

2016/03/23 JAXA社会連携講座シンポジウム
「宇宙開発分野でのブレークスルーを目指して」

ハザードシミュレーション技術による飛躍的な安全性向上 ～有人宇宙飛行における破壊・人体衝撃モデリング～

宇宙航空研究開発機構
研究開発部門 第3研究ユニット (JEDI)
○藤本圭一郎, 根岸秀世

<人体衝撃>
植田, 斎藤, 栗山, 酒井 教授, 泉 教授, 波田野 助教(東大)
水野教授(名大), 鮎川, ハコボ(JARI)
沼尻, 田辺, 各分野の専門家(ティ・エステック)

<着水>
井上, 酒井教授, 古本, 姫野准教授(東大)

<実験計画・応答曲面>
下山准教授(東北大)

<破壊>
中井, 酒井 教授, 泉 教授(東大)
波多 助教(熊大)



スペースフロンティア拡大のための工学的課題

様々なリソース制約下での
挑戦的なミッション実現のためには,
効率的なリスク管理法による
信頼性と安全性の飛躍的な向上が不可欠



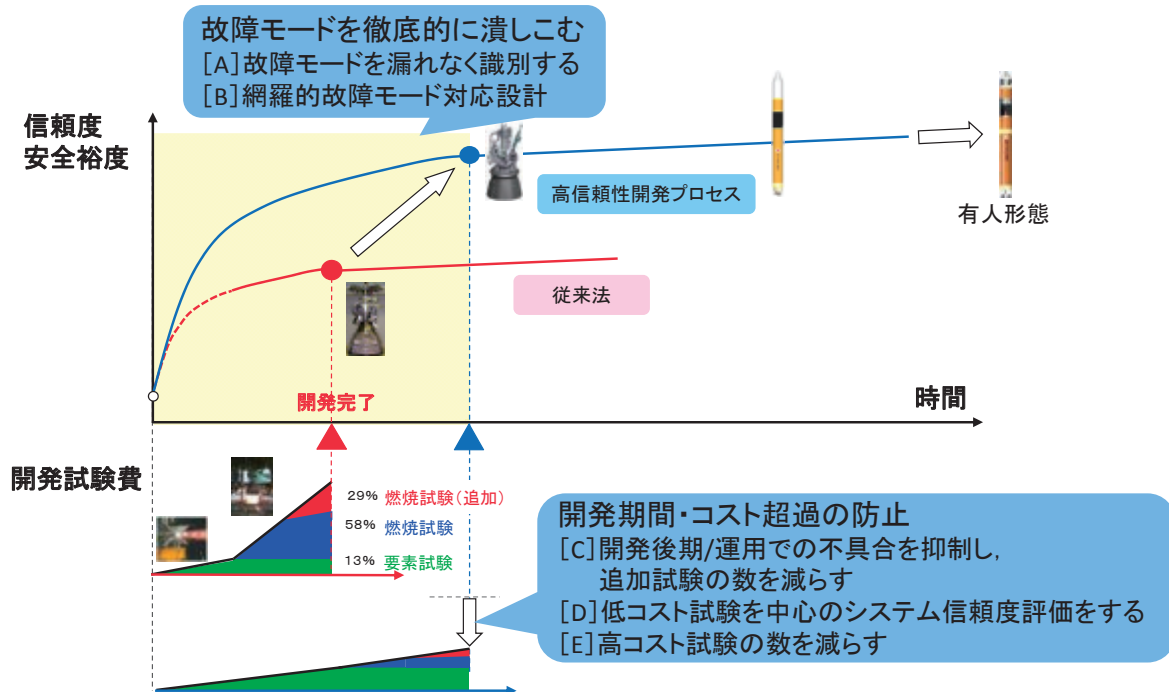
定量的リスク評価による飛躍的な信頼性/安全性向上(1/2)



3

高忠実な数値シミュレーションによる定量的リスク評価技術(QRA)の獲得

1) 上流での信頼性/安全性設計, 2) 信頼性/安全設計余裕の適正化, 3) 検証試験規模の削減

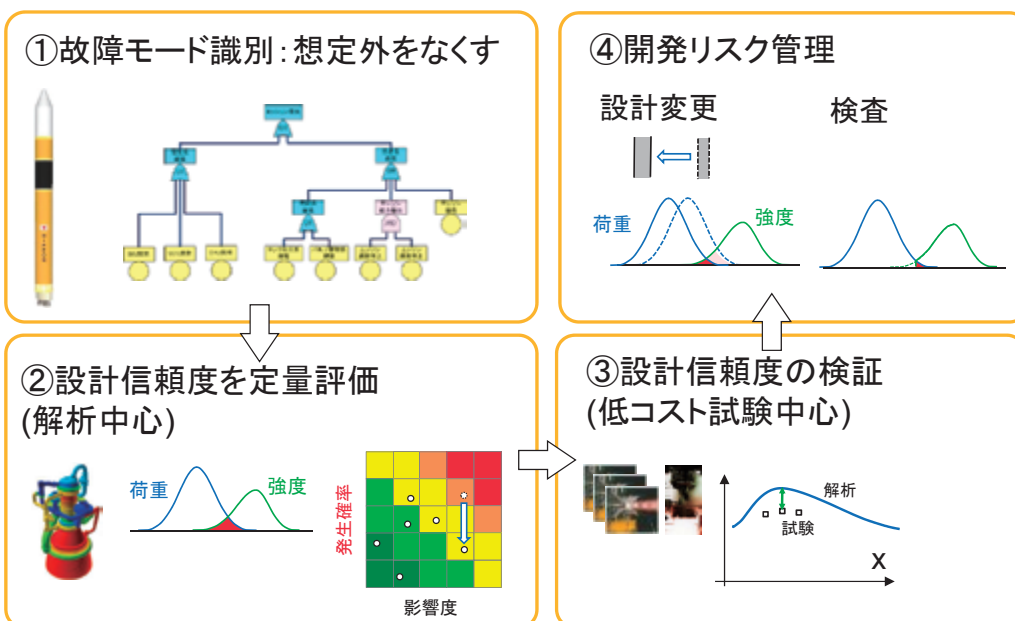


定量的リスク評価による飛躍的な信頼性/安全性向上(2/2)



4

網羅識別した故障モードに対処することで、
設計で信頼性/安全性を作りこむ



研究テーマ選定 ー宇宙開発分野への貢献

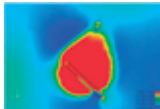


5

- ・有人ロケット安全性のQRAにより発生頻度が高く, 影響度が大きい事象を選定.
- ・ロケット飛行安全評価, 日本人宇宙飛行士の安全評価等の構築・精度向上に貢献.

A. 数値シミュレーション技術の構築

爆風/火球/デブリ



②破壊・爆発プロセス

デブリサイズ・数, 爆発威力

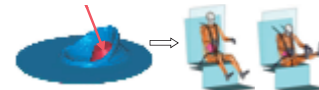
B. 開発手法の実用化上の課題

③実験計画・応答曲面近似

不確かさ定量化のための計測箇所選定

①着水衝撃・乗員安全

機体加速度 傷害発生確率



研究テーマ選定 ①着水衝撃・乗員安全



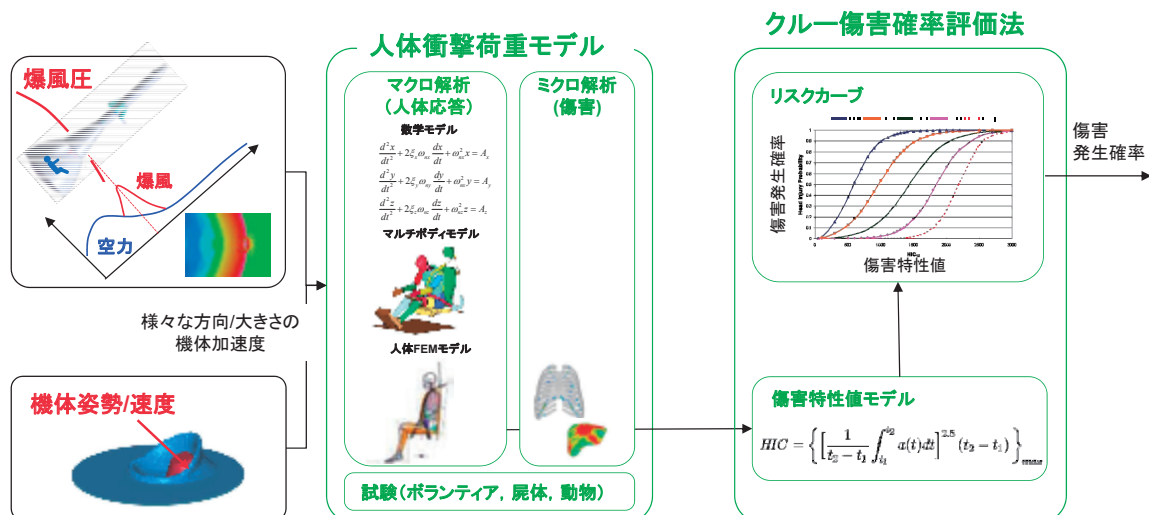
6

【目的】

- ・飛躍的なクルー安全性向上のための高精度な乗員安全評価法の獲得
 - 日本人宇宙飛行士の安全性評価と搭乗可否判断は日本独自でおこなう.
 - 商業有人宇宙船への移行, 月・火星有人宇宙探査に向けたクルー安全性向上が急務

【研究課題】

- 1) 宇宙特有の加速度条件下での乗員安全シミュレーション技術の獲得
- 2) 実問題適用上の課題解決(計算負荷の軽減, 解析精度の検証)



研究テーマ選定 ②破壊・爆発プロセス



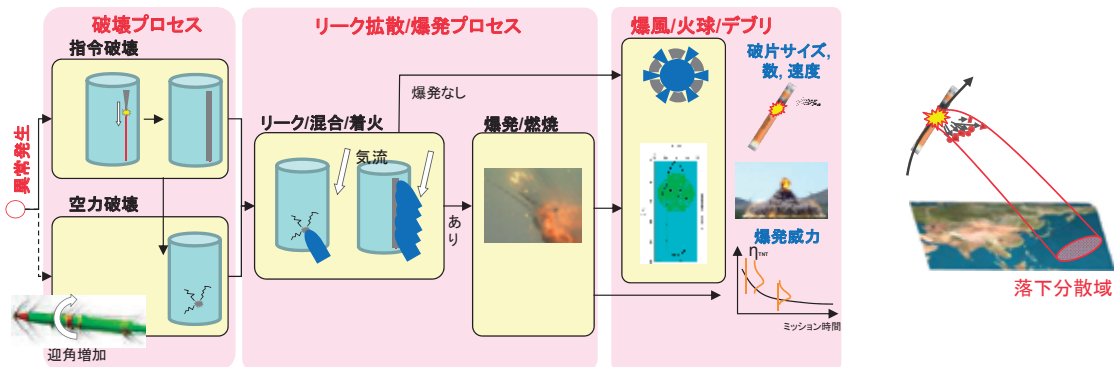
7

【目的】

- ・安全性と国際競争力(打上能力/可能確率)強化のための高精度な飛行安全評価による飛行安全制約の緩和
⇒ロケット軌道の自在性の向上

【研究課題】

- 1) 複雑な破壊・爆発プロセスの数値シミュレーション技術の獲得
- 2) 実問題適用上の課題解決(計算負荷の軽減, 解析精度の検証)



研究テーマ選定 一実問題にふれる機会, 他産業への貢献



8

【実問題にふれる機会】

学生のモチベーション向上や, 実用上の課題認識を共有するために実設計問題を対象とした。

【他産業への貢献】

学術発表及び研究コミュニティ形成というカタチで他産業へ展開。

<破壊・爆発>

- ・水素自動車, 燃料電池, 大量液体水素貯蔵, 核廃棄物の輸送の分野においても, 性能向上の為の現象把握, 自然災害・テロによる破壊等を想定に入れた安全性評価技術が不可欠。
- ・世界的にも, ハザードシミュレーション技術は未成熟であり, 継続的な研究が行われている。
- ・日本では, 水素エネルギー利用の促進のためにKHKや国交省の委員会が主導し, 大学等で研究が行われているが, 想定外としてきていたハザード事象の研究は欧米に比べ遅れている。



<乗員安全>

- ・自動車や列車の更なる海外進出の為には, 事故時の乗員安全性の更なる向上が不可欠。
- ・世界的にも, 前突・後突以外の様々な加速度下での人体挙動や傷害メカニズムの研究が行われている。



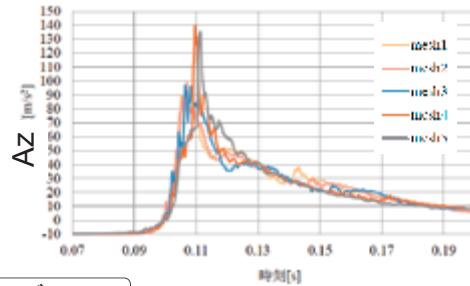
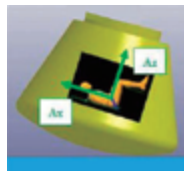
①着水衝撃(1/3)



9

【解析手法】LS-DYNA ALE法, 及びCIP-LSM
【対象】理論解比較, HTV-R6.8%, Apollo1/4モデル
【条件】オフノミナル条件を含む機体速度・姿勢角

格子解像度スタディ



HTV-R6.8%

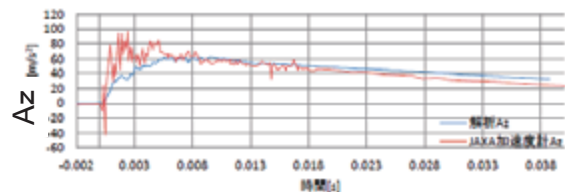
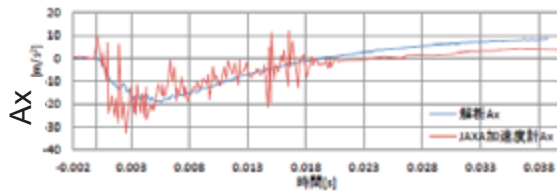


Apollo1/4



Case Name	Cell Size [m]	Az Max [G]
Mesh1	0.065	9.381
Mesh2	0.070	10.065
Mesh3	0.080	9.881
Mesh4	0.100	14.276
Mesh5	0.150	13.766

HTV-R 6.8%モデル



①着水衝撃(2/3)

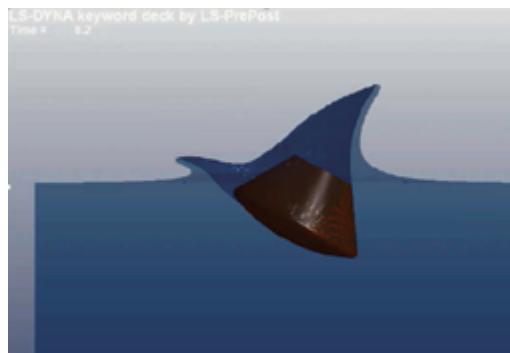


10

・広い条件下での着水衝撃加速度の十分な数値解析精度を確認できた。

Apolloカプセル(1/4スケール)

Case	Pitch [deg]	Vv [m/s]	Vh [m/s]	Exp. Ax max	Cal. Ax max	Exp. Ax max	Cal. Ax max
NS1	11	4.85	4.55	69.7	71.3	361	357.7
NS2	21	4.76	4.55	67.7	74.0	172	186.3
NS3	23	5.50	0.00	40.2	55.7	167	151.9
NS4	38	4.57	4.55	33.4	41.6	29.4	28.5



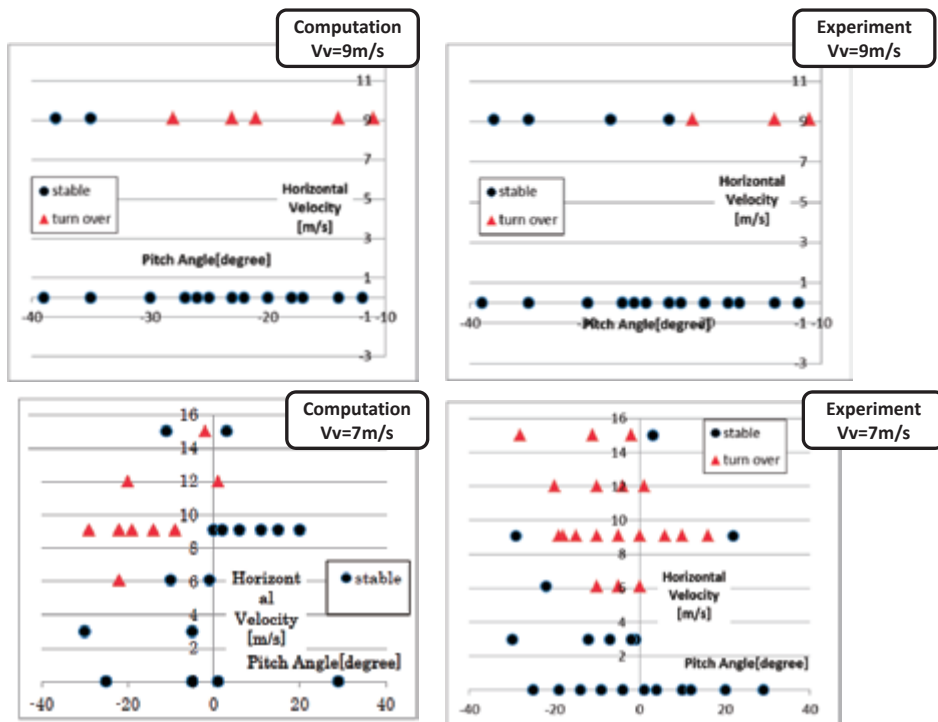
Copyright of NASA

①着水衝撃(3/3)



11

- ・広い条件下での着水後の横転の可能性等の十分な数値解析精度を確認できた。

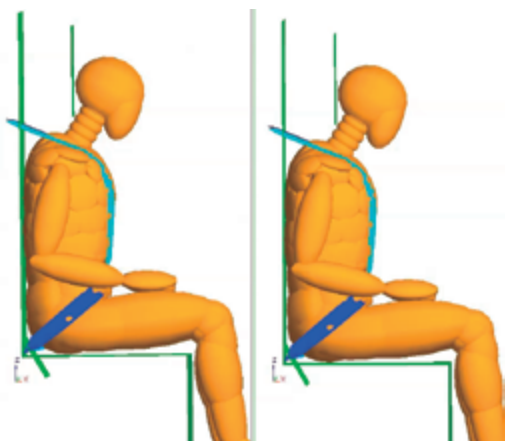


②乗員安全(1/6)



12

- ・自動車以上の様々な方向/大きさの加速度条件の考慮が必要。
- ・加速度条件毎のダミーモデル, 傷害特性値, リスクカーブの適切な選定が重要。
- ・不確定因子が少ない状態から研究を。
STEP1: 剛体シート, ダミー
STEP2: 剛体シート, ダミー/人体FEM
STEP3: 宇宙船シート, ダミー/人体FEM



マルチボディ解析(ダミー)



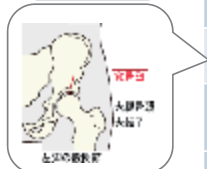
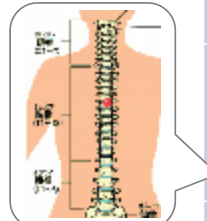
人体FEM解析

②乗員安全(2/6)



13

		宇宙船 (NASA)	頭部傷害	顔面外傷	頸椎外傷	鈍的外傷	肺挫傷	肋骨骨折	血気胸	傷害	上肢関節	上肢骨折	骨折	大腿骨頭	胸椎外傷	腰椎外傷	障害	下肢関節	下肢骨折
頭	HIC	700 (HIC15)	●																
	BriC		●																
首	荷重	6.8kN (圧縮) 6.8kN (引張)			●														
	モーメント	320Nm (flx) 135Nm (ext)																	
胸	最大たわみ					●	●	●											
	GG's	60 (3msec)																	
	CSI	700																	
	胸椎の軸方向圧縮													●	●				
肩部	横方向荷重 (たわみ)					●	●	●	●	●									
股関節	寛骨臼の横方向荷重												●						
腰椎	荷重	6.6kN																	
	モーメント	--- (143Nm)																	
腰		--- (32-49G)																	
大腿部	荷重	--- (10kN)																	
足首	モーメント																	●	
設計要求 (人体とHWとの接触, 拘束具)			●		●					●	●						●	●	

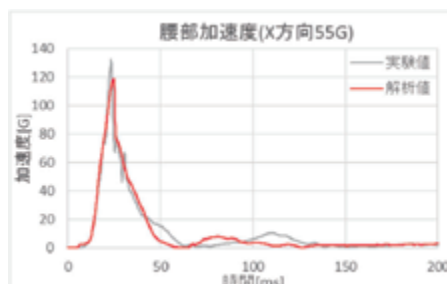
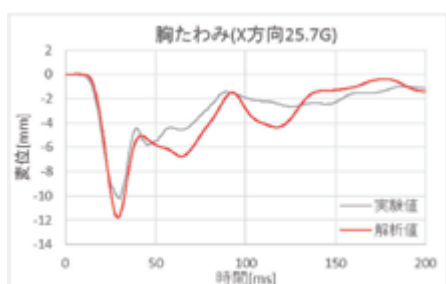
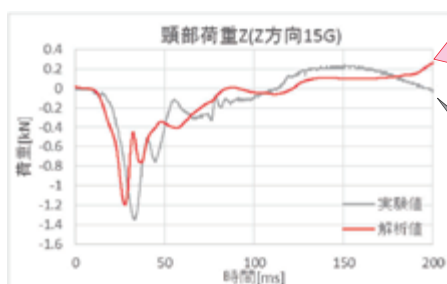
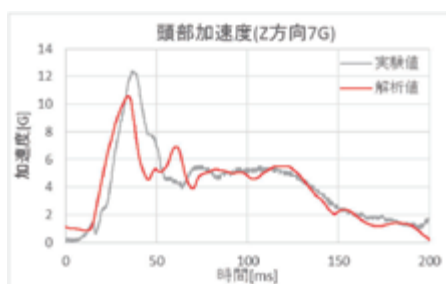


②乗員安全(3/6)



14

- ・剛体シートを用いたダミー試験の再現解析を行い, 以下の支配的な不確定因子を明確化し, パラメータチューニングを行った.
 - シート/ヘッドレストとダミーの貫入量と接触力の関係, 摩擦係数, ベルトやダミーの初期位置
- ・解析値と試験値との比較から, 解析モデルが十分に高い精度を有することを確認できた.



②乗員安全(4/6)

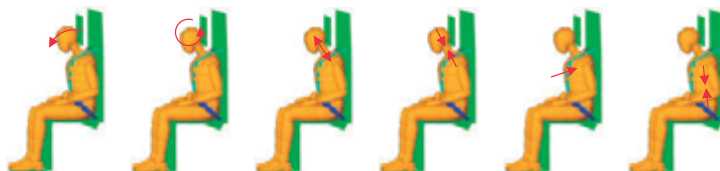


15

- ・精度向上を行ったモデルによりLASによるアボート時の加速度条件における傷害発生確率を算出し、頭部及び頸部の傷害発生確率が高いことを明らかにした。
- ・着水時及び爆風圧到達時の機体加速度を人体に印加。
- ・以下の理由から実際よりも厳しい条件での解析となっている。
1) 与圧服を未考慮, 2) 剛体シートを考慮, 3) 過大な加速度入力を使用

→与圧服や宇宙船シートの考慮, 着水解析等による加速度環境の把握を進める。

部位		頭部		頸部		胸部	腰部	
傷害値	最大	HIC15	ORIC	頸部引張力	頸部圧縮力	胸たわみ	腰椎圧縮力	
基準	加速度[G]	340	0.04	880N	580N	25mm	5800N	
着水条件	pitch-11	36.7	48.8%	948.9%	82.7%	260.9%	56.7%	80.9%
	pitch-21	17.5	5.0%	398.3%	34.0%	119.2%	25.6%	48.0%
	pitch-38	3.1	0.1%	100.6%	4.5%	31.2%	6.2%	15.2%
爆風圧条件	case1	55	9.9%	414.9%	56.3%	112.4%	29.5%	82.1%
	case2	11.7	13.4%	582.3%	69.5%	96.6%	12.5%	50.1%
	case5	41.3	88.8%	611.4%	148.8%	242.1%	56.1%	98.8%
	case7	103.2	716.8%	1124.5%	336.9%	833.2%	125.4%	179.8%
	case8	25.7	39.5%	502.7%	102.7%	167.9%	39.7%	75.5%
	case9	80.29	150.9%	800.9%	190.4%	330.9%	74.9%	122.5%



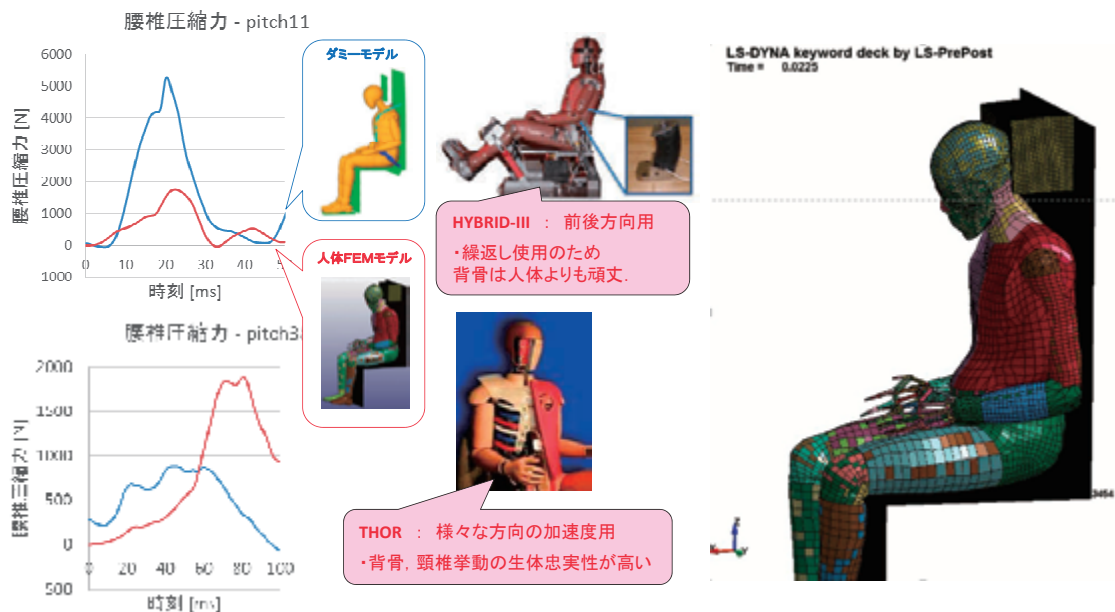
②乗員安全(5/6)



16

- ・マルチボディーモデル及び人体FEMを用いた人体挙動解析を行い、有人宇宙船で重要となる背骨軸方向の加速度に対する人体マクロ挙動及び腰椎圧縮力の時間変化に大きな違いが見られることを明らかにした。

→こうした条件で生体忠実性の高いTHORモデルを併用することとした。

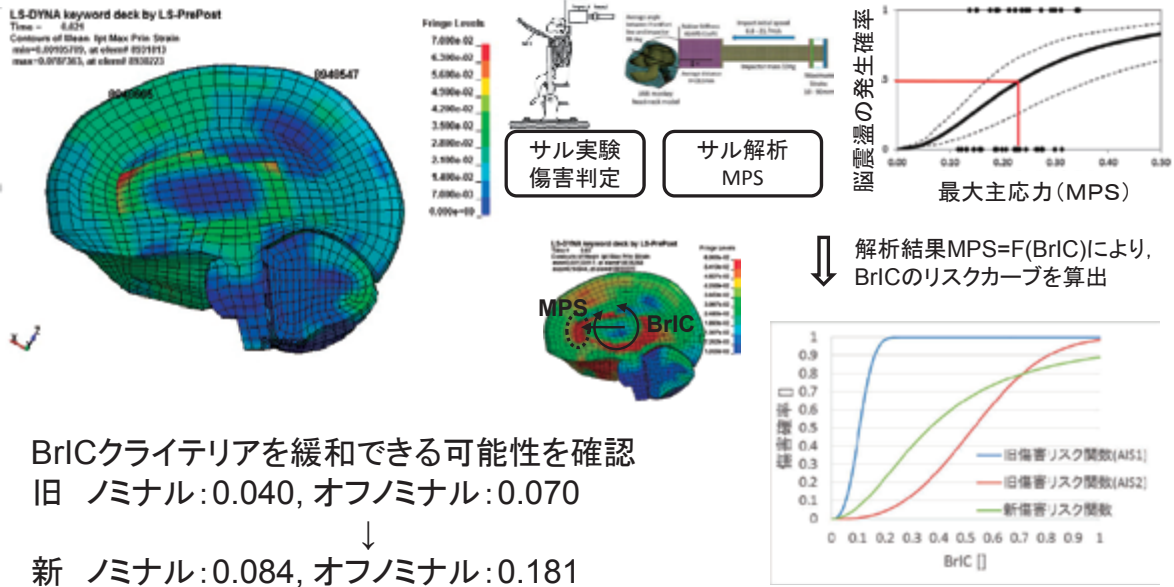


②乗員安全(6/6)



17

- ・爆風圧及び着水衝撃により傷害発生確率が高いのは、頭部(脳)、頸部、胸部
- ・頭部の傷害値BrICのAIS1リスクカーブは検証が不十分であるため、JARIでの猿実験データに基づくリスクカーブ構築を試行した。

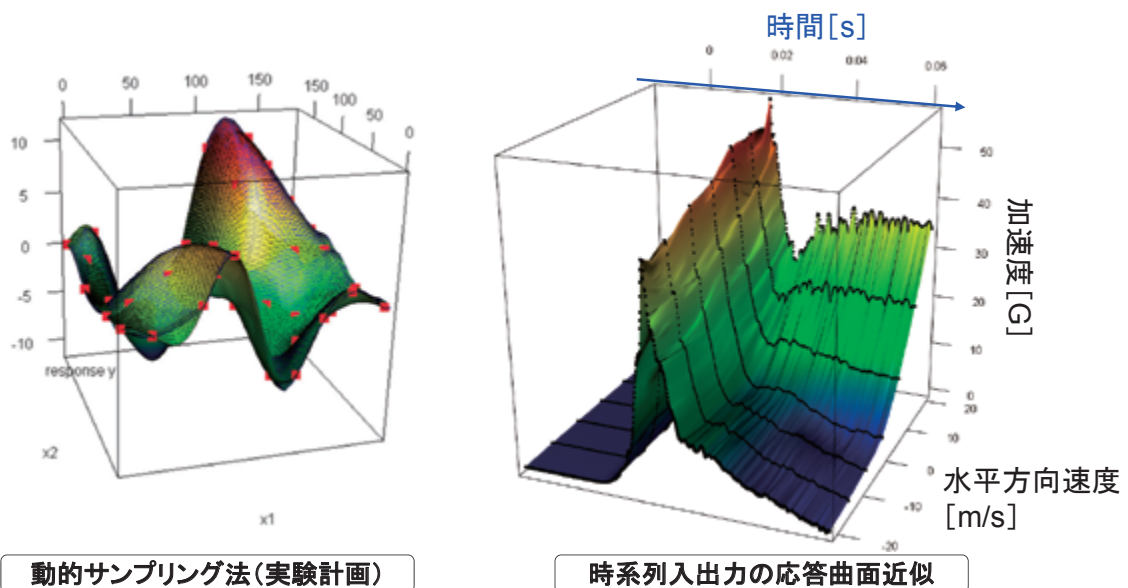


③実験計画・応答曲面



18

- ・確率論的評価の実用化のために、動的サンプリング法による解析数の削減、時系列入出力の応答曲面近似化の研究を進めている。

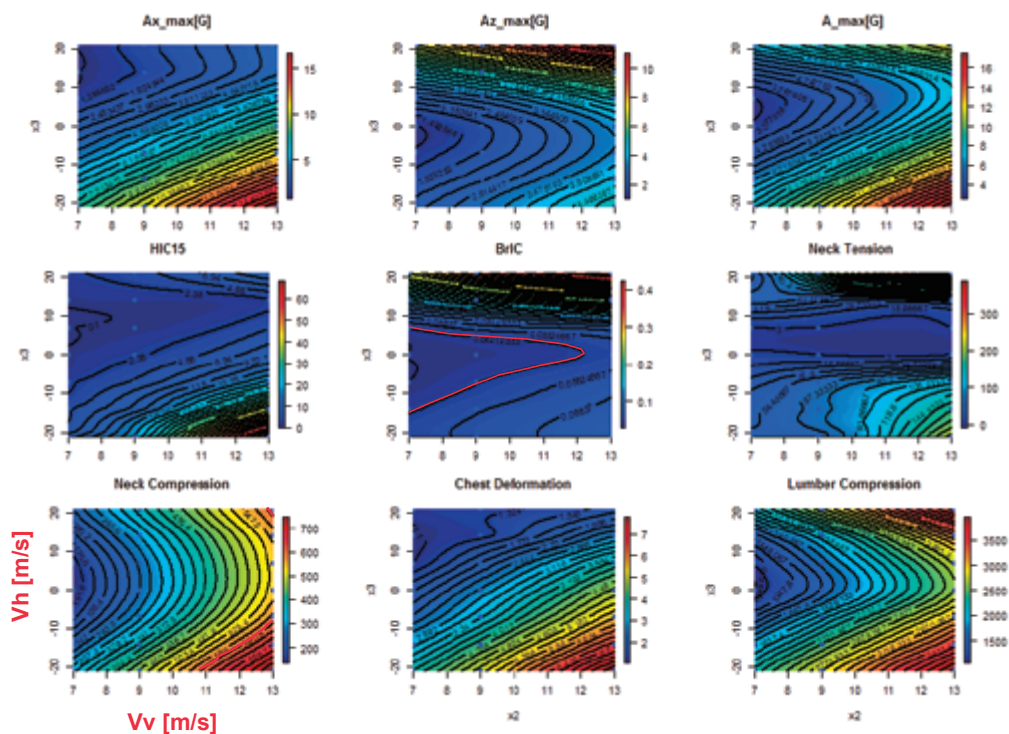


宇宙船シートの設計検討(1/2)



19

- ・広範囲の機体速度、姿勢角での着水加速度と傷害発生範囲を算出。

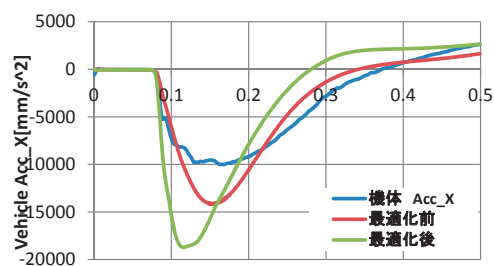
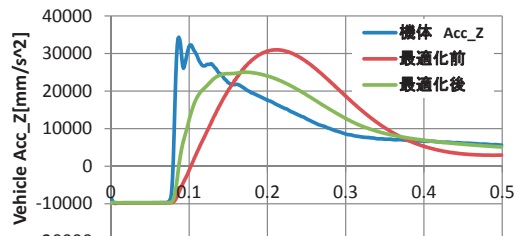
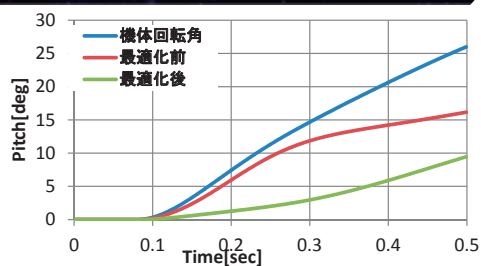
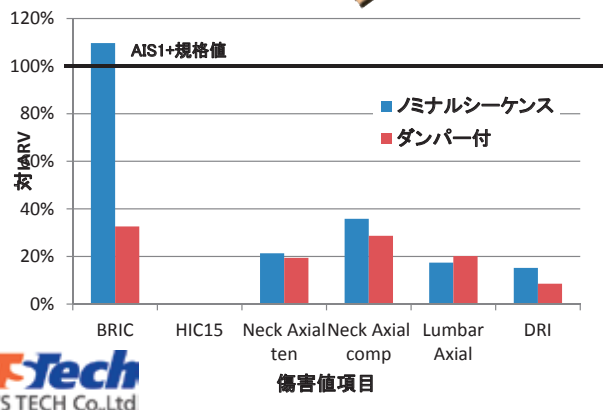


宇宙船シートの設計検討(2/2)



20

先進的な技術を有するTS-tech社の専門家の方々にシート設計や乗員安全研究へのご助言等、多大なご協力を頂いている。

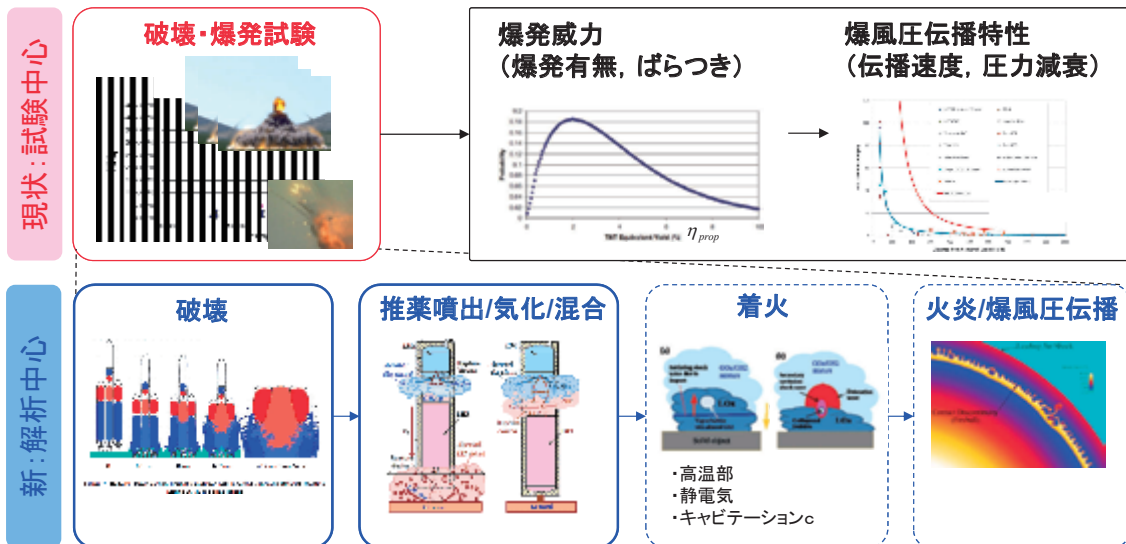


④衝撃荷重, 破壊(1/3)



21

- 液体ロケットの破壊・爆発プロセスに関する課題は以下のとおり。
 - (1) 現象把握の不足。
 - (2) 爆発威力ばらつき評価の為に、高コスト試験数の削減。
- これらを解決には、破壊・爆発プロセスの物理モデルの構築と、数値シミュレーションをベースとした効率的な安全性検証手法の確立が不可欠。

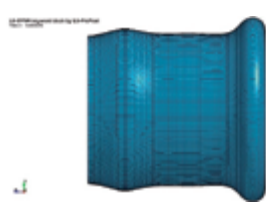
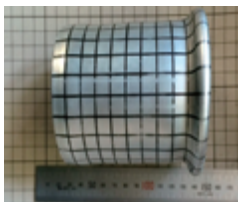


④衝撃荷重, 破壊(2/3) -大変形

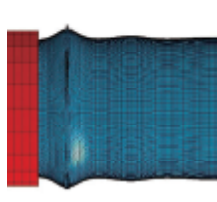


22

- 液体ロケットタンクの広範囲の温度, 歪み速度に適用できる構成則, 破壊則を構築。
- 歪み速度依存性を考慮した材料構成則により解析精度を向上させることができた。
- 簡易ジョンソンクック則



歪み速度依存性の考慮あり



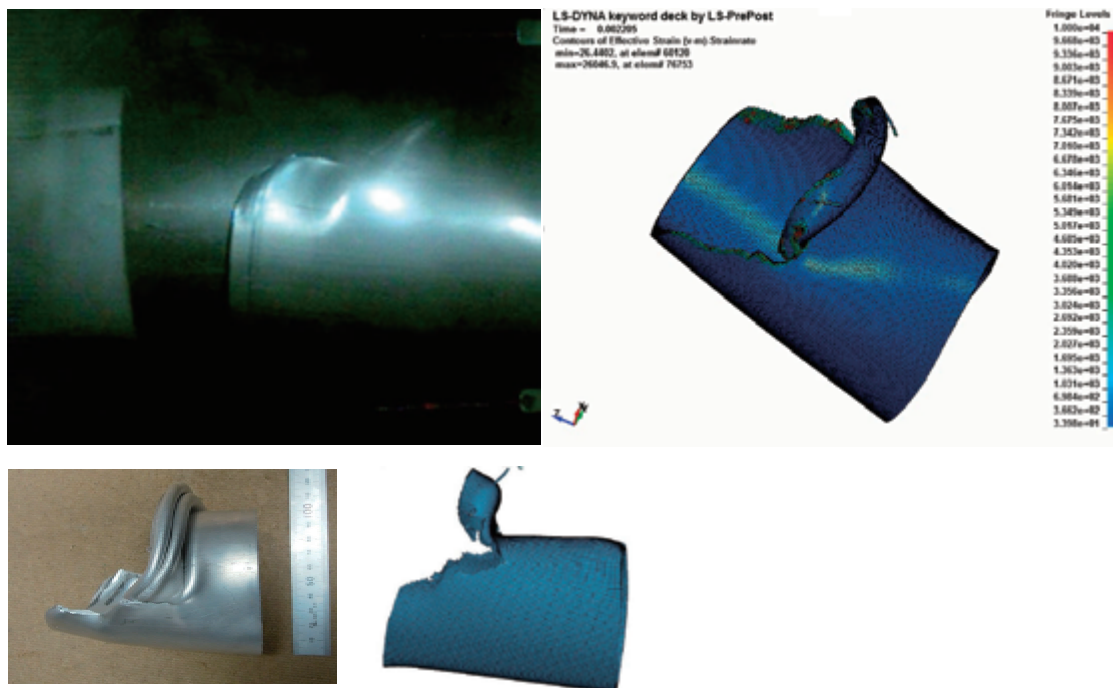
なし

④衝撃荷重, 破壊(3/3) -大変形+き裂伸展



23

- ・液体ロケットタンクの広範囲の温度, 歪み速度に適用できる構成則, 破壊則を構築.
- ・前頁の歪み速度依存性を考慮した材料構成則, ひずみ値による破壊則により解析



今後の研究計画



24

	今後の研究課題	適用先(JAXA内研究)
①着水衝撃・乗員安全 	<ul style="list-style-type: none"> ・THORモデルの検証 ・設計されたシートの評価 ・与圧服等の影響評価 ・乗員安全評価法の纏め 	<ul style="list-style-type: none"> ・小型回収カプセル等の着水評価 ・乗員安全評価(TBD)
②破壊・爆発プロセス 	<ul style="list-style-type: none"> ・破壊試験データの取得 ・材料構成則, 破壊則の同定 ・着火メカニズムの研究 	<ul style="list-style-type: none"> ・爆破添加速度の評価法の改良 
③実験計画 ・応答曲面近似 	<ul style="list-style-type: none"> ・実問題適用と改善 	<ul style="list-style-type: none"> ・リエントリEC評価の適正化 