P1-071 シミュレーションとフライトデータによるIKAROSセイル 膜面の展開・展張挙動の評価



宮崎康行(日大)、白澤洋次(東大・院)、坂本啓(東工大) 奥泉信克. 森治,澤田弘崇 (JAXA),松永三郎 (東工大), IKAROS構造系専門部会

1. はじめに ソーラー 電 カ セイル 小 型 実 証 機 剛体要素 1st deployment IKAROSの目的の一つに、大型膜面を 中心構体に連結 展開・展張し、その運動を評価して、展 端マス分離機構を駆動し 1自由度ジョイント (ピン結合) 開・展張シミュレーションの解析手法・モ 先端マステザー ラグランジェ乗数法 実際の膜の層数 デルを確立し、将来のソーラー電力セイ 質点要素 38 38 38 36 34 32 0.28m ルによる探査ミッションに反映させること 🟴 梁の根元と剛体の がある、そこで、展開・展張のシミュレー ケーブル要素 本体 1次展開終了 1 1052m 自由度を拘束 ションコードの開発に当たって、IKAROS ティモシェンコ梁要素 0.28m 0.14m 0.28m の三段階の展開シーケンス(Fig.1)に分 (a) MPM (b) FEM **漠の拘束が解かれるため** けて,それぞれ,以下に示す通り,膜を Fig.7 一次展開モデル バネ・マスのネットワークで近似する多粒 Fig.8は、一次展開時およびその直後の帯状膜の面内および面外振動を計算した例であり、 子法(MPM)を軸に,二種類の解析コー この例も含めて、FEMとMPMとで同様の結果を得たことから、MPMによる膜の模擬は妥当で ドを開発し、比較しながら計算結果の妥 Fig.1 展開シーケンス あるとの結論を得た. 当性を評価し、設計、運用計画、運用支

援(事前予測)をおこなった.そして、フライトデータや地上対照実験結果で数学モデル(特に,

MPMによる打ち上げ前の挙動予測とフライト



JAXAオリジナルのMPMモデル)の改善をし、挙動の事後評価を行ってきた.

①先端マス分離:多粒子法(MPM)と汎用FEMコード「ABAQUS」

②一次展開:多粒子法(MPM)と独自開発のFEMコード

③二次展開:多粒子法(MPM)と独自開発のFEMコード「NEDA」

2. 展開挙動評価

2.1. 先端マス分離

まず、先端マス分離は、MPMで運動の概要を把握した後、より詳細なモデルを用いて ABAQUSで運動の予測とフライト後の検証を行い、モデル化のノウハウを蓄積した.

先端マス分離では、実証機本体を約2rpmでスピンさせている状態でロンチ・ロックを外して 先端マスを分離する. Fig.2は, 実証機本体に巻き付けられたセイル先端部分を表している. 500gの先端マスを2本のテザーでセイル膜につなげる部分は補強等のため、テザーユニットと 呼ばれる、カプトンテープを用いた柔軟な板状のものを取り付けている.また、一辺14mの四 角形セイルを構成する4つの台形膜(ペタル)を連結する面ファスナも折り畳まれている.

このように、セイル先端は7.5µmの膜の他にいくつかの物体が折り畳まれるため、静荷重試 験により先端マス分離運動を剛性分布を同定し(Fig.3), Fig.4に示すFEMモデルで解析した.







データとでは、スピンレートの変化に運用には支 障のない範囲内ではあったが若干の差異が認め られたが、帯状膜の質量分布をわずかに修正す ることでこの差異は補正できた(Fig.9)



一次展開はシーケンスを16回に分け, 徐々に回転ガイドを相対回転させ、残留 振動が収まってから次の相対回転を行う ことで、安定に展開を実施した.そして、 その際の残留振動のフライトデータから、 回転ガイド部での帯状膜の振り子運動の 等価減衰係数を同定し、フライトデータと 概ね一致する結果を得た(Fig.10).

2.3. 二次展開

二次展開は、一次展開と同様、 MPMとFEMを比較しMPMの妥当性 を確認した.そして、MPMでパラメト リック・スタディを行って運用条件等を 決定し, MPMとFEMとで事前予測 (Fig.11)とフライト結果の事後評価を 行っているところである. Fig.12は、実証機本体に軸対称に 配置した4つの本体固定カメラで撮影 した二次展開時の画像であり この画像から, ① - 次展開 終了時の形状が非対称、② 二次展開も非対称(特に) CAM-H2), ③展張形状は対 称,ということがわかる. ー次展開終了時の形状に ついてはFig.13のように予測 21/1-11:30 しているところである.また, 二次展開そのものについて は, Fig.14のようにスピン レートの比較から, FEMでは 減衰の定性的変化を模擬で き、かつ、展張時のスピン レートがフライトデータとほぼ 一致することを確認している. 阿 ただし、非対称展開での計算 ではないため, 現在, Fig.12 を参考に,二次展開開始後 に2つのペタル膜だけが26秒 遅れて展開すると仮定して MPM で計 算したところ, Fig.15の通り, スピンレート の変化の様子(左)やニュー テーション(右)のオーダがフ ライトデータと概ねー致する 結果を得ている.ただし, Fig.14, 15ともに, MPMでは 減衰の様子がフライトデータ と異なっている. これについ 25 20 20 ては、他の研究により、MPM の等価バネ剛性を調整する ことでFEMとよく合うことを確 認しており、バネ剛性の理論 式の修正を検討中である.





Fig.10 ダンピングの同定



Fig.4 先端マス分離FEMモデル

Fig.5は先端マス分離直後のスピンレートのフ ライトデータ(レートジャイロ)とFEMの結果を表し ており、振幅、周期ともにFEMの方が大きい.こ のことから、実機の方が剛性が高く、また、4つの 先端マスの運動のばらつきが大きかった可能性 が高いと考えている.実際,先端マス分離後,事 前予測では先端マスが実証機本体に固定したカ メラの撮影画像に写るはずが写らず、スピンアッ プ後に写ったことから, 剛性の再評価を行って数 学モデルに反映した結果, Fig.6のように, フライ



Fig.5 分離直後のスピンレート



CAM-H2

CAM-H1

CAM-H3





Fig.11 事前予測例(FEM)



Fig.12 本体固定カメラ画像



ト結果と概ね一致する計算結果を得た.



Fig.6 スピンアップ後の平衡形状(スピンレート14.651rpm)

2.2. 一次展開

ー次展開では、MPMの妥当性をFEMや実験との比較により確認し、MPMにより展開挙動 予測、ならびに、フライト結果との比較による数学モデルの改善を行い、これを通じて、一次展 開挙動の事後評価をするとともに、MPMによるモデル構築手法を固めることができた. 一次展開に用いた数学モデルはFig.7の通りであり,回転ガイド(Fig.1)の相対回転により折 り畳まれた帯状膜がほどけてゆく状況を,MPMでは探査機本体への粒子の拘束を解放するこ とで, FEMでは帯状膜の長さを伸ばす(伸びる梁要素を用いる)ことで模擬した.

3. 最後に

IKAROSの展開・展張挙動評価の状況について報告した.フライトデータとの比較を通じて, MPMとFEMによる挙動解析/予測手法をほぼ構築でき、軌道上での挙動の事後評価もほぼ できつつある. 今後は、IKAROSで得られた展開・展張のシミュレーション技術をもとに、将来 のソーラー電力セイルミッションを検討してゆく.