Proc. 2nd ESA Workshop on Mechanical Technology for Antenna, ESTEC Noordwijk, 20-22 May 1986, ESA SP-261, August 1986.
- 6) Juang, Jer-Nan and Horta, Lucas G.: Effect of Atmosphere on Slewing Control of a Flexible Structure, the 27th AIAA/ASME/ASCE/AHS Structure, Structural Dynamics and Materials Conference, AIAA Paper 86-1001 (1986).
- 7) 目黒 在, 養毛正洋, 板波 隆: アンテナ展開試験法の基本検討, 第29回宇宙科学技術連合講演会前集, 1985, pp.234-235.
- 8) 目黒 在, 養毛正洋, 八坂哲雄: 衛星搭載用展開アンテナの地上展開試験法, 第28回構造強度に関する講演会前集, 1986, pp.52-55.
- 9) Greenwood, J. A., Minshall, H. and Tabor, D.: Hysteresis Losses in Rolling and Sliding Friction, Proc. Roy. Soc. A, Vol. 259, No. 1299 (1961), pp. 480-507.

論文 CONTRIBUTED PAPERS

大形展開アンテナ地上展開試験法の検討^{*1} A Study on Ground Testing Method for Large Deployment Antenna

目 黒 在^{*2}
Akira MEGURO

Key Words : Deployable Antenna, Ground Test, Ground Effects, Communication Satellite

Abstract

The ground testing of large antenna deployment is important in verifying its deployment capability in geostationally orbit. But the exact simulation of deployment motion by ground testing is significantly inhibited due to prominent gravitational or atmospheric effects on deployment motion. As a part of verification activity, the object of this study is to estimate these ground effects on deployment motion quantitatively and to define the best method for ground deployment tests. Ground testing equipment was constructed in such a way that gravity effects were canceled by means of suspending reflector from the point at 10 m high. Analytical results with careful consideration to friction torque and air drag torque obtained in the simple model tests closely corresponding to the results of ground testing for actual antenna reflector.

1. はじめに

近い将来に打上げが予定されているマルチビーム通信衛星には、開口径 3 m 以上の大型アンテナ鏡面の搭載が予定されている。このようなアンテナ鏡面の場合、打上げ時には、鏡面を折り畳んでロケットフェアリングに収納し、静止軌道上で展開させる展開方式を採用する必要があるが、したがって、その展開機構設計、試験技術が搭載用アンテナのキーテクノロジーの一つに挙げられる。従来のアンテナ鏡面は開口径が 1 m 程度と小径で重量も軽く、鏡面構造の剛性も高かったため、展開試験も比較的簡単な重力補償方法で済んでいた。ところが、近年のアンテナ鏡面の大型化とそれに伴う鏡面構造の軽量化のために地上試験において従来あまり問題とならなかった重力、大気といった

地上試験環境が試験結果に重大な影響を与える領域に入ってきた。したがって、その影響の評価あるいは補償を正確に行い、試験評価項目に応じた的確な地上展開試験を行うことがアンテナ鏡面の軌道上展開動作の保証にとって最も重要な課題の一つになる。

地上試験における地上試験環境の影響は Land Mobile Satellite System, Large Deployable Reflector, Space Station といった超大型宇宙構造物の地上試験に及ぼす重力の影響^{1,2)}でクローズアップされてきており、我が国では今後試験技術の発展が必要とされている分野である。地上展開試験における展開試験装置および装置構成は、詳細な報告例は少なく、おもに Wrap Rib Antenna, Expandable Truss 等の大型展開構造物の検証実験のなかでの簡単な記述^{3,4)}や実機アンテナの一連の機能確認試験のなかの一つとしての記述⁵⁾に限定されている。

国内においては、従来のアンテナ鏡面直径が小径であったため、アンテナ鏡面よりむしろ太陽電池パドルへの適用例を見いだせるが、アンテナとの要求精度の違いや展開方向の違いから同様の方法を直接アンテナ鏡面に適用することはむずかしい。大気については、その展開運動に及ぼす影響を定量化した例は少なく、振動制御のダイナミクスに及ぼす大気の影響を研究した例⁶⁾に展開運動方程式への導入の可能性を見いだすことができる程度である。

本研究では、アンテナの地上展開試験評価法を提言することを目的とし、大型展開アンテナ展開試験結果に影響を及ぼす地上試験環境のうち、大気、重力について、アンテナ鏡面流体モデルを用いた大気流体抵抗の定式化と展開機構軸受摩擦の定式化、重力補償法の検討、設定誤差要因の検討を行い、展開運動に関わる各要因の定量化を行っている。

^{*1} 昭和 63 年 2 月 6 日原稿受理

^{*2} 日本電信電話(株)NTT 無線システム研究所

2. 地上試験環境要因

大型展開アンテナの地上展開試験の目的として大きく分けて以下の2点が挙げられる。

- (1) 展開機構特性の把握と軌道上展開の可否判断のために必要なデータを取得する。
- (2) 鏡面保持機構の動作およびアンテナ鏡面の解放が確実に行われることを確認し、さらにラッチ衝撃による鏡面構造への影響を調べ、強度、展開精度を確認する。これらの試験目的に対し、最も大きな阻害要因となる地上環境要因は重力および大気であり、逆にこれらの要因以外には大きな阻害要因は考えられない。

2.1 重力

(a) 重力の影響によって生ずる問題点：地上試験環境のうち最も展開運動への影響が大きいのが重力であり、以下のような問題点が生ずる。

- (1) 鏡面構造が柔軟である場合、鏡面のたわみにより形状あるいは重心位置が変化する。
- (2) アンテナ鏡面展開ヒンジ軸回りのモーメントが生ずる。
- (3) 展開機構部に荷重を受けることによって軸受摩擦、クリアランスが変化し、機構部全体の摩擦特性が変化する。

以上の問題点のなかでも、機構部への荷重の大きさは近年の大型アンテナではとくに大きく、展開の可否判断に支障をきたす等、本来の機構特性の把握に重大な誤差を与える。加えて自重による回転モーメントが展開方向へ生じた場合、そのモーメントは展開駆動トルクと比較して遙かに大きな値となるため展開速度、加速度が増加して展開プロファイルを変化させるのと同時に展開を終了してラッチ固定される際の衝撃力が増大して機構部を破壊する危険さえ生ずる。したがって、重力の効果をなんらかの方法で補償することが必要となる。

(b) 重力補償方法：重力の効果を補償する方法としては、従来エアベアリング、水槽、落下、航空機のゼロG飛行、ばね、吊り下げ等が考えられてきたが、実用性や供試体への影響を考えればアンテナ鏡面の展開試験に適用しうる重力補償方法としてはいくつかに限定される。それらのうちトルクばねを展開軸に取り付け、重力による運動エネルギーをばねの弾性エネルギーに吸収する方法⁷⁾およびアンテナ鏡面をいくつかの点で吊り下げ、常に静的にも釣り合やす方法について検討を行った。前者は複数の異なった方向の展開軸に対し同時に重力補償を行うことができ、有効な方法の一つであるが、鏡面構造に対する重力補償が行えない

第1図 横吊りによる重力補償方法

いことと展開軸への取付け時に機構部の加工が必要であることにより検証試験という立場から好ましくない。一方、後者には吊り下げ方法、アンテナ鏡面の設定方法によりいくつかの方法が考えられるが、現在までに重力方向へ展開する鏡面を上方の固定点から伸びの大きな線材で吊り下げる方法⁸⁾および水平方向へ展開する鏡面を上方の固定点から伸びの小さい線材で吊り下げる方法について検討を行った。その結果、アンテナ鏡面全体のはね上げといった一軸回りの運動に限った場合には不確定要因が最も少ないという意味からアンテナ鏡面を水平方向に設置する方法が最適であるという結論を得た。

(c) 横吊りによる重力補償方法：これは第1図に示すように、アンテナ鏡面を横置きに設定し、展開ヒンジ軸の上方延長線上から糸で吊り下げることによって展開ヒンジ軸回りに生ずる重力のモーメントと展開ヒンジ部へ作用する並進・モーメント荷重とをなくすることができる方法である。各自由度方向には以下の五つの釣合式が成立する。

X 方向並進成分

$$\sum_{i=1}^n F_i \cos \alpha_{xi} \sin \alpha_{zi} = R_{x1} + R_{x2} \quad (1)$$

Y 方向並進成分

$$\sum_{i=1}^n F_i \cos \alpha_{xi} \cos \alpha_{zi} = F_g - R_{y1} + R_{y2} \quad (2)$$

Z 方向並進成分

$$\sum_{i=1}^n F_i \sin \alpha_{zi} = R_{z1} + R_{z2} \quad (3)$$

X 軸回りの回転成分

$$\sum_{i=1}^n Z_i F_i \cos \alpha_{xi} \cos \alpha_{zi} = Z_g F_g + R_{x1} D + R_{x2} D \quad (4)$$

Z 軸回りの回転成分

$$\sum_{i=1}^n X_i F_i \cos \alpha_{xi} \cos \alpha_{xi} \\ = X_g F_g + R_{x1} D + R_{x2} D \quad (5)$$

展開ヒンジ部へ作用する並進・モーメント荷重は3本の吊り糸を用いることにより相殺することができるが、吊り糸の設定条件の取りうる値に幅をもたせると同時に各吊り糸の許容力を考慮することにより5本の吊り糸を用いた。

(d) 軸受の荷重依存性：アンテナ鏡面の展開軸には、転がり軸受あるいは球面軸受等の軸受が取り付けられている。この軸受に荷重が作用した場合、荷重の大きさ、方向の変化に応じて、摩擦抵抗トルクが変化するため、この変化分の定量的な見積が必要である。しかし、軸受の摩擦機構は複雑であり、また同一の規格、寸法であっても個々の特性が異なるため、モデル計算のみに頼った高精度な見積は困難である。そこで、ここでは転がり軸受を対象にして、転がり摩擦に対する簡単なモデルを仮定し、実験結果を用いて軸受摩擦のラジアル荷重依存性を定式化した。

実験は後述する大気流体抵抗の測定装置において鏡面ダミーの代りに質量ダミーを設置して行った。第2図は軸受の摩擦トルクをいくつかのラジアル荷重に対して測定した結果である。この結果より実験式を得るため、J. A. Greenwoodらによる転がり摩擦のモデル⁹⁾を考えた。J. A. Greenwoodらは、剛な球体がゴムの溝を転がる場合、転がり面の法線方向の荷重 W に対し、摩擦力 F_b が $F_b = 3\alpha W b / 16R$ で与えられることを示した。ここで、 α は与えられた弾性エネルギーのうち弾性ヒステリシスによって失う分率、 R は球体の半径、 b は接触楕円面の転がり方向の短径であり、 $b = m(nW)^{1/3}$ と表すことができる (m, n は球径、溝径、溝の材料定数で決まる定数)。転がり軸受の場合、ボールおよび内、外輪の材料は鋼であるが、内、

外輪には潤滑用の被膜処理が施されており、溝表面の剛性が小さくなることを考えれば、モデルを適用させることができる。このモデルでは摩擦力 F_b は接触面の法線方向荷重 W の $4/3$ 乗に比例することがわかる。そこで、 $F_b = aW^{4/3}$ を用いて曲線近似すると

$$F_b = 0.561 W^{4/3} \times 10^{-3} \text{ [Nm]} \quad (6)$$

となる。

2.2 大気

(a) 大気の影響によって生ずる問題点：大気の影響も、重力に劣らず大きな影響を展開運動に及ぼし、以下に示すような問題点が生ずる。

(1) 鏡面の展開運動に対し展開ヒンジ軸回りの流体抵抗トルクを生じる。

(2) 大気が静止していない場合、展開運動に対し外乱トルクとして作用する。

(3) 展開機構軸受部の潤滑面に作用し、潤滑特性を変化させる。

以上の問題点のうち(1)、(2)については、今後アンテナ鏡面が大型化されるに伴ってその影響度が著しく大きくなると考えられる。そこで、ここでは大気が展開運動に及ぼす影響として大気流体干渉に着目した。

(b) 大気の影響の評価：大気の流れがアンテナ鏡面に作用する力のうち最も大きなものは動圧による分である。この力は流れの状態、鏡面の形状、寸法によ

第2図 軸受摩擦トルクのラジアル荷重依存性

第3図 大気流体抵抗測定装置

第4図 大気流体抵抗トルク

って決まり、流速と抵抗係数によって整理される。しかし、抵抗係数は理論計算によってはなかなか精度よく求まらないものであり、ここではアンテナ鏡面を単純な円板に置き換えたモデルを作製し、実験結果を用いて定式化を行った。第3図に測定装置を示す。装置はアンテナ鏡面ダミー、回転駆動機構、固定台により構成されている。アンテナ鏡面ダミーは固定台に水平に取り付けられた回転軸の回りに回転し、重力によって生ずる回転方向へのトルクを相殺するために回転軸に対して対称な位置に同一形状、同一重量、重心のアンテナ鏡面ダミーが取り付けられている。第4図に3種類の円板直径のモデルに対して等回転速度運動を行わせた場合の抵抗トルクの測定結果を示した。得られた結果がそれぞれ曲線 $F_a = a\omega^b$ 上にあるとして近似すると、各鏡面直径 D に対して $b=1.7, 2.2, 1.9$ とほぼ2に近い値をとる。ここで、回転円板に作用する抵抗トルクが動圧のみに起因し、かつ回転軸と円板周縁との距離が直径に比べ十分に小さいと仮定した場合の回転円板に作用する抵抗トルクの簡易数学モデルを考えると

$$F_a = 7C_d \rho D^5 \omega^2 / 256 \quad [\text{Nm}]$$

となり、回転速度 ω に関しては2乗に、円板直径 D に関しては5乗にそれぞれ比例することがわかる。そこで、 $b=2$ として再び曲線近似し、それぞれの円板直径に対する係数を整理して大気流体抵抗トルク F_a を

$$F_a = 0.788 D^{4.7} \omega^2 \quad [\text{Nm}] \quad (7)$$

と求めた。ただし、本実験式の適用範囲はレイノルズ数で16,000以下である。

3. 地上展開試験装置

展開試験装置固有の問題点を挙げ、展開挙動への影

第5図 重力補償展開試験装置

響を指摘するため、実鏡面展開アンテナ鏡面を対象に地上展開試験装置を作製し、展開試験を実施した。

3.1 試験装置の構成 横吊りによる重力補償展開試験装置の構成を第5図に示す。試験装置は供試体アンテナ鏡面を水平に固定するための治具、アンテナ鏡面展開軸の延長線上にある上方二つの吊り下げ点を固定するための吊り下げ装置、およびその吊り下げ装置を上方に固定するための治具、さらにアンテナ鏡面を吊り下げる糸から構成される。展開ヒンジ軸には角度検出用のポテンショ・メータ、吊り糸には張力検出用のロードセルがそれぞれ取り付けられている。

試験装置設置に伴う設定誤差は、光学式の三次元測定装置により測定した。

3.2 試験装置の誤差要因 展開試験装置に含まれる誤差要因のうち、とくに展開運動への影響が大きいものとして、展開ヒンジ軸の水平面に対する傾きと上方二つの吊り下げ点に対するずれが考えられる。ここで第6図に示すように、吊り下げ装置の鉛直方向座標軸を y 軸、アンテナ鏡面半径方向を x 軸、鏡面に垂直な方向を z 軸としたアンテナ鏡面上の座標を取り、設定誤差要因として x, z 軸方向のずれ $\Delta x, \Delta z$ 、 x, z 軸回りの傾き $\Delta \psi_x, \Delta \psi_z$ を考える。

(a) x, z 軸方向のずれ: i 番目の吊り糸の吊り下げ点がヒンジ軸から x, z 軸方向に $\Delta x, \Delta z$ だけずれていた場合、この吊り糸の張力ベクトルはアンテナ鏡面に対して (x, z 軸に対して) $\Delta \gamma_x, \Delta \gamma_z$ の角度をもち、展開方向あるいは逆方向の成分を生ずる。 $\Delta \gamma_x, \Delta \gamma_z$ は展開角度 θ の関数であり、

$$\begin{aligned} \sin \Delta \gamma_x &= \Delta x \sin(\pi - \theta) \\ \sin \Delta \gamma_z &= \Delta z \sin(\pi - \theta) \end{aligned}$$

第6図 試験装置設定誤差要因

$$\begin{aligned} & \sqrt{x^2 + \Delta x^2 - 2x\Delta x \cos(\pi - \theta)} \\ \sin \Delta \gamma_z & \\ & = \Delta z \sin(\pi/2 - \theta) \\ & \sqrt{x^2 + \Delta z^2 - 2x\Delta z \cos(\pi/2 - \theta)} \end{aligned}$$

で与えられる。また、展開角度 θ における吊り糸の長さを l'_x, l'_z , $\theta=0$ のときの吊り糸の長さを l_x, l_z , 吊り下げ点の高さを y_x, y_z とすれば,

$$\begin{aligned} l_x &= \sqrt{(\Delta x + x)^2 + y^2} \\ l'_x &= \sqrt{x^2 + \Delta x^2 - 2x\Delta x \cos(\pi - \theta) + y^2} \\ l_z &= \sqrt{x^2 + \Delta z^2 + y^2} \\ l'_z &= \sqrt{x^2 + \Delta z^2 - 2x\Delta z \cos(\pi/2 - \theta) + y^2} \end{aligned}$$

吊り糸のばね定数を k とすれば、張力の変化 ΔF_{ix} , ΔF_{iz} は

$$\Delta F_{ix} = k(l'_x - l_x), \quad \Delta F_{iz} = k(l'_z - l_z)$$

したがって、 i 番目の吊り糸のずれによって生ずる展開方向へのモーメント M_i は,

$$\begin{aligned} M_i &= (F_i + \Delta F_{ix}) \cos \alpha \Delta x \sin \theta x_i \\ & \sqrt{x^2 + \Delta x^2 - 2x\Delta x \cos \theta} \\ & + (F_i + \Delta F_{iz}) \cos \alpha \cos \theta x_i \\ & \sqrt{x^2 + \Delta z^2 - 2x\Delta z \sin \theta} \end{aligned} \quad (8)$$

ここで、 α は吊り糸の水平面に対する角度であり、

$$\tan \alpha = y_i/x_i$$

(b) x 軸, y 軸に対する傾き: アンテナ鏡面ヒンジ軸が x, z 各軸回りに $\Delta \psi_x, \Delta \psi_z$ だけ傾いた場合に生ずる重力ベクトル F_g の x, z 各軸方向成分は,

$$F_{gx} = F_g \sin \Delta \psi_x, \quad F_{gz} = F_g \sin \Delta \psi_z$$

である。これらの成分により生ずる展開方向のモーメントを M_{gx}, M_{gz} , 重心の座標を x_0, z_0 とすれば,

$$M_{gx} = F_{gx} x_0 \cos \theta = x_0 F_g \sin \Delta \psi_x \cos \theta$$

$$M_{gz} = F_{gz} z_0 \sin \theta = z_0 F_g \sin \Delta \psi_z \sin \theta$$

となる。これらをまとめると,

$$\begin{aligned} M_g &= F_g x_0 (\sin \Delta \psi_x \cos \theta \\ & + \sin \Delta \psi_z \sin \theta) \end{aligned} \quad (9)$$

となる。以上はアンテナ鏡面の自重によって生ずる分であるが、アンテナ鏡面が傾いた場合、同時に吊り糸のずれも生ずるため、(1)の吊り糸のずれによる展開方向へのモーメントも加えなければならない。

4. 地上展開試験評価方法

4.1 試験条件

(a) 展開試験装置設定条件: 第7図に示すように、アンテナ鏡面のヒンジ軸軸受に異なったラジアル方向荷重を与える二つの吊り下げパターンを考えた。式(1)~(5)を用いてこれらの吊り下げパターンにおける各吊り糸張力の値およびラジアル方向荷重を計算すると、第1表に示すようになる。

吊り下げパターン 1

吊り下げパターン 2

第7図 アンテナ鏡面吊り下げパターン

第1表 展開試験装置設定条件

	吊り下げパターン 1	吊り下げパターン 2
吊り糸張力		
吊り糸 1	1.509 N	63.33 N
吊り糸 2	34.30 N	13.84 N
吊り糸 3	61.61 N	27.35 N
吊り糸 4	7.458 N	29.40 N
吊り糸 5	58.80 N	29.40 N
ラジアル荷重	9.996 N	9.085 N

第2表 展開試験条件

試験条件番号	吊り下げパターン	初期展開トルク
1 (5)	1 (2)	0.371 Nm
2 (6)	1 (2)	0.324 Nm
3 (7)	1 (2)	0.277 Nm
4 (8)	1 (2)	0.229 Nm
ばね定数	0.181 Nm/rad	

(b) 展開試験条件: アンテナ鏡面展開機構には合計2個の駆動ばねが取り付けられており、各駆動ばねの初期ねじり角度を変化させて組み合わせることにより駆動ばねトルク値を変えて試験条件を設定した。第2表に試験条件を示す。

4.2 アンテナ鏡面地上展開シミュレーションモデル アンテナ鏡面の地上展開運動は、以下のような運動方程式によって考えた。

$$I \cdot d\omega/dt = T_s - F_a - F_b + M_g + \sum M_i \quad (10)$$

ここで、 I : アンテナ鏡面の慣性モーメント, T_s : 展開駆動トルク, F_a : 大気流体抵抗トルク, F_b : 摩擦抵抗トルク, M_g : アンテナ鏡面の傾きによって生ずるモーメント, $\sum M_i$: 吊り糸のずれによって生ずるモーメントであり、これらのうち I は実測値, M_g , $\sum M_i$ はすでに述べてきた実験式あるいは実測値, T_s は試験条件表によっている。大気抵抗 F_a については、本試験条件ではレイノルズ数は10,000以下にな

第3表 展開試験結果

試験条件番号	展開時間 (s)	最終角速度 (rad/s)	最大角速度 (rad/s)
パターン1			
1	18.88	0.0651	0.0883
2	20.69	0.0487	0.0799
3	22.99	0.0335	0.0730
4	—	—	0.0618
パターン2			
5	19.14	0.0555	0.0860
6	20.09	0.0522	0.0813
7	23.88	0.0290	0.0703
8	—	—	0.0597

第4表 地上展開シミュレーション計算結果

試験条件番号	展開時間 (s)	最終角速度 (rad/s)	最大角速度 (rad/s)
1	18.57	0.0700	0.0840
2	20.38	0.0630	0.0764
3	22.71	0.0520	0.0705
4	25.86	0.0386	0.0613

り実験式の適用範囲にある。 F_0 は本来展開機構全体として評価される摩擦抵抗値であるが、ここでは軸受単体の摩擦抵抗トルクとして実験式(6)を用いた。

4.3 試験結果

(a) 試験装置設定誤差測定結果：アンテナ鏡面上吊り下げ点および上方吊り下げ点の三次元測定によりアンテナ鏡面の傾きおよび吊り糸の傾きを求め、それらにより生ずる展開方向へのトルクを計算すると、パターン1で0.070 Nm、パターン2で-0.17 Nmである。

(b) 展開試験結果：第3表には展開試験によって得られた各試験条件における展開時間、ラッチ固定時の角速度、最大角速度を、第4表にはシミュレーション計算によって得られたパターン1に対する展開時間、ラッチ固定時の角速度、最大角速度をそれぞれまとめて示した。第8図には試験条件番号1の展開角度、角速度の時間変化を試験結果と計算結果とを比較して示した。展開角度の時間変化には顕著な特徴は現れないが、角速度を見ると速度の増加に伴って大気の影響が現れ、加速度が低下してゆく様子やラッチ固定時の急激な減速と、ラッチ爪の山を越えた後の一瞬の加速の様子がわかる。駆動トルクが最も小さい条件では(試験条件番号4, 8)ではラッチ固定まで至らず、展開は終了しなかった。また、シミュレーション計算結果については、ラッチ機構による外力トルクを計算モデルに取り入れていないため、展開の終了付近における展開プロファイルあるいは最終展開角速度に多少

第8図 展開角度、角速度の時間変化

のずれが生じているが、展開時間、最大角速度において両者は非常に一致を示しており、要因見積りに著しい誤りがないことが確認された。

4.4 検討および考察 試験装置設定誤差により生ずる展開方向へのトルクは吊り糸のずれによる分とアンテナ鏡面の傾きによる分とがほぼ同程度で反対の方向であるため、両者の相殺により結果として小さくなるが、吊り糸の釣合いに大きく影響されるため、吊り下げパターンの違いは軸受ラジアル方向荷重よりむしろ設定誤差により生ずるトルクのほうに大きな影響を与える。本試験で展開を完了しなかった条件について考えてみる。試験によって得られた角加速度プロファイルから推定して、アンテナ鏡面がラッチ爪に当たるのは、展開角度 $\theta=1.01$ rad前後であり、このとき試験条件番号4と8の場合の展開角速度 ω は、 $\omega=0.045$ rad/s、角運動エネルギー $I\omega^2=0.045$ J、駆動トルク $T_s=0.0441$ Nmである。展開試験結果の角加速度プロファイルから得たラッチ爪による減速の最大値は $0.0035\sim0.0052$ rad/s²であり、このときトルクは $0.08\sim0.12$ Nmである。また、アンテナ鏡面がラッチ爪に当たってからラッチ爪によるトルクが最大になるまでの角度は約 0.122 radであるので、この間にアンテナ鏡面が受ける角運動エネルギーの損失は約 0.061 Jとなる(線形に変化するとした場合)。したがって、アンテナ鏡面はラッチ爪を押し上げることができず、展開は終了しない。それでは軌道上ではどうであろう。第9図は大気抵抗トルク F_0 が0の場合の展開プロファイルをモデルにより計算したものである。この場合、ラッチ爪に当たる瞬間の角速度は 0.112 rad/sに、運動エネルギー $I\omega^2=0.287$ Jに増加し、ラッチ爪による角運動エネルギーの損失を十分に上まわ

第9図 大気抵抗のない場合の展開プロファイル

第10図 地上試験環境の影響

るため、展開トルクが小さくとも展開が終了することが推定される。これは大気の影響分だけ考えた場合であり、軌道上条件に直接対応しているわけではないが、展開の可否判断を地上展開の可否だけではできないことは言える。第10図は、二つの試験装置設定条件において、地上試験環境によって生ずる要因である大気流体抵抗トルク、軸受への荷重によるトルク増分、およびアンテナ鏡面設定誤差に生ずるトルクについて、それぞれの最大値が全体トルク中に占める割合を示したものである。図示した摩擦抵抗トルクは試験装置によって付加的に生じているものであり、本来機構のもつ摩擦の分は含まれていない。供試体の設定に伴う微調整治具が不十分であったため、誤差の追込みが甘く、設定誤差の占める割合が大きくなっている。また、大気による抵抗トルクも駆動トルクに近い値であり、重力の補償ならびに大気の見積りに高い精度が必要であることがわかる。とくに大気については鏡面直径の増大に対して飛躍的に増大するために、今後ますます慎重な検討が必要である。

5. おわりに

大型展開アンテナの展開試験を地上で行う場合に、全ての条件を軌道上宇宙環境に合わせることは非常に困難であり、設定可能ないくつかの環境条件下において行う試験結果の総合的な判断により機能の検証を行

わざるをえない。したがって、試験環境および試験装置の特性を正確に把握することが必要である。本研究では常温、常圧、重力下でアンテナ鏡面の展開試験を行い、軌道上動特性を予測する方法を検討した結果、以下のような結論を得た。

- (1) アンテナ鏡面の一軸回りの動作に及ぼす重力の影響の補償には、横吊りによる方法が最適である。
- (2) 地上試験では大気による付加トルクと軸受摩擦増加は避けられず、展開速度は軌道上動作より60%減少する。
- (3) 地上試験によって展開機能の評価を行うには、大気や軸受摩擦による付加的なトルクの増加のほかにも設定誤差の影響を定量的に考慮する必要がある。

本研究において、大気、軸受摩擦、設定誤差による付加的なトルクの見積り方法を定量化し、その妥当性を実験的に確認すると同時に、重力補償試験方法の一つを提案できた。今後のアンテナ鏡面の大型化に伴い、地上展開試験のもつ意味がますます重要になってくると本試験方法は有効な手段となると考える。

参考文献

- 1) Hanks, Brantly R. and Pison, Larry D.: Large Space Structure Raise Testing Challenges, Astronauts & Aeronautics, Oct. 1983, pp. 34-53.
- 2) Hanks, Brantly R.: Control of Flexible Structure (COFS) Flight Experiment Background and Description, Large Space Antenna Systems Technology, December 4-6, 1984, pp. 893-908.
- 3) Brazzini, G., Broustet, Y., Garnier, C. and Picard, P.: Kinematic Analysis of Large Deployable Truss Antenna, IAF-85-74 (1985).
- 4) Development of the 15 Meter Diameter Hoop Column Antenna, NASA CR-4038 (1986).
- 5) Stella, D., Morgnti, F. and Nielcen, G.: Contraves' Antenna Tip Hinge Mechanism for Selenia Spazio's 20/30 GHz Antenna, Proc. 2nd ESA Workshop on Mechanical Technology for Antenna, ESTEC Noordwijk, 20-22 May 1986, ESA SP-261, August 1986.
- 6) Juang, Jer-Nan and Horta, Lucas G.: Effect of Atmosphere on Slewing Control of a Flexible Structure, the 27th AIAA/ASME/ASCE/AHS Structure, Structural Dynamics and Materials Conference, AIAA Paper 86-1001 (1986).
- 7) 目黒 在, 養毛正洋, 板波 隆: アンテナ展開試験法の基本検討, 第29回宇宙科学技術連合講演会前集, 1985, pp.234-235.
- 8) 目黒 在, 養毛正洋, 八坂哲雄: 衛星搭載用展開アンテナの地上展開試験法, 第28回構造強度に関する講演会前集, 1986, pp.52-55.
- 9) Greenwood, J. A., Minshall, H. and Tabor, D.: Hysteresis Losses in Rolling and Sliding Friction, Proc. Roy. Soc. A, Vol. 259, No. 1299 (1961), pp. 480-507.