

ロケット打上げ時の人工衛星音響振動評価システム

吉田佳子* 施 勤忠***
 世古博巳** 安藤成将***
 佐々野 浩**

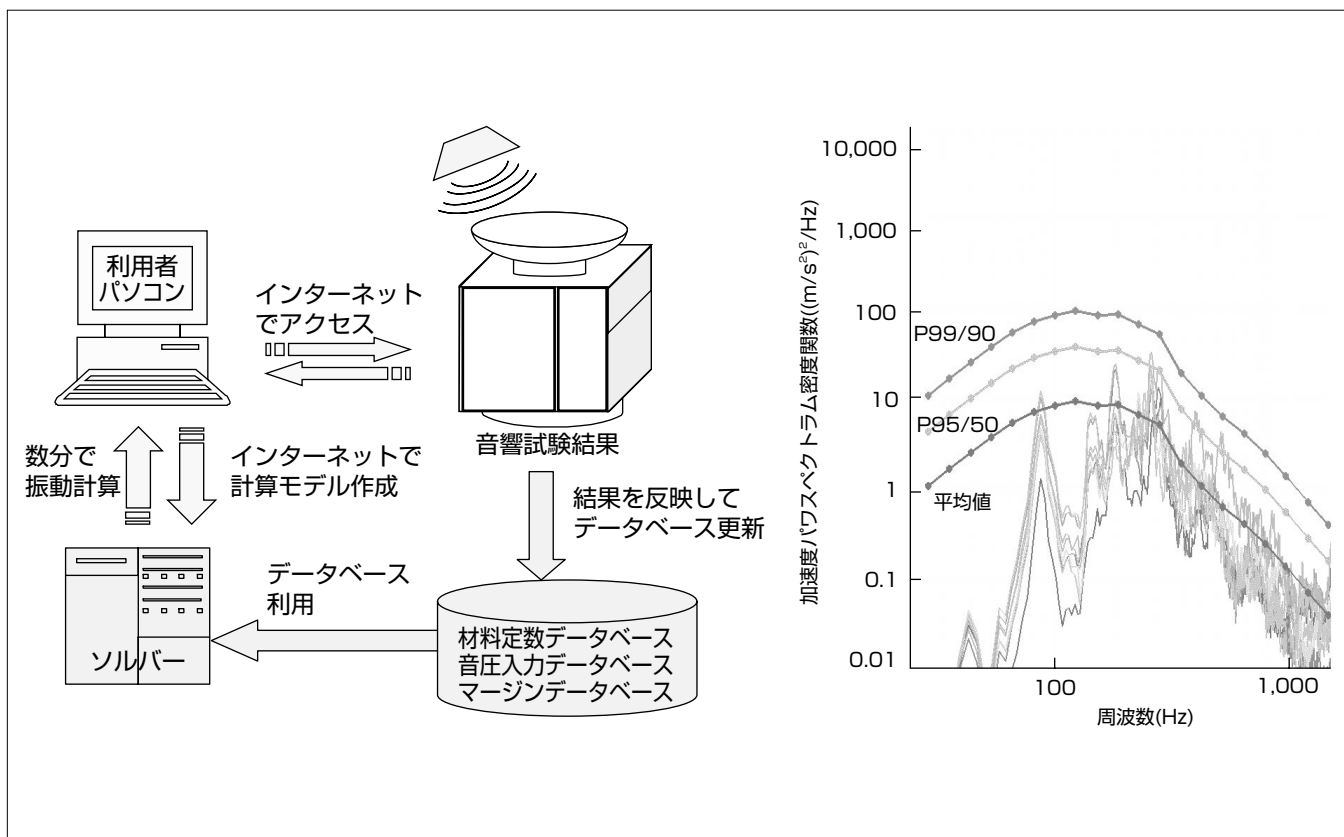
Acoustically Induced Random Vibration Analysis System for Artificial Satellites

Keiko Yoshida, Hiromi Seko, Hiroshi Sasano, Qinzhong Shi, Shigemasa Ando

要 旨

人工衛星は、そのロケットを打ち上げる際生じるエンジンの噴射音によって音響加振され、振動する。この振動に対する信頼性は、ロケットの音を再現できる試験室に人工衛星を入れて破損や不具合がないことを確認する音響試験で評価している。従来、この音響加振による振動応答は数値解析で求めることが困難であり、人工衛星の製作過程では、音響試験と経験則によるカットアンドトライを強いられていた。この状況を打破し、設計開発工程(設計-製作-試験)における手戻りの解消と、試験の短縮や省略による開発期間の短縮を目的として、(独)宇宙航空研究開発機構(JAXA)は初期設計段階での振動解析システムを開発することを決定し、その開発支援メーカーとして、平成13

年に三菱電機を選択した。JAXAと三菱電機では、平成14年にシステムの開発を開始し、音響加振による人工衛星構体の振動の特徴や、人工衛星構体に使用されるハニカムパネルのパラメータスタディを実施して、基本的な振動応答解析手法を確立した。その後、構体パネルに搭載されている各機器の応答のばらつきに対する統計的処理方法を解析に組み合わせ、最新の6基の人工衛星について解析精度を検証して、平成19年に解析システムJANET(JAXA Acoustic analysis NETwork)として完成し、運用を開始した。現在、JANETは、準天頂衛星をはじめとする国内の大型人工衛星に利用され、人工衛星打上げの高信頼性化に貢献している。本稿では、JANETの概要について述べる。



ロケット打上げ時の人工衛星の音響振動評価システムJANET

JANETは、一般のインターネットブラウザからインターネット経由でサーバに接続して利用できるロケット打上げ時の人工衛星音響振動評価システムである。解析に必要なデータベースは、新しい人工衛星構体にも適用できるように、音響試験結果のデータを基に更新することができる。また、解析結果と音響試験結果の比較検証も実施できる。計算結果は、試験データの平均値と包絡値を表示し、人工衛星の初期設計段階で利用されている。

1. ま え が き

人工衛星を打ち上げる際、エンジンの噴射によって、ロケットには大きな振動と音が生じる。図1に示すように、ロケット先端のフェアリング内部に搭載された人工衛星は、ロケットの取付け部から伝わって来る振動と、空気を伝播(でんぱ)してくる音に晒(さら)される。近年の大型人工衛星の第一次固有振動数は30Hz以下であり、100Hzを超える高い周波数の振動は、振動伝達経路上で減衰してしまう。一方、数百Hz～数千Hzに主成分を持つ音は取付け部から伝達するのではなく、あらゆる角度から10kHz以下の広い周波数帯域で人工衛星に作用する。また、その音圧レベルは人工衛星周りで130dB以上にも及び、人工衛星構体に大きな振動を発生させる。

このため、人工衛星を打ち上げる前には、ロケットの音を発生できる試験室に人工衛星を入れて打ち上げ時の音響環境を模擬し、人工衛星に破損や不具合がないことを確認する音響試験を実施している。当社は、国内メーカーでは唯一、この音響試験を実施できる工場を持っており、人工衛星の打ち上げ品質を保持している。従来、この音響加振による振動応答は数値解析で求めることが困難であり、製作過程では、音響試験と経験則によるカットアンドトライを強いられていた。この状況を打破し、設計開発工程(設計-製作-試験)における手戻りの解消と、試験の短縮や省略による開発期間の短縮を目的として、JAXAは初期設計段階での振動解析システムを開発することを決定し、その開発支援メーカーとして、平成13年に当社を選択した。平成14年にシステムの開発を開始し、音響加振による人工衛

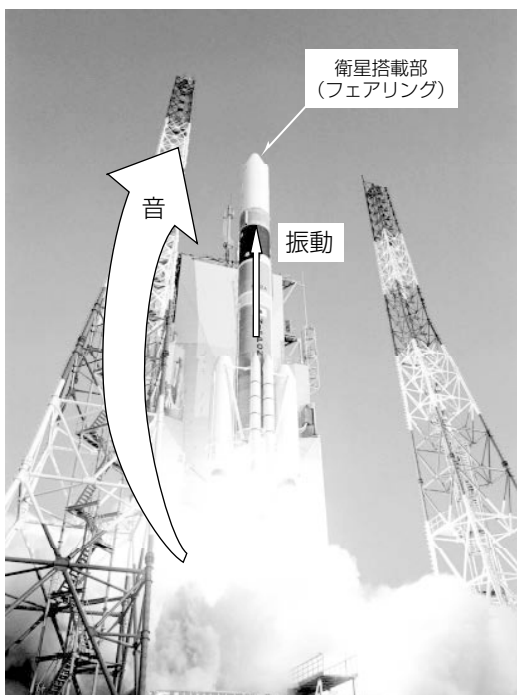


図1. 打上げ時に人工衛星が晒される振動環境(写真提供：JAXA)

星構体の振動の特徴や、人工衛星構体に使用されるハニカムパネルのパラメータスタディを実施して、基本的な振動応答解析手法を確立した。その後、構体パネルに搭載されている各機器の応答のばらつきに対する統計的処理方法を解析に組み合わせ、最新の6基の人工衛星について解析精度を検証して、平成19年に解析システムJANETとして完成し、運用を開始した。現在、このシステムは、準天頂衛星をはじめとする国内の大型人工衛星に利用され、人工衛星打ち上げの高信頼性化に貢献している。

本稿では、このシステムの構成と概要、及びシステム開発を通じて構築された振動解析技術について述べる。

2. JANETの概要

2.1 JANETの解析部の特徴

製品の構造設計では有限要素法^(注1)を使った振動応答解析が用いられることが多い。有限要素法による応答解析では、固有振動数が求められる周波数範囲が計算の範囲内であり、高い周波数まで計算するためには、非常に精密な解析モデルを製作する必要がある。また、音響加振による振動応答を求めるためには、一般には境界要素法^(注2)による音場解析と有限要素法による構造解析を連成させて計算する必要があり、高度なプログラミング、又は、高価なソフトウェアの投資が必要である。したがって、だれでもが容易に使える解析方法ではない。

今回の解析システムの開発では、だれでも、素早く評価ができることをコンセプトとし、広い周波数帯域で、音響加振による振動応答解析が実施できる統計的エネルギー法(SEA法)⁽¹⁾を用いた。この方法は、図2に示すように、人工衛星の構体を構成するパネル1枚を解析要素とするため、有限要素法で使用する精密なモデルが不要であり、寸法やパネルの種類を入力するだけでだれでもすぐに解析を実施できる。ただし、解析要素であるパネル1枚に対し、

- (注1) 計算対象領域を細かい要素に分割し、その要素上の節点の状態量を未知数として、微分方程式を定式化し、変分法によって応答計算する方法
- (注2) 計算対象領域の境界を細かい要素に分割し、その要素上の節点の状態量を未知数として、積分方程式を定式化し、積分演算で音圧計算する方法

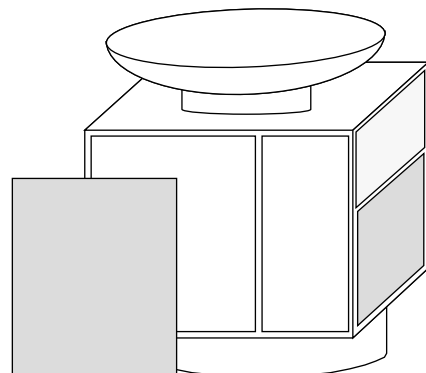


図2. SEA法におけるモデル化単位(パネル1枚が1要素)

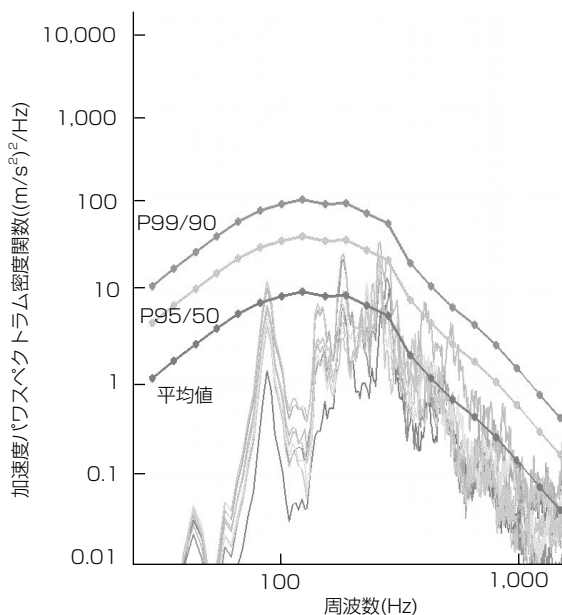


図3. システムによる計算結果の表示例

振動応答の平均値のみが求められるため、パネル内の振動応答の偏りについては直接計算できない。そこで、計算されるパネルの平均値に対するばらつきを、統計的配慮によって求められるようにした⁽²⁾。このシステムによる計算結果の表示例を図3に示す。図3の中の平均値は計算によって直接求められるパネルの応答加速度の平均値レベルで、P95/50、P99/90で示される $P\beta/\gamma$ は、“パネル内の各点の加速度応答が、確率 $\gamma\%$ で、パネル内全点の $\beta\%$ の応答を包絡する”値(マージン)である。このマージンは、パネル内の加速度応答測定点の数が十分大きい場合、加速度応答の分布が対数正規分布に近づく性質に基づいて、平均値と分散から計算される品質評価の統計レベルであり、航空の分野で規格化されている⁽³⁾。図3には、計算結果のプロット(・点)と、実際の音響試験結果(分解能9 Hzの線)を併せて示しているが、計算結果の平均値は、試験結果の平均値に漸近し、P99/90は、最大値を包絡している。この計算結果によって、搭載機器設計者はマージンに基づいた安全率を含む環境振動レベルを音響試験前に知ることができる。この振動レベルに耐える機器を設計すれば、音響試験での機器損傷を未然に防ぐことができる。

マージン量の決定のため、解析技術開発期間中に6基の人工衛星の音響試験結果で得た数千個のデータについて、各パネル内の応答の平均値や分散等の統計量を調査した。また、人工衛星に使われる複数種類の基本のパネルについて材料定数や解析係数(損失係数、音響放射効率、モード密度等)を調査した。これらの調査結果と、音響試験に使用されるロケットの音圧レベルについてはデータベース化して、ユーザーが解析に利用できるようにした。

2.2 JANETシステムの特徴

JANETのほかに、JAXAでは、音響試験の試験データ

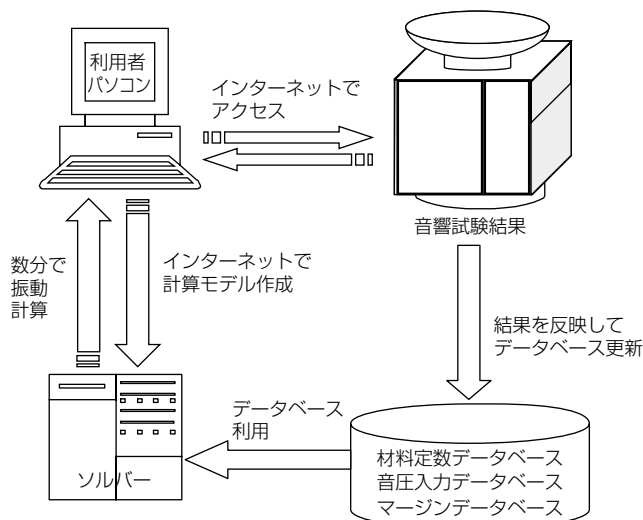


図4. 試験結果，データベース，ソルバーが連携するシステム

を蓄積・閲覧できるシステムを持っている。このシステムとJANETを結合させることで、この解析システム開発後に実施した新たな人工衛星の音響試験データを応答数値解析システムのデータベースへ反映できるようにした。このインタラクティブ構造によって、JANETは、常に最新の人工衛星に対応できる進化したシステムとなっている。この音響試験の試験データは、図3のように、音響試験後に数値解析結果と併せて表示できるので、数値解析の妥当性を確認することもできる。

また、だれでも利用できる環境を実現するため、一般のインターネットブラウザからインターネット経由でサーバに接続して利用できるように整備した。現在、当社に限らず、宇宙機を設計・製作するメーカー各社がインターネットを通じてJANETを利用している。システムの全体像を図4に、インターネットブラウザ上のJANETの表示を図5に示す。

3. 解析手法の開発

解析手法の開発では、人工衛星全体の構体と、その一部である構体パネル(ハニカムパネル)の音響試験と振動試験を実施して、実設計に耐える解析精度を確立した。ここでは、音響加振を受ける人工衛星の振動応答における大きな特徴を反映できた研究開発成果の一例を示す⁽⁴⁾。

パネルのボルト締結によって構成される人工衛星では、パネル間に振動伝達があるため、パネル単体と人工衛星に取り付けられた場合では、一般に同じ加振力を受けても振動応答が異なる。しかし、音響加振の場合は、構体のパネルすべてに一様に音圧が負荷され、その振動伝達量がパネル間で相殺されること、パネル締結部を境界としたパネルごとの共振モードが応答に支配的となること等から、人工衛星に取り付けられたパネルの応答は、パネル単体の応答と等しくなることがSEA法の計算結果より得られた。こ



(a) ブラウザでの初期画面(予測解析, データ管理等を選択)

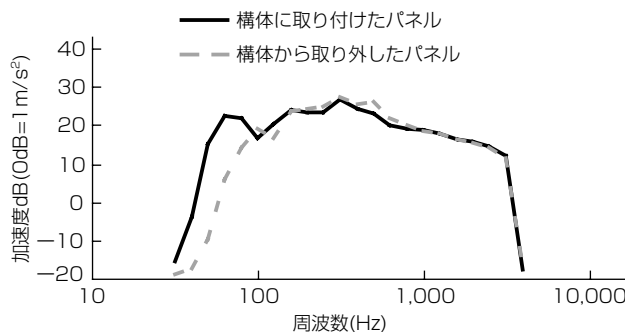


(b) 予測解析における諸元入力画面

図5. インターネットブラウザ上のJANETの表示



(a) 構体に取り付けたパネル (b) 構体から取り外したパネル



(c) 加速度周波数特性

図6. 構体取付け前後のパネルの振動応答の周波数特性

の計算結果を確認するため、図6に示すように構体に取り付けられたパネルと、構体から取り外したパネルについて同じ音響試験を行って、その振動加速度応答を調べた。図6の加速度周波数特性に示すとおり、100Hz以上では両者の応答は等しくなった。100Hz以下では構体全体がたわむ共振の影響によって、構体に取り付けたパネルの方が振動応答が大きくなったが、この共振ではパネルに搭載されている機器の振動には問題が生じないので、搭載機器の振動を設計する場合、パネル単体の評価で十分であることがわかった。このことから、JANETを利用する際、設計する機器が搭載されているパネルの仕様のみ入力データを作ればよいので、計算時間を大幅に短縮することが可能となった。

4. む す び

ロケット打上げ時の音響に晒されることで生じる人工衛星構体パネルの振動の評価を目的とした音響振動解析システムJANETについて述べた。正規運用前に人工衛星実機で十分精度検証されたシステムではあるが、日々刷新される新しい人工衛星構体にも対応できるよう進化し得るシステムである。JAXAに申請することで、宇宙機の設計者ならだれでも利用できるが、各メーカーのデータを守るセキ

ュリティも確保しており、ユーザー管理を徹底している。

また、利用者には、使い方を記したユーザーズマニュアルのほか、解析原理や、信頼性を証明する開発試験の内容等を記したセオレティカルマニュアルのダウンロードが整備されている。音響振動解析システムJANETが、人工衛星などの宇宙機の初期設計段階に利用され、国産宇宙機の打上げ信頼性の向上に貢献することを期待する。

参 考 文 献

- (1) Lyon, R.H.: Statistical Energy Analysis of Dynamical Systems: Theory and Applications, MIT Press (1975)
- (2) 安藤成将, ほか: 拡散音場で加振される人工衛星パネルの振動応答に関する上限公差リミットの検討, 日本機械学会論文集(C編), 72, No.716, 1130~1135 (2006)
- (3) Test Requirements for Space Vehicles, MIL-STD-1540B
- (4) Yoshida, K., et al.: Data acquisition and Validation Tests for Acoustic Loading Vibration Analysis, Aerospace Testing Seminar (2003)