

## **6.2. Digital Prototype Model による**

### **宇宙機開発に向けて**

株式会社テクノソルバ 代表取締役

中村 和行 氏

***TechSol***

# Digital Prototype Modelによる 宇宙機開発に向けて

2017年11月22日

株式会社テクノソルバ 中村和行

©2014Technosolver Corp.

1

***TechSol***

## 目次

- はじめに
- シミュレーション技術の現状
  - 民生分野
  - 宇宙分野
- 解析による構造認定
- 今後の課題
- まとめ

2

**TechSol**

## はじめに

問題提起

民間の製品開発

コスト

企業間の競争

スピード

民間の製品開発を考えれば、宇宙(衛星)開発にかかる時間とコストはもっと削減できるのではないか？

米国ではSPAXE-Xに代表される民間企業による低コスト化が始まっている

3

**TechSol**

## はじめに

### ■ Digital Prototype Model (DPM)とは？

#### ➤ 近年の宇宙開発を取り巻く環境

コスト、開発期間ともに縮小傾向

#### ➤ 民間の物づくり

CAEを活用したデジタルプロトタイピングによる設計の効率化、高度化、試作の削減

#### ➤ 宇宙におけるデジタルプロトタイピング活用

現状では不十分・・・

4

**■ PM, PFMからDPMへ**

- 構造認定を解析で実施することが目標であり、シミュレーション技術により、認定用ハードウェア(PM)をなくすこと(PMレス)を目指す。
- 最終的にはDPM/FM方式の確立を目指し、フライトハードウェアとしてFMのみを製作し、試験もATを実施する。
- DPMの範囲としては構造解析、機構解析、質量特性解析、熱解析など多岐にわたる。ここでは構造解析を前提に議論を進める。

5

**■ 民生分野におけるCAEの活用状況**

- 自動車や電機を中心としてCAEを駆使することによって試作の削減を目指す取り組みが進んでいる。
- 活用が著しいのは自動車分野であり、CAEが車両開発において中心的な役割を担いつつある。
- 設計現場におけるCAE活用の目的は開発期間の短縮や試作の削減による費用の削減だけではなく実験計画や品質工学と組み合わせたロバスト設計もある。
- 最近ではマルチフィジックスと呼ばれる、構造解析単独でなく、伝熱など他の解析と連成した解析も増えてきている。

6



- 宇宙分野におけるCAEの活用状況
  - 宇宙分野におけるCAEの導入は他産業と比較して早い。打上げたら修理ができないことや、インデント生産品であることなどが理由として挙げられる。
  - 20年以上前にCAEの使用方法が確立されてからは、大きく進歩していないというのが現状である。
  - 線形の構造解析により、基本構造特性を把握し、EM等の試験で実際に特性を確認し、設計にフィードバックする。
  - 計算機性能の飛躍的な向上により、解析モデルの規模については大幅に拡大している。

7

- 従来の衛星開発方式
  - PM/FM (Prototype Model / Flight Model)
    - ・ PM/FM方式は、PMで設計・製造方法の認定を行った後に、FMを製作し、受入試験を経て、打上げに供する。同じモデルを2機製作するため、その分コストと開発期間を要する。
  - PFM(Proto Flight Model)
    - ・ 類似設計品の実績等を用いて検証を補完することによって、PFMで設計検証と製品保証を行い、打上げに供する方式をPFM方式と呼ぶ。なお、PFMIに先立ってEMを製作することが多いが、本来的にはEMでは構造認定はできない。
  - 複合方式
    - ・ 複合方式は、上記2つの混合方式であり、例えば認定試験によって強度標定に近い荷重が加わった部材は交換し、十分余裕がある部材はそのままフライトに供するというケースが該当する。

構造設計標準 JERG-2-320A による

8

### ■ 構造認定とは

#### ➢ 宇宙機一般試験標準 (JERG-2-130A)

認定試験は、設計要求が満足されていることを保証するためにフライト品に適切なマージンを含むことを検証するものである。

#### ➢ 品質保証プログラム標準 (JMR-005A)

ハードウェアが仕様書の要求事項に合致していることを実証する方法として明示されているのは試験と検査



解析(CAE)を検査の一種と位置づけることが必要

9

### ■ 構造系の認定試験

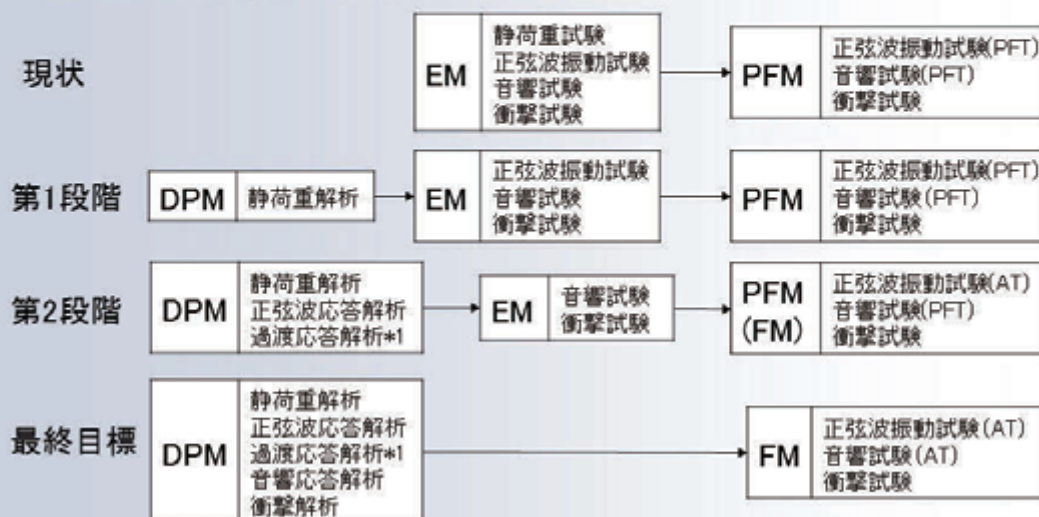
| 試験                   | 目的                                   |
|----------------------|--------------------------------------|
| 静荷重試験                | ①構造耐性確認                              |
| 音響試験<br>(ランダム振動試験)*1 | ①構造耐性確認<br>②搭載機器の環境条件確認              |
| 正弦波振動試験              | ①構造耐性確認<br>②構造動特性の確認<br>③搭載機器の環境条件確認 |
| 衝撃試験                 | ①構造耐性確認<br>②搭載機器の環境条件確認              |

\*1：相乗り衛星などの超小型衛星では音響試験をランダム振動試験で代替する。

これらの試験を一度に解析に置き換えるのは現実的ではない!  
第1段階として静荷重試験を省略することを提案する

10

## ■ DPMの採用段階案



\*1: OLA結果を入力とする。

11

## ■ 静荷重試験の限界

- 通常大型衛星では静荷重試験専用のハードウェアが必要である。
- 実際の荷重はLift offやMECOなど複数のフェーズと荷重の向きを考慮する必要がある。しかし試験は1～2ケースを実施するのが限界である。
- 実際の荷重は加速度荷重だが、試験では離散点に荷重を負荷する。
- 計測データはひずみゲージが主体であり、離散点のデータしか取得出来ない。このためクリティカル部位の強度評価には解析を併用せざるを得ず、解析で試験を補完している。

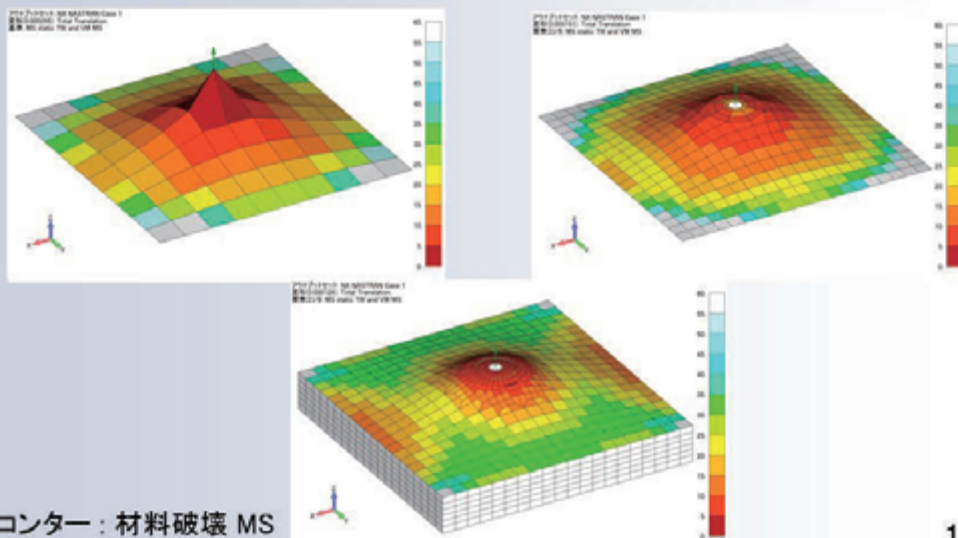
12



**■ 静荷重解析の現状**

- 衛星の構造解析は全機モデルを作成して評価してしまうことが多く、締結部などの詳細モデルを作成するケースは多くない。このため、締結部回りを中心に十分な精度が確保できていないケースもある。
- 衛星構造にはハニカムパネルが使用され、これに特有の破壊モードの評価が必須である。パネル間の継ぎ手部分のモデル化にも注意が必要であり、これらをどのようにモデル化し評価するか等について、統一した手法が必要と考えられる。
- 現状の技術で必要な精度を確保することは可能であると考えられる。

13

**■ 締結部のモデル化例(インサート)**

14

- 解析による静荷重認定に向けて
  - 構造解析精度の悪化要因の多くは締結部のモデル化方法と不正確な拘束条件であり、これらについては標準化が必要である。
  - 新規構造については部分試験などを実施し、従来とは逆に解析を試験で補完する必要がある。
  - 有人関係ではNon Test Factor (1.5)を適用することによって、構造試験の省略が認められている。ただし、これは過剰設計につながる可能性があり、適用には注意が必要である。

15

- 振動試験の限界
  - 振動試験の加振は1軸ずつであるが、実際は3軸同時の過渡振動入力である。
  - 境界条件の違いによる過負荷を避けるためにノッチングが必要であるが、ノッチレベルはCLAに基づくこと、重心相当加速度は解析でしか計算的できないことなどから試験時には構造解析に頼る部分が多い。
  - 取得データは加速度センサによる離散点の応答であり、網羅的にデータを取得するには加速度センサの取付に多大な労力を要する。
  - 大型衛星では大型の加振機が必要となり、加振できる設備が限られる。

16



### ■ 正弦波振動応答解析の現状

- 正弦波振動に対する構造の耐性は正弦波振動応答解析により強度評価を実施することが可能である。
- 静荷重解析では強度評価の精度を課題としたが、正弦波振動の場合は固有値とモード形状が実機と合っている必要がある。
- 締結部回りを丁寧にモデル化すれば、試験と合う解析モデルを得ることは可能である。ただし、正弦波応答では振動数のずれが問題となるため一段の精度向上が必要である。
- 減衰率は過去の試験データから推定が必要である。

17

### ■ 音響試験

- 音響試験の目的は構造の耐性確認と搭載機器の環境条件の確認である。
- 搭載機器の環境条件については、FEA-SEA統合法やFEMモデルに直接音圧荷重を負荷して応答を求める手法もあり、パネル上の個別の機器の環境条件も予測可能になると考えられる。(参考文献7、8)
- 解析に用いる減衰率と構造による音圧変動の模擬の妥当性については過去の試験データ等から推定する以外に無い。

18

**■ 衝撃試験**

- 衝撃荷重は、ロケットからの分離やSAPなどの展開の際の火工品衝撃であり、火工品を用いた試験が必要である。構体の破損が生じることは殆どなく、主たる目的は搭載環境の確認である。
- 衝撃環境の解析による推定は一般的ではない。
- 太陽電池パドルの保持解放など衛星内は火工品を使用しないNon-Explosive Device (NED)の適用が増えており衝撃試験が必要なくなる可能性もある。
- 衝撃は物体内の伝搬波であり衝撃源から離れるほど減衰する。このため環境条件の推定は可能である。

19

- データベースの整備
- 解析精度
- 解析の品質保証
- 環境整備

20

**■ データベースの整備**

- 前項にも記載したように解析精度を高めるためには減衰率や音響試験データ、衝撃試験データなど過去のデータを活用することが必須である。
- 国内の衛星開発ではJAXAの設備を用いて衛星試験を実施することが多く、JAXA、衛星メーカーの協力の元に各種試験データをデータベース化し、公開できれば非常に有用である。
- 成果を公表することを義務付けた上で、データベースを第三者にも利用可能とし、解析手法の改善、技術の高度化を進められないか？

21

**■ 解析精度**

- 最も大きな課題は解析精度をどのようにして確保し、保証するかである。
- 現状では解析精度の確保は技術者の知識と経験に頼っている部分が多い。
- 解析モデルの構築には各社各様のノウハウがあるが、これらは広く開示はされていないものの実際には共通の知識となっている部分もある。
- 解析精度の確保のためにはハードウェア設計にもある程度の制約条件を付加する必要がある。

22



**■ 解析の標準化**

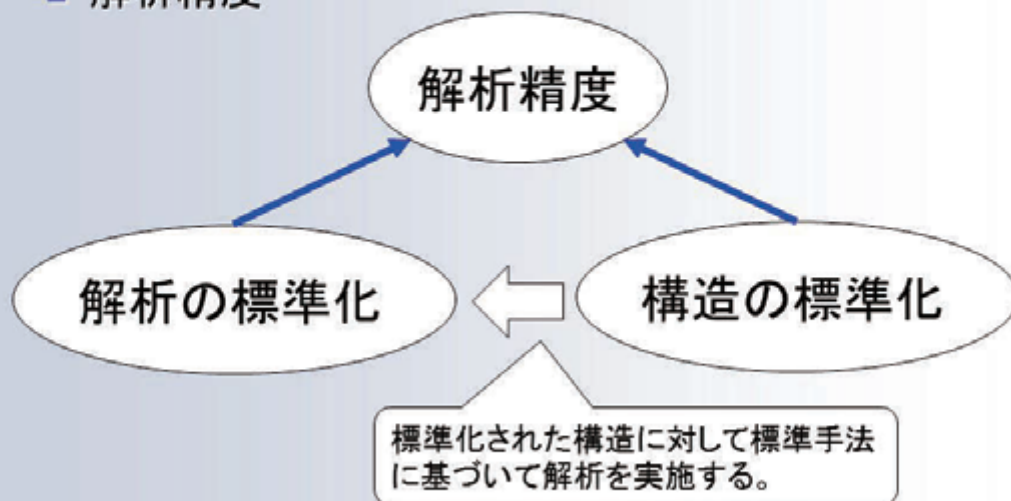
- 解析精度を安定的に高めるためには解析モデル構築のノウハウや手法を標準化し、技術者個人のスキルに頼らずに高精度な解析モデルを構築できるような環境を整えることが必須である。
- 解析技術の共通の知識となっている部分については標準化することによって、解析精度のレベルを揃えることができる。
- これらにはメーカー間の協力が不可欠であるが、実現すれば構造解析モデル構築のコストダウンにもつながり、メリットは大きいと考えられる。

23

**■ 構造の標準化**

- ハニカムパネルの締結部やインサート、複合材の構造など宇宙機構造を構成する要素をある程度標準化する必要があると考えられる。
- 宇宙機構造設計の自由度を制限する意味合いではなく、解析モデルで保証できる範囲内の構造要素を使用して設計を行うことを意味する。
- 地上の建築物の場合には建築基準法により設計がある程度制約されているが、建築物そのものは多様な設計が可能であるのと同様である。標準から外れた設計を行う場合には部分試作もしくは従来通りEMやPMによる認定を行うなどの手法を取ればよい。

24

**■ 解析精度**

25

**■ 解析の品質保証**

- シミュレーションの品質保証としては日本計算工学会が学会標準を策定しているが、これらはV&Vの考え方に基づき、解析コード自体の精度や解析手法の妥当性評価が中心である。(参考文献3)

設計現場における実情と乖離している

- 設計の現場で解析の品質保証に必要とされるのはモデルの品質確保とエラーの排除である。

モデルの品質：安定した品質のモデルの構築→標準化

エラーの排除：効率的なモデルチェック、結果の妥当性評価

26



### ■ 環境整備

- 解析の標準化のためにはメーカー間でノウハウを共有する仕組みが必要である。
- 現状のJAXAの設計標準等では解析による構造認定は陽には認められておらず、条件を明確にした上で変更していく必要がある。
- 初期段階としては実施に手間のかかる静荷重試験を省略するための条件整備等が足がかりになると考えられる。

27

### ■ まとめ

- 地上の建築物にはEMやPMIはない。ただし建築基準法という標準化された設計・解析・製造の手法に従って進める必要がある。マージンに対する考え方など宇宙とは異なる部分も多いが、同様の考え方で宇宙機構造を開発することは可能と考えられる。
- 技術的なイノベーションを生み出せるのはその分野を知悉した人々であり、宇宙分野の技術革新が行えるのは、JAXAやメーカーの豊富な技術を持っている人々である。ぜひ皆さんとともに宇宙分野のイノベーションを巻き起こしたい。

現状の宇宙機の開発や解析の技術を鑑みるとEMやPMを廃する機運は高まっている!

28

本講演にあたり、示唆に富んだご助言をいただいた、

JAXA 環境試験技術ユニット 施 勤忠 様  
三菱電機 宇宙システム部 世古 博巳様

のお二方に、厚くお礼申し上げます。

29

- 1) 中村 和行,他:Digital Prototype Modelによる宇宙機構造開発の提言,第58回宇宙科学技術連合講演会講演集,2S19,2014
- 2) パワーアップする試作,日経ものづくり,10月号2013年
- 3) 白鳥正樹他:工学シミュレーションの品質保証とV&V,丸善出版
- 4) 宇宙航空研究開発機構:構造設計標準,JERG-2-320A,平成23年5月31日A改訂
- 5) 宇宙航空研究開発機構:宇宙機一般試験標準,JERG-2-130A,平成29年3月31日
- 6) 宇宙航空研究開発機構:品質保証プログラム標準,JMR-005A,平成20年6月10日A改訂
- 7) 赤城弘樹,安藤成将,柳瀬恵一,施勤忠:宇宙機音響振動応答予測に関するFEA-SEA統合法適用の理論検討と実験検証,日本機械学会論文集(C編),79巻,第802号,P124-133,2013-6
- 8) 中村信子,福田盛介,竹内伸介:音響相当の荷重入力を考慮した人工衛星構体のランダム振動応答解析,第56回宇宙科学技術連合講演会講演集,3002,2012

30

## 質疑応答

### 質問者① JAXA 第一宇宙技術部門衛星利用運用センター 夏井坂様

締結部のファスニングのモデル化や、CFRP 等の CAD のデータベースとして有していない非金属材料をモデル化することが難しいと思いますが、宇宙以外の民生分野において、これらのモデル化の確度に関して知見があればお願いしたい。

### 発表者

ファスニングのモデル化に関しては、弊社としてはモデル化の方法とその精度に関する経験的な知見を有していますが、これらの知見を共有化していかなければならないと考えております。また CFRP に関しては、弊社の場合、プリプレグメーカーとのつながりがあり情報を有しているため、検討の初期段階においては経験的にプリプレグの性能を設定しています。しかし最終的には試験データに基づいて CFRP の材料特性を決める必要があると思います。そういった意味では複合材の材料データベースがあると非常に嬉しいです。

### 質問者② JAXA 環境試験技術ユニット 施様

ご発表にもあった通り、有人宇宙の分野においては No-test Factor として 1.5 倍の解析マージンを設ければ試験をしなくてもよいという基準がある一方、現行の JAXA 宇宙機設計標準では、音響・ランダム・衝撃解析において解析マージンをいくら積んでも、解析だけでは検証されるということにはなっていません。これに関して、今後解析で認定を行うといった方向に進むために、JAXA への期待があれば教えていただきたい。

### 発表者

解析をやっていると実際の試験データが不足するということがあります。例えば弊社としては音響応答解析に関する検討を進めたいという気持ちがあるが、使える音響試験データ、すなわち供試体の情報が含まれた試験データが不足しているという課題があります。守秘義務があるため難しいとは思いますが、そういったデータをうまく共有化できないかという期待があります。

### 質問者③ 日本電気株式会社 井上様

昨今、3D プリンタによる構造物等が宇宙機の分野でも使用されるようになってきていますが、これに関しても認定の壁が存在すると考えています。このような 3D プリンタによる構造物等に関する課題に対して、DPM によるアプローチ等、ご見解があれば教えていただきたい。

発表者

3D プリンタによる構造物がどれほど欠陥を内包するかというのと、使用可能な金属が限定されることによる強度不足が課題であると考えます。しかしながら 3D プリンタによる構造物は一体物であるため、解析誤差の要因である締結部を有していないので、解析精度は高いと思います。