

## 小型超音速実験機の衝撃吸収脚の着陸ダイナミクスシミュレーション

著者	樋口 健, 勝又 暢久, 中尾 拓治, 田宮 駿
雑誌名	室蘭工業大学航空宇宙機システム研究センター年次報告書
巻	2016
ページ	64-69
発行年	2017-08
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10258/00009796">http://hdl.handle.net/10258/00009796</a>

# 小型超音速実験機の衝撃吸収脚の着陸ダイナミクスシミュレーション

○樋口 健 (航空宇宙システム工学ユニット 教授)

勝又 暢久 (航空宇宙システム工学ユニット 助教)

中尾 拓治 (航空宇宙総合工学コース 博士前期1年)

田宮 駿 (航空宇宙システム工学コース 学部4年)

## 1. はじめに

超音速飛行を目指す小型超音速実験機の開発は、計画当初は超音速飛行の実現に特化して脚を有しない設計で始まったが、その後、繰り返し離着陸試験と亜音速飛行試験に供するための脚を取り付ける設計に変更された。超音速飛行機は一般に主翼面積を大きく取らないので、十分な高揚力装置を装備しない場合は着陸進入において不安定になりやすく、また着陸進入速度を大きく取る傾向があるため、亜音速飛行機に比べ脚構造に大きな衝撃荷重が作用することとなる。着陸脚構造の設計にあたっては、衝撃荷重を緩和するとともに、強度上も着陸インターフェース条件範囲における様々な姿勢や速度などの条件の組み合わせにおける着陸ダイナミクスシミュレーションにより設計荷重条件を設定する必要がある。本稿では、機体設計進捗によりこれまで想定されていた機体諸元が見直されたことにとともに、着陸ダイナミクスシミュレーションを更新し、それに基づいた主脚構造の開発進捗をまとめる。

## 2. 小型超音速実験機の機体諸元変更と衝撃吸収脚設計条件

見直された機体諸元は、全長約 8.48 m, 全幅約 2.4 m, 胴体外径 0.3 m (一般部), 離陸重量約 350 kg, 主翼面積約 2.15 m<sup>2</sup> である。着陸時は燃料を消費しているはずであるが、離陸直後の緊急着陸においても脚が機能する必要性を考慮し、ここでは離陸重量と同重量を用いてダイナミクスをシミュレーションすることにした。

脚の設計条件としては、着陸進入速度 180 km/h, 進入角約 3°, 機体姿勢角 18° という厳しい条件でも確実な着陸を実現する衝撃吸収脚が要求される。満たすべき設計条件は、

- ・機体が着陸時に安定した挙動を示すこと (特に、バウンドしないこと)
- ・着陸時の衝撃加速度が 6 G 以内に留まること
- ・脚伸縮ストロークを 15 cm 以内に抑えること

であり、これまでと変更はない。主脚構造は、2015 年度の検討成果を受けて「姿勢角に合わせて傾けたトラス型主脚構造案」を採用した (図 1)。前脚構造は脚柱 1 本の構造とした (図 2)。以下では着陸衝撃吸収に支配的な機能を果たす主脚構造を主として述べる。

## 3. 着陸ダイナミクス解析手法と機体モデル

脚をモデル化し、MATLAB Simulink, SimMechanics を用いてダイナミクスシミュレーションを行った。脚形状、部材構成、部材断面積、バネ定数、減衰係数は 2015 年度の検討成果を用いた。脚モデルの単純化のために脚ストラットは剛体棒とし、骨組構造の結合部は必要に応じて滑節と剛節を使い分けた。バネとタイヤとに弾性を持たせた。ダンパに減衰係数設定した。これらを機体諸元とともに表 1 に示す。想定される着陸条件の鉛直速度を実現できる高さからの自由落下解

析（表1において水平速度を0に設定）と、鉛直速度と水平速度とを持つ進入時の解析を行った。機体構造は剛体円柱と仮定し、表1の機体の慣性性能率は搭載機器等の想定される重量配分により定めた。

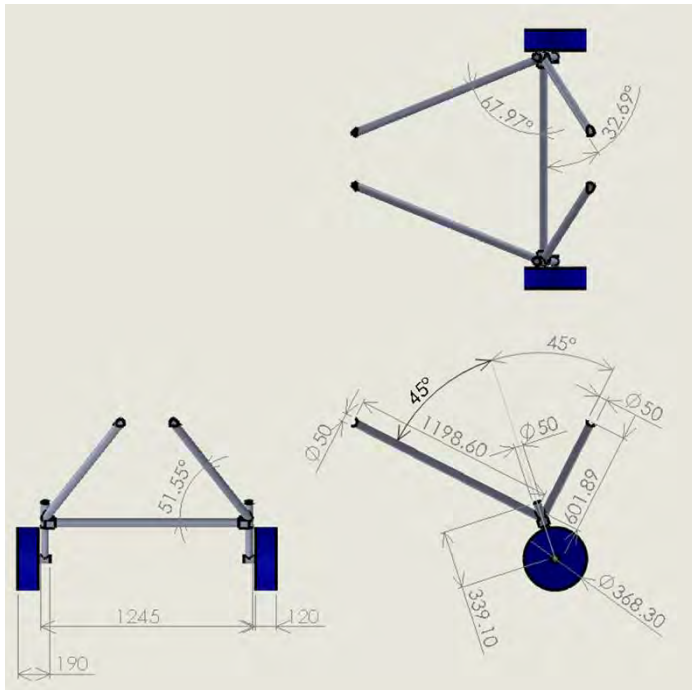


図1 主脚の構造

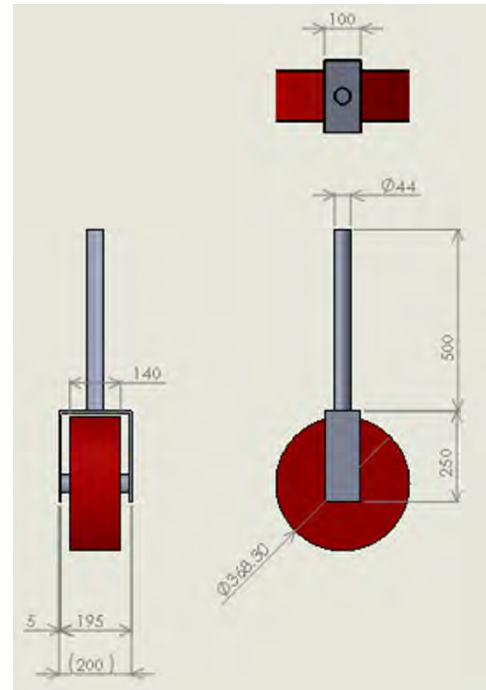


図2 前脚の構造

表1 鉛直落下解析時の機体諸元と解析条件

質量	機体	350 [kg]	
	前タイヤ	10 [kg]	
	後タイヤ	20 [kg]	
	全体	380 [kg]	
機体慣性モーメント	$I_{xx}$	13.18[kg*m <sup>2</sup> ]	$I_{xz}$ -1.88[kg*m <sup>2</sup> ]
	$I_{xy}$	0.25[kg*m <sup>2</sup> ]	$I_{yz}$ -0.03[kg*m <sup>2</sup> ]
	$I_{yy}$	1120.15[kg*m <sup>2</sup> ]	$I_{zz}$ 1123.55[kg*m <sup>2</sup> ]
	$I_{zx}$	1.88[kg*m <sup>2</sup> ]	$I_{zy}$ -0.03[kg*m <sup>2</sup> ]
機体重心位置	機体先端から	5.17[m]	
機体全長		8.48 [m]	
初期姿勢	ピッチ角	18[deg]	
	ロール角	0[deg]	
	重心高さ	1.5 [m]	
	水平速度	50.3[m/s]	
前脚	弾性係数 $k_{f1}$	22000 [N/m]	
	減衰係数 $c_{f1}$	1500 [Ns/m]	
主脚	弾性係数 $k_{r1}$	50000 [N/m]	
	減衰係数 $c_{r1}$	2000 [Ns/m]	
前タイヤ	弾性係数 $k_{f2}$	4589886 [N/m]	
後タイヤ	弾性係数 $k_{r2}$	9179772 [N/m]	

解析例として、鉛直落下時の機体重心上下方向位置の履歴、機体重心上下方向加速度の履歴、機体重心前後方向加速度の履歴をそれぞれ図3、4、5に示す。

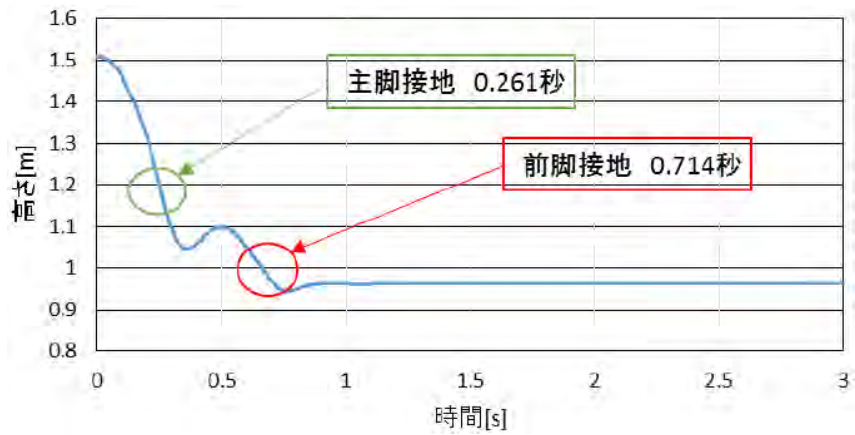


図3 鉛直落下時の機体重心上下方向位置

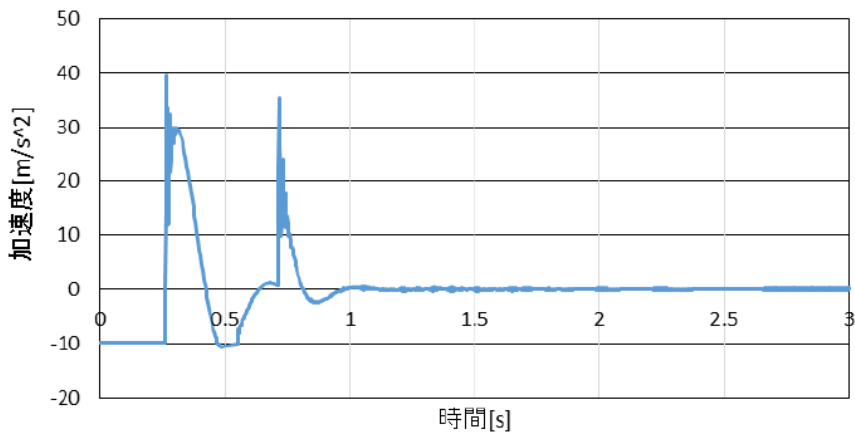


図4 鉛直落下時の機体重心上下方向加速度

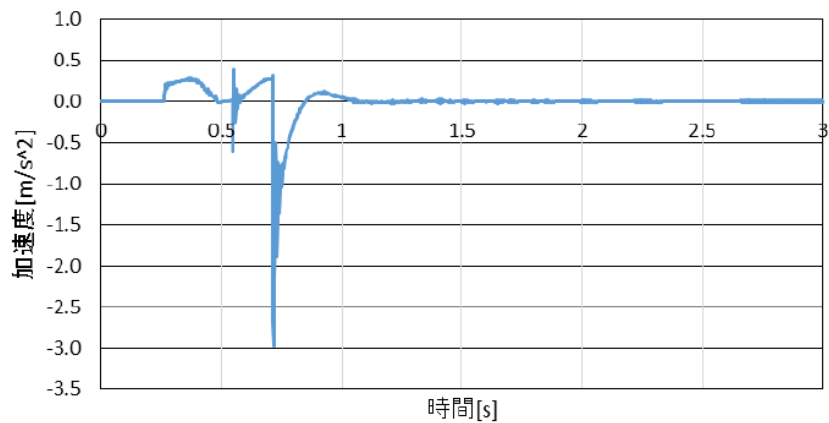


図5 鉛直落下時の機体重心前後方向加速度

表1の条件での解析によれば、鉛直落下時および水平速度を含む場合ともに設計条件の3つを満たす結果となり、強度上も問題はなかった。しかし、接地後に微小なロール運動が発生しており、接地時の反力のズレなどが確認された。このことを踏まえ、接地時にロール角を含む場合に初期ロール角が機体運動や脚構造に及ぼす影響を解析することとした。

#### 4. 初期ロール角を有する場合の着陸ダイナミクス

右タイヤが先に接地する方向に初期ロール角を設定した。初期ロール角変化に対する機体運動履歴中の機体重心の上下方向加速度の最大値、部材力の最大値、各脚反力の最大値をそれぞれ図6, 7, 8に示す。

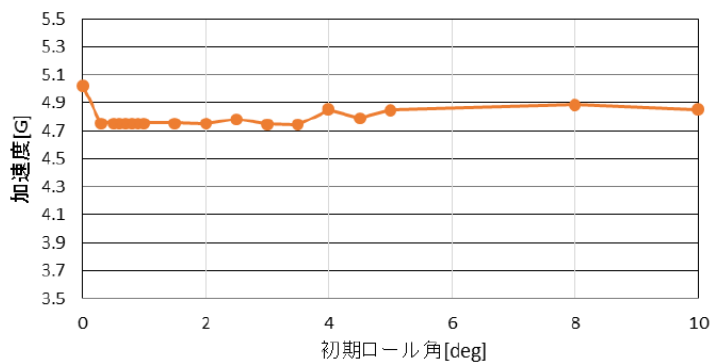


図6 上下方向最大加速度

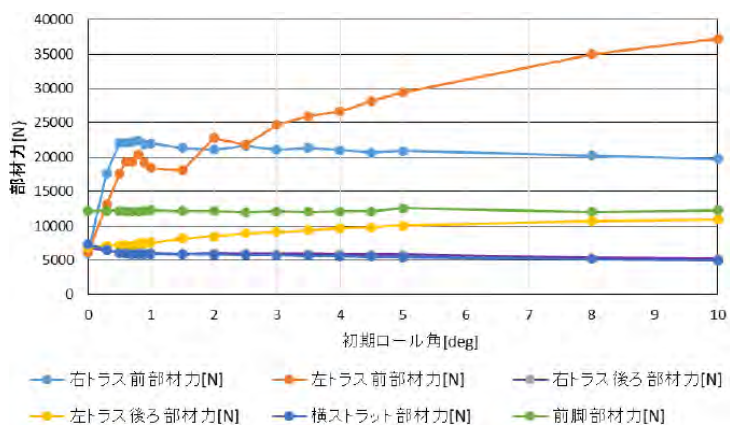


図7 最大部材力

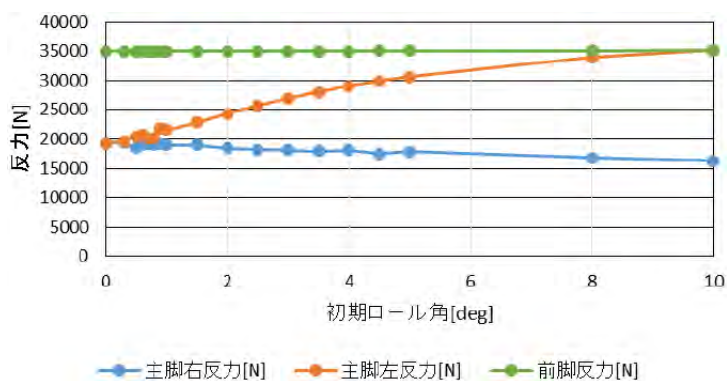


図8 最大反力

初期ロール角 0~0.5°にかけて主脚前ストラットの部材力が大きく上がる。特に右主脚前ストラットの部材力が敏感に変化し、これは右主脚前ストラットが先に地面に接地するため、その負荷が大きいと考えられる。このことから、主脚の部材力は初期ロール角に比例して大きくなるので

はなく、初期ロール角が0°であるか否かによって大きく変わることがわかった。同様に加速度も初期ロール角が0°であるか否かによって大きく変わる。

### 5. 初期ピッチ角が変化した場合の着陸ダイナミクス

以上では、初期ピッチ角を18°として解析してきたが、航法誘導制御系により接地時のピッチ角を必ずしも18°に固定できるわけではない。接地時のピッチ角を変化させた場合にも機体運動や脚構造に及ぼす影響が大きいと考えられる。ここでは初期ロール角を0°に設定し、機体運動履歴中の機体重心の上下方向加速度の最大値、前後方向加速度の最大値、各脚部材力の最大値、各脚の最大ストロークをそれぞれ図9、10、11、12に示す。

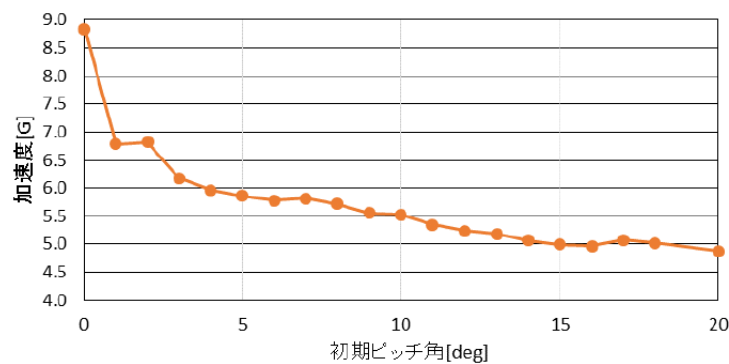


図9 機体重心の上下方向最大加速度

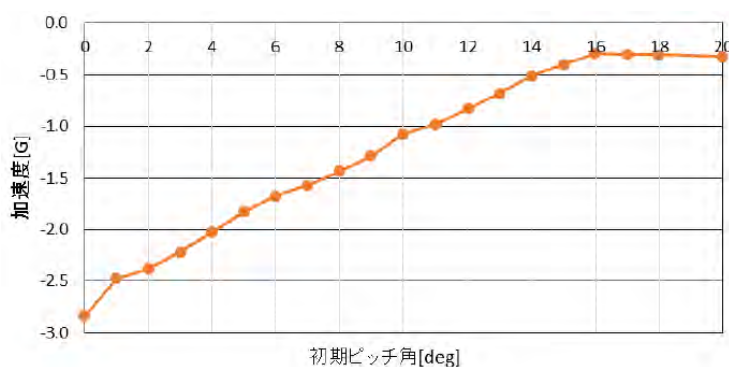


図10 機体重心の前後方向最大加速度

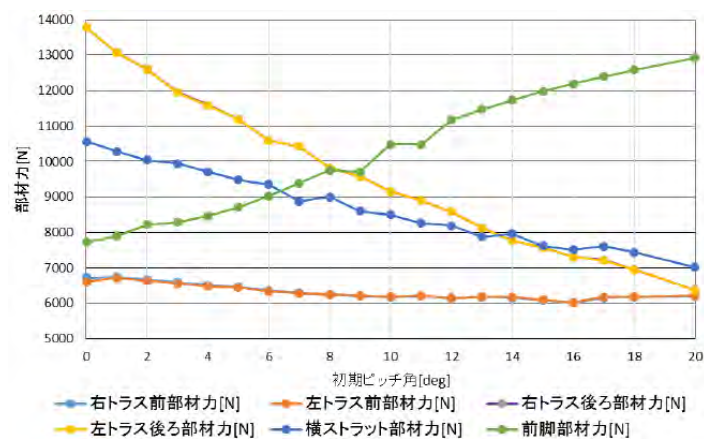


図11 最大部材力

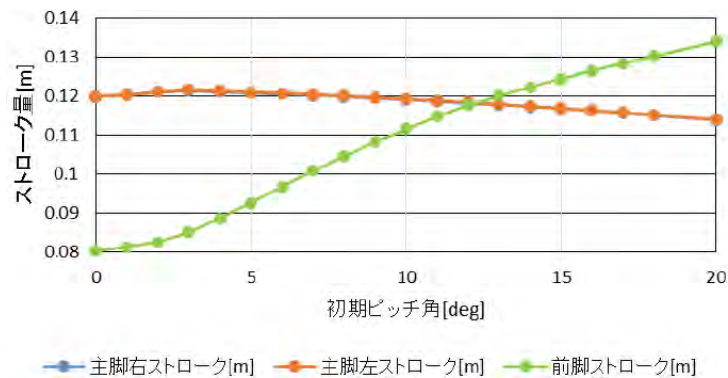


図 1 2 最大ストローク

機体の上下方向加速度と前後方向加速度は、初期ピッチ角が 0°に減少するにつれて大きくなる。また上下方向加速度は、0~4°にかけて設計条件の 6G を超える。この理由は、主脚の緩衝装置を姿勢角 18°に合わせて傾けて取り付けられているためである。ピッチ角が小さいときは、緩衝装置が緩衝装置の軸方向ではなく斜め下方向に縮むため、機体重心の前後方向加速度がマイナス（前方）に発生する。また、機体重心の上下方向加速度がピッチ角の減少につれて大きくなる理由は、前脚の接地するタイミングが原因と考えられる。ピッチ角が増加することで主脚の緩衝装置が衝撃を吸収し加速度が小さくなると考えられる。現在の脚構造では、ピッチ角変化において強度上の問題がないこともわかった。ピッチ角 5~20°において着陸する場合は着陸条件の 6G を満たしていることが確認された。

## 6. まとめ

小型超音速飛行実験機の更新された慣性諸元に呼応した着陸ダイナミクス解析結果をもとに、脚構造の初期設計が着陸インターフェース条件を満たす構造案を提案した。想定を大きく外れる極端な接地姿勢でない限り、着陸時の衝撃加速度が 6G 以内、脚伸縮ストロークが 15 cm 以内を満たし、強度上も問題ない部材寸法を設定することができた。

残された課題としては、左右のタイヤが同時には接地しないようなロール角を有する場合、かつピッチ角もノミナル条件の 18°から変化した、ロール角とピッチ角が複合的に変化した場合の着陸挙動解析が必要である。また、接地時にタイヤが急回転することで角運動量に変化する場合の解析、さらには所定の滑走距離で静止できるようブレーキ性能を含む解析が今後必要である。また、これらの結果を反映させた部品選定を進める予定である。