衛星搭載用大形アンテナの振動特性に及ぼす空気と重力の影響*

三 澤 正 吉^{*1}, 織 田 俊 一^{*2}Air and Gravity Effects on Vibrational Characteristics
of Large Satellite Antennas

Masayoshi MISAWA and Syun-ichi ODA

This paper describes the effects of air and gravity on the vibration characteristics of large satellite antennas. A numerical study is presented for the large deployable antenna of the Japanese Engineering Test Satellite VI (ETS-VI). A method using effective mass is proposed to identify vibration modes. Mode identification shows that both air and gravity have little influence on vibration modes. It is also shown that variation in natural frequencies due to the air and gravity effects depends on the their modes.

Key Words: Space Engineering, Communication Equipment, Large Satellite Antenna, Gravity Effect, Air Effect, Natural Frequency, Vibration Mode

1. 緒 言

高機能な衛星通信システムの構築には高利得のアンテナが必要とされ、衛星搭載用アンテナは大形化する傾向にある。展開アンテナはアンテナの大形化を実現する有力な手段であることから、近年、広く研究や開発が進められている。

衛星搭載用アンテナでは、ロケットやポインティング制御系との共振を避けるため、固有振動数が重要な設計条件の一つになっている。そして、固有振動数の要求を満たしていること、打上げ時の荷重に耐える強度を有していることを振動試験によって確認することが義務づけられている。しかし、アンテナの大形化に伴って空気や重力といった地上試験に特有な要因が振動特性に大きく影響し、地上での振動試験ではもはや打上げ時や軌道上の振動特性が得られなくなっている。このような理由から、アンテナが固有振動数の要求を満たすことをどのように確認するかがまず問題となる。次に問題となるのは振動試験による強度の確

認である。共振点においてアンテナに生じる応力分布は振動モードに依存する。ところが、空気や重力による共振点の変化に伴って振動モードが変化すると、アンテナに生じる応力分布は振動試験時と実際の打上げ時とは異なったものになり、これまでのように振動試験による強度の確認ができない。このように、地上の試験環境に特有な空気や重力は大形アンテナの振動特性及び強度の評価に大きな問題を提起する。

流体が構造物の運動に及ぼす影響については、球や円柱等を対象とした研究が流体力学の分野で行なわれており、静止流体中で運動する構造物は見かけの質量が増加したようにふるまうことが知られている。この増加した質量は付加質量と呼ばれ、簡単な形状の構造物については理論解が求められている^{(1), (2)}。複雑な形状の場合には、構造物と流体を有限要素で近似し、連成問題として扱うことにより付加質量マトリックスを求めることができる⁽³⁾。しかし、従来の研究では実験検討が少なく、このため著者らは真真空度が低下するにしたがって固有振動数が低下することを円板の加振実験によって示した⁽⁴⁾。また流体として空気を対象とした研究例もほとんど見あたらず、その場合にも固有振

* 原稿受付 平成6年10月14日。

^{*1} 正員, NTTワイヤレスシステム研究所 (〒238-03 横須賀市武1-2356)。^{*2} 元: NTT無線システム研究所。

動数の変化を示すことに力点が置かれ、空気の有無による振動特性の相違を論じた報告はない。一方、重力の影響に関する研究は、重力そのものを考慮した研究というより、分布荷重に対する変位を精度良く求めるといった静的な問題に関するものである。そして、構造物の剛性は分布荷重の負荷によって増加することが示されている。この剛性は幾何学的非線形を考慮することで求められ、梁や平板を対象とした解析検討が報告されている^{(5), (6)}。このように、流体や重力の影響に関する研究はそれぞれ個々に行なわれてきたが、宇宙構造物のように空気と重力の両方を考慮した報告は著者の知る限り見当たらない。

本論文では、空気と重力が構造物の振動特性に及ぼす影響について述べる。まず解析手順を示し、衛星搭載用アンテナを例にとり、空気と重力の有無による振動特性の違いを示す。複雑なモードを持つアンテナを対象とすることからモードの同定に有効質量を用いる方法を提案し、同一の振動モードにおける固有振動数の変化を示す。また振動モードによる固有振動数の変化量の違いを明らかにする。

2. 解 析

2.1 空気の影響 以下では、空気を非圧縮性の完全流体とし、流体になされた仕事には粘性による散逸等がないものとする。構造物は静止した空気中で振動するとき空気から力を受ける。その大きさは構造物表面の面素に働く流体圧を表面全体にわたって積分することにより得られ、

$$R = \left(\rho \int_S n \phi^T dS \right) \ddot{u} \quad \cdots \cdots \cdots (1)$$

で与えられる。ここに、 ρ は空気の密度、 u は構造物の変位、 $\ddot{}$ は時間の2階微分、 n は構造物表面の外向き法線方向の単位ベクトルを示す。また速度ポテンシャル ϕ を次式のように表わすとき、 ϕ は時間に依存しないラプラス方程式の解である。

$$\phi = \dot{u}^T \varphi \quad \cdots \cdots \cdots (2)$$

構造物の質量及び剛性マトリックスをそれぞれ M 、 K とすると、空気中の構造物の運動方程式は

$$M\ddot{u} + Ku = R \quad \cdots \cdots \cdots (3)$$

で表わされる。

一方、構造物の振動によって生じる空気の運動エネルギーは次式で与えられる。

$$T = -\frac{1}{2} \dot{u}^T \left(\rho \int_S n \phi^T dS \right) \dot{u} \quad \cdots \cdots \cdots (4)$$

ここで

$$M_a = -\rho \int_S n \phi^T dS \quad \cdots \cdots \cdots (5)$$

とおくと、空気の運動エネルギーは

$$T = \frac{1}{2} \dot{u}^T M_a \dot{u} \quad \cdots \cdots \cdots (6)$$

で表わされる。ここに M_a は付加質量を表わす。式(6)は空気中で構造物を振動をさせるには、構造物の運動エネルギーに加え、それにもなっておこる空気の運動エネルギーを供給する必要があることを示す。このため空気中の構造物は、慣性質量が M_a だけ増加したかのようにふるまう。 ϕ は一般形状について求めることはできないが、具体的な形状が与えられればわかるので付加質量を求めることができる。半径 r の円板が並進運動するとき、慣性質量は構造物の質量を m 、密度を ρ_s 、板厚を t とすると

$$m + m_a = \rho_s \pi r^2 t \left(1 + \frac{8\rho r}{3\pi\rho_s t} \right) \quad \cdots \cdots \cdots (7)$$

で表わされ、構造物が軽量で大形化するほど付加質量 m_a の増加することがわかる。式(1)と(5)から、空気が構造物に及ぼす力は

$$R = -M_a \ddot{u} \quad \cdots \cdots \cdots (8)$$

と書ける。したがって、空気中での構造物の運動方程式(3)は

$$(M + M_a) \ddot{u} + Ku = 0 \quad \cdots \cdots \cdots (9)$$

で表わされる。

2.2 重力の影響 構造物に働く外力と内力の総和を f とすると、 f は次式で表わされる。

$$f = \int_V B^T \sigma dV - F \quad \cdots \cdots \cdots (10)$$

ここに、 F は外力ベクトルを示し、 B はひずみ ε と要素変位 δ の関係

$$\varepsilon = B \delta \quad \cdots \cdots \cdots (11)$$

から定まるマトリックスである。また、 σ は応力ベクトルで、 D を弾性マトリックスとして次式で与えられる。

$$\sigma = D \varepsilon \quad \cdots \cdots \cdots (12)$$

変形が小さくない場合には

$$B = B_0 + B_1 \quad \cdots \cdots \cdots (13)$$

のように変位に依存する B_1 を考慮する必要があり、非線形方程式

$$f = 0 \quad \cdots \cdots \cdots (14)$$

を反復計算により解くことになる。いま、第 n 次の近似解を δ_n とすると、補正解は

$$\delta_{n+1} = \delta_n - f_n / \left(\frac{df}{d\delta} \right)_n \quad \dots\dots\dots(15)$$

によって与えられ、 f の微係数を求めることが必要になる。式(10)の両辺を変位で微分し、式(11)～(13)を用いると次式が得られる。

$$\frac{df}{d\delta} = K + K_G \quad \dots\dots\dots(16)$$

ここに

$$K = \int_V B^T DB dV \quad \dots\dots\dots(17)$$

$$K_G = \int_V \frac{dB^T}{d\delta} \sigma dV \quad \dots\dots\dots(18)$$

K_G は幾何剛性マトリックスで、勾配と変位の関係

$$\theta = G\delta \quad \dots\dots\dots(19)$$

から定まるマトリックス G と応力を成分とするマトリックス

$$S = \begin{bmatrix} \sigma_x E_3 & \tau_{xy} E_3 & \tau_{xz} E_3 \\ & \sigma_y E_3 & \tau_{yz} E_3 \\ \text{sym.} & & \sigma_z E_3 \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots(20)$$

を用いて(E_3 は3x3の単位マトリックス)、次式のように表わすことができる。

$$K_G = \int_V G^T S G dV \quad \dots\dots\dots(21)$$

このように、幾何剛性マトリックスは幾何学的非線形性を考慮することによって求められ、外力(本論文では重力)によって生じる応力レベルに比例する。式(17)、(18)を用いて、重力が作用する構造物の運動方程式は

$$M\ddot{u} + (K + K_G)u = 0 \quad \dots\dots\dots(22)$$

で表わされる。

3. 解析モデル

技術試験衛星VI型(ETS-VI)搭載用アンテナ⁽⁷⁾を図1に示す。アンテナ系は開口径3.5mと2.5mのアンテナからなり、ロケットに収納するため展開型のアンテナを採用している。アンテナはいずれも鏡面、トラス構造、スタッド、展開機構、保持開放機構及び熱制御材から構成される。鏡面は高い鏡面精度を得るためCFRPを表皮とし、アルミニウムのハニカムを芯材とするサンドイッチ構造からなる。トラス構造はCFRP製のトラス材をCFRP製のフィッティングで接着結合して組立てられ、スタッドを介して鏡面を支持する。鏡面とトラス構造を結合するスタッドはチタン製の柱状部材

図1 ETS-VI アンテナ

図2 2.5 m アンテナ

で、鏡面の熱変形を低減する役割を果たす。アンテナは打ち上げ時には保持開放機構を介してタワーに結合される。火工品によって軌道上でタワーとの結合が開

放されると、展開機構により所定の位置に展開する。

解析の対象となる開口径2.5mのアンテナを図2、解析諸元を表1に示す。鏡面は外層（表皮）で曲げ、中間層（ハニカムコア）で剪断をうけもつ3層の板要素でモデル化し、トラス構造は梁要素でモデル化した。フィッティングについては、剛性が振動特性に及ぼす影響は小さかったことから質量のみを考慮し、集中質量としてトラス構造の各節点に割り振った。展開機構は、幾何形状をそのまま模擬しても動的モデルを得ることが難しいこと、振動特性に影響する要因は剛性であることから測定により求めた剛性を用いてばね要素でモデル化した。スタッドと保持開放機構は梁要素でモデル化し、また熱制御材は剛性に寄与しないため、ペイントおよび多層断熱材をそれぞれ集中質量として鏡面、トラス構造の各節点に割り振った。

境界条件については、アンテナ収納時には保持開放機構のタワーとのインタフェース部と展開機構のタワーとのインタフェース部を完全固定とした。また、アンテナ展開時は、展開機構のタワーとのインタフェース部のみを完全固定とした。これらは対象としたアンテナに特有の境界条件ではなく、ソリッドな反射面を有する展開アンテナに共通した一般的な境界条件である。

4. 解析結果

4.1 解析ケース 解析ケースを表2に示す。

ケース1は軌道上での環境、ケース5、6は地上での試験環境に相当する。その他のケースは実際には遭遇することのない環境であるが、空気と重力が及ぼす影響を調べるために設定した。

4.2 振動モードの同定 空気や重力が固有振動数に与える影響を評価するには、同一の振動モードについて固有振動数を比較する必要がある。したがって、まず振動モードの対応を明らかにしなければならない。振動モードの同定には、振動モード図やモード直交マトリックスを用いる方法等がある。しかし、これらの方法では複雑な構造物の振動モードを同定することは難しく、このため著者らは有効質量やひずみエネルギーの分布を用いたモード同定を提案してきた⁽⁸⁾。以下では有効質量を用いた振動モードの同定について述べる。

有効質量は

$$M_{\text{eff}} = M_{\text{er}}^T M_{\text{er}} \quad \dots\dots\dots(23)$$

で定義される。ここに、 M_{er} はモーダル運動量であり、弾性モードを ϕ_e 、剛体モードを ϕ_r とすると、次式

表1 解析に用いたパラメータ

Reflector	Skin thickness	0.2 mm
	density	1.6 g/cm ³
	young's modulus	10000 kg/mm ²
	Core thickness	14.6 mm
Trusses	density	0.06 g/cm ³
	Diameter	20.0 mm
	Thickness	0.3 mm
	Young's modulus	9900 kg/mm ²
Studs	Density	1.6 g/cm ³
	Fitting weight	3.5 kg
	Diameter	3.5 mm
	Young's modulus	11250 kg/mm ²
Deployment mechanisms	Density	8.7 g/cm ³
	Weight	2.0 kg
	Stiffness (deployed)	X 7000 kg/mm
		Y 2000 kg/mm
Holddown brackets		Z 3000 kg/mm
	θ_x	4x10 ⁶ kgmm/rad
	θ_y	2x10 ⁶ kgmm/rad
	θ_z	1x10 ⁶ kgmm/rad
White paint	Weight	1.4 kg (stowed)
		1.1 kg (deployed)
	Diameter	30 mm
	Young's modulus	2700 kg/mm ²
Thermal insulation	Reflector	0.8 kg
	Truss	1.8 kg
	Mechanism	0.4 kg

表2 解析ケース

Case	Description
1	In vacuum without gravity
2	In air without gravity
3	In vacuum with gravity in the X direction
4	In vacuum with gravity in the Z direction
5	In air with gravity in the X direction
6	In air with gravity in the Z direction

で与えられる。

$$M_{\text{er}} = \phi_e^T M \phi_r \quad \dots\dots\dots(24)$$

全モードを考慮する場合には、単位マトリックスを E とすると

$$\phi_e \phi_e^T M = E \quad \dots\dots\dots(25)$$

が成り立ち、有効質量は

$$M_{\text{eff}} = \phi_r^T M \phi_r \quad \dots\dots\dots(26)$$

となる。式(26)の右辺は剛体質量マトリックスを表わし、有効質量の並進成分、回転成分の総和はそれぞれ構造物の質量、慣性モーメントに等しくなることを示す。このような有効質量の特徴をいかして、Chenらはロケットとの結合解析に必要な衛星のモード数を決める指標、あるいはモーダル試験で同定すべきモードの重要性の指標として有効質量を使用している⁽⁹⁾。しかし、各モードごとの有効質量は振動モードの同定に対しても有用な情報を与える。すなわち、ある自由度の

有効質量が大きい場合、振動モードはその方向に大きく変形していることを示し、したがって振動モード判定の一つの方法として使用することが可能である。

収納時のアンテナに関して、表2に示した解析ケースによる有効質量比の変化を図3に示す。ここに、有効質量比は構造質量（回転成分に関しては慣性モーメント）に対する各モードの有効質量の比を示す。また、有効質量は空気のある場合にも付加質量を含まない質量マトリックスを用いて求めた。1次モードは θ_x の有効質量のみが大きく、全モードの有効質量の70～90%を占める。したがって、X軸まわりの回転変形であることが類推できる。有効質量の分布はほとんど空気及び重力の影響を受けず、振動モードの変化は小さいと考えられる。2次モードはZ方向の並進変形、3次モードは有効質量の分布からX方向の並進変形をとまなうY軸まわりの回転である。いずれも振動モードへの空気と重力の影響は無視できる。4次及び5次モー

ドはともにZ軸まわりの回転である。6次モードはX軸まわりの回転を含むY方向の並進変形で、振動モードは空気と重力の影響を大きく受けない。7次および8次モードの有効質量には解析ケースによる違いが見られる。真空中の7次（X方向並進）及び8次モード（Z方向の並進）は空気の影響を受けるとそれぞれ8次、7次モードとなるためである。固有振動数の次数が逆転することから、空気による固有振動数の低下が容易に推測できる。

展開時の有効質量の変化を図4に示す。1次モードは、Zと θ_y の有効質量が大きいことから、面外の曲げ変形である。また、2次及び5次モードは共にY方向の並進変形をとまなうX軸まわりの回転である。いずれも解析ケースによる有効質量の分布に大きな違いはなく、空気と重力が振動モードに及ぼす影響は小さい。上記のモード以外では、有効質量の分布には解析条件による違いが見られる。このことからモードの次数

図3 アンテナ収納時の有効質量

図4 アンテナ展開時の有効質量

図5 アンテナ展開時の有効質量

が変化し、空気あるいは重力の影響によって固有振動数の変化していることが類推できる。そこで、図5に示すように、有効質量の分布が対応するように書き直した。8次モードはローカルモードなので省略した。真空中の3次モードはX軸方向の並進をとまなう面外曲げで、重力が作用すると4次モードとなる。真空中の4次モードはX軸まわりの回転をとまなう面内の曲げである。重力が作用するとX軸まわりの回転変形が増加し、3次モードになる。真空中の6次モードはX方向の並進で、X方向の変形は重力の作用する条件が同一とすると真空の方が大きく、また無重力よりは重力が作用する場合の方が大きくなる。真空中の7次モードは横方向の曲げ変形で、重力が作用しない場合には7次モードであるが、空気の有無に関わらずX方向の重力が作用すると6次モード、Z方向の重力が作用すると9次モードとなる。

以上のように、各モードの有効質量分布の比較から空気と重力による振動モードの変化は小さい。したがって、強度の確認を目的とした振動試験は、なお有効と言える。

4.3 固有振動数への影響 真空中無重力の振動モードに対応するモードごとに、空気や重力の有無による収納時の固有振動数の変化を図6に示す。図6から図9において、横軸が表わす解析ケースの説明を併せて示した。Z軸まわりの回転(5次モード)、Y方向の並進(6次モード)、X方向並進(7次モード)は固有振動数の変化が小さい。真空中無重力の固有振動数 f_i を基準として、表2に示した各解析ケースでの固有振動数 f_j の変化率を

$$\Delta = \frac{f_j - f_i}{f_i} \times 100 (\%) \quad \dots\dots\dots(27)$$

とし、これを図7に示す。重力が固有振動数に及ぼす影響は非常に小さく、空気の影響を大きく受けることがわかる。4次～7次では固有振動数の変化はほとんど見られないが、1～3次及び8次の固有振動数では約10%～20%低下する。

展開時の固有振動数の変化を図8に示す。また真空中無重力の固有振動数からの低下率を図9に示す。収納時と異なり、固有振動数は重力によっても変化する。1次固有振動数は空気の影響を受けると約15%、Z方向に重力が作用すると35%程度上昇する。このため、空気中でZ方向に重力が作用する場合にも15%程度上昇する。重力がX方向に作用する場合は、固有振動数の変化は小さい。2、3次の固有振動数は空気の影響で10%程度低下するが、重力による影響は見られ

図6 固有振動数の変化(アンテナ収納時)

図7 固有振動数変化率(アンテナ収納時)

図8 固有振動数の変化(アンテナ展開時)

図9 固有振動数変化率(アンテナ展開時)

ない。4次の固有振動数は重力の影響を最も大きく受けるが、顕著な方向依存性はない。また空気の影響をほとんど受けない。5、6次の固有振動数は空気と重力の影響による変化は小さい。7次の固有振動数に対しては重力の影響が大きく、空気の影響はない。また、固有振動数はX方向に重力が作用すると低下するが、Z方向に作用すると上昇する。

4.4 考察 構造物が空気中で振動すると、構造物には見かけの質量が付加され、一般には固有振動数が低下する。しかし、4.3節の結果では、面内変形モードの固有振動数に対する空気の影響は非常に小さい。これは以下の理由による。本論文では空気を非圧縮性の完全流体と仮定していることから、アンテナが式(8)に示した力に抗して単位時間に空気になす仕事は式(6)に示した空気の運動エネルギーの単位時間当たりの増加に等しい。したがって、アンテナが空気から受ける力が大きいほど付加質量は大きくなる。このため、空気から大きな力を受ける面外の並進や曲げ、ねじりを含む回転モードでは固有振動数が低下し、小さな力しか受けない面内の変形モードでは固有振動数の変化はほとんど見られないと考えられる。また同様の理由により、局所モードに比べて全体モードの方が空気による固有振動数の低下が大きいことは簡単に推測できる。解析結果から、空気が固有振動数に及ぼす影響の大きさは面外の並進、曲げ、回転の順であることが確認できる。

一方、重力が固有振動数に及ぼす影響はアンテナ収納時の場合は非常に小さい。そして、アンテナ展開時に固有振動数が大きく変化するモードは曲げである。この結果と式(21)に示したように幾何剛性が応力レベルに依存することを考慮すると、重力が作用するときの応力の大きさと振動モードによって固有振動数は変化すると言える。簡単のため、図10に示すように重力を受けるビームを考えると、一端を固定した時(図10の左図)の最大曲げ応力は両端を固定した時(図10の中央)の6倍になる。このことはアンテナ収納時よりも展開時の方が重力によって生じる曲げ応力は大きく、したがって固有振動数への影響が一般に大きくなることを意味する。このように、アンテナ収納時の幾何剛性が低く、しかもそれが寄与するモードの存在しないことが固有振動数への影響が小さかった理由と考えられる。また重力の作用方向の影響は、図10の右図の場合に生じる引張り応力と左図の曲げ応力の大きさの比較から得られる。ビームの長さを L 、断面の高さを h とすると、両者の比は

図10 重力を受けるビーム

$$\sigma_b/\sigma_t = \frac{6L}{h} \dots\dots\dots (28)$$

となり、長さに比べて断面の高さが小さいことから曲げ応力の方が引張り応力よりも大きい。1次及び7次の固有振動数はXよりもZ方向に重力が作用する場合に大きく増加し、これを裏付ける結果が得られている。4次の固有振動数には重力の作用方向の影響が見られないが、これはねじりがあるために重力によって生じる幾何剛性が固有振動数に大きく寄与しないためと考えられる。

5. 結 論

衛星搭載用アンテナが軽量化、大形化すると、振動特性は空気や重力の影響を大きく受ける。本論文ではこれらが振動特性に及ぼす影響について検討し、以下の結論を得た。

- (1) 空気や重力が構造物の振動特性に及ぼす影響を明らかにするには、まず振動モードを同定することが重要である。本論文では、有効質量を用いた振動モードの同定を試み、その有効性を示した。
- (2) 空気や重力による各方向の有効質量の分布には大きな変化はなく、振動モードに及ぼす影響は小さい。
- (3) 空気が固有振動数に及ぼす影響の大きさは面外の並進、曲げ、回転モードの順である。また、重力は曲げモードの固有振動数に大きな影響を与える。

参 考 文 献

- (1) McLachlan, N. W., Proc. Phys. Soc., 1932
- (2) 長松編, ダイナミクスハンドブック, 日本機械学会, pp. 611, 1993
- (3) Zienkiewicz, O. C. et. al., Proc. Int. Symp. on Finite Element Techniques, 1969
- (4) Yasaka, T., and Oda, S., IAF-88-291, 1988
- (5) Choon-Foo Shin, Journal of Spacecraft and Rockets, vol. 24, No. 5, pp. 469-473, 1987
- (6) Schafer B., IAF-84-391, 1984
- (7) Misawa, M. et. al., ISTS, pp. 473-478, 1990
- (8) 三澤他, 第31回構造強度に関する講演会, pp. 404-407, 1989
- (9) Chen, J-C, and Garba, J. A., ASME AMD, Vol. 67, pp. 109-137, 1985