

夢へ踏み、宇宙を拓く
JAXA JEDI
JEDI's Engineering Digital Innovation Center

2015/04/21 JAXA社会連携講座シンポジウム
構造材料に関わる安全設計の高度化～宇宙航空分野から他分野への新たな展開～

有人ロケットの定量的安全性評価に向けた 破壊・爆発モデリング研究

宇宙航空研究開発機構
研究開発本部 第3研究ユニット (JEDI)
○藤本圭一郎, 根岸秀世
第4研究ユニット
宇宙輸送ミッション本部
斉藤靖博, 飯塚宣行, 沖田耕一



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において
挑戦的なミッションの実現のためには,
効率的なリスク管理法の確立が不可欠.
→信頼性と安全性を飛躍的に向上させる



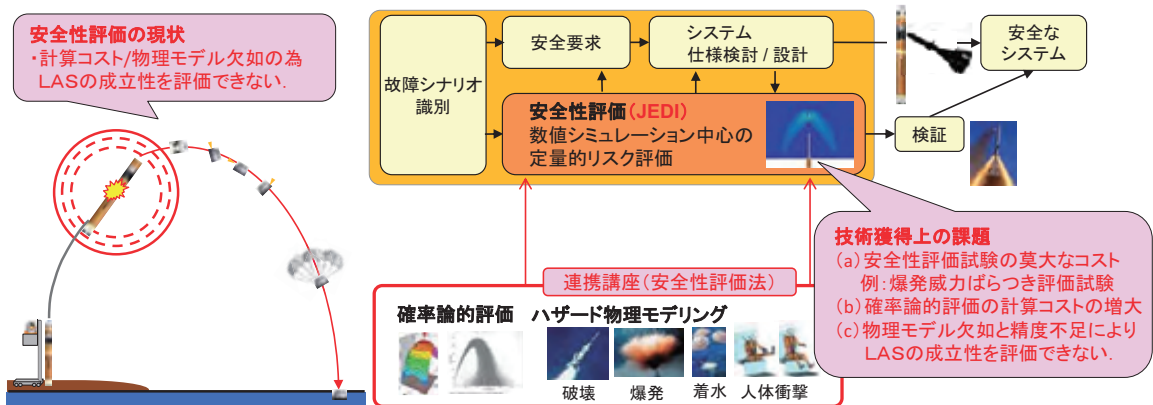
有人ロケットの定量的安全性評価法の確立

【目的】

- ・クーラー安全性定量評価技術の獲得(安全性設計, プロジェクト化判断に利用)
- ・LASの成立性評価(カプセル型/再使用型の安全性比較, 安全要求抽出)

【獲得すべき評価技術】

- A) 高忠実な数値シミュレーションによるクーラー安全性定量評価技術
 1) 上流での安全性設計, 2) 信頼性/安全設計余裕の適正化, 3) 検証試験規模の削減



無人ロケットの安全性評価の高精度化

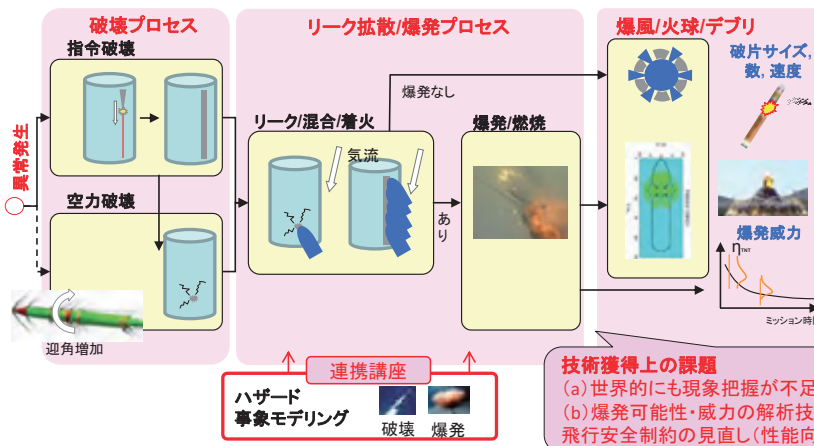
【目的】

- ・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

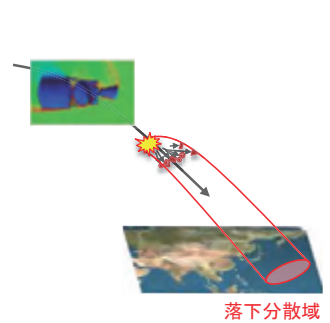
【獲得すべき評価技術】

- 高忠実な数値シミュレーションによる定量的安全性評価法
 A) 高精度化された打上中の指令破壊時の破片数/添加速度評価法
 B) 高精度化されたリエントリ時の破片落下分散域の評価法

A) 打上中の指令破壊



B) リエントリ中の溶融・破壊

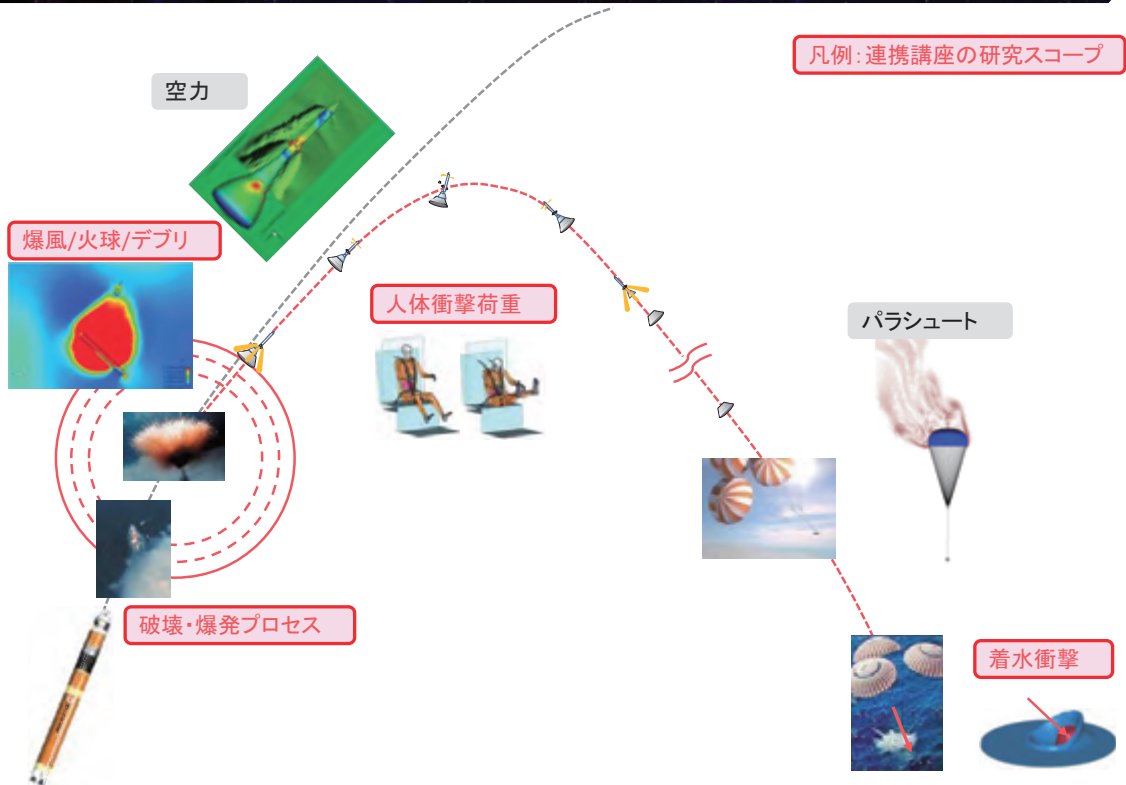


技術獲得上の課題
 (a) 世界的にも現象把握が不足
 (b) 爆発可能性・威力の解析技術がなく、飛行安全制約の見直し(性能向上)ができない。

JAXA社会連携講座における研究テーマ(安全性)



5



定量的安全性評価技術の構築 — 他分野への貢献



6

【他産業への貢献】

- (1) 本研究では、上記に参画している専門家との連携による体制を構築(連携講座)
- (2) 最終的には、JAXA内成果の他産業への展開も検討

<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.



<事故時の乗員安全>

- ・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.



有人ロケットの定量的安全性評価法の確立

日本独自の有人宇宙輸送実現への課題



破局的なハザード(爆発)



Pad Explosion during static firing (Atlas C Able, 1959)



Falls back (Atlas-Centaur, 1965)



Loss of Control, Aerodynamic breakup (Ariane 5, 1996)



LASによる救命成功 Pad Fire (Soyuz T-10-1, 1983)



全クルー死亡 SRB Explosion (STS, 1986)

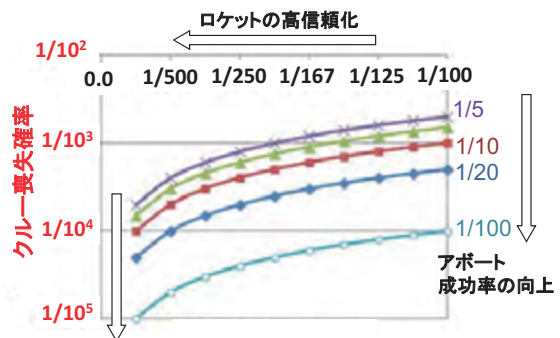
高い安全性の確保

ロケット高信頼化に加え、安全化機能による飛躍的な安全性向上が必須。

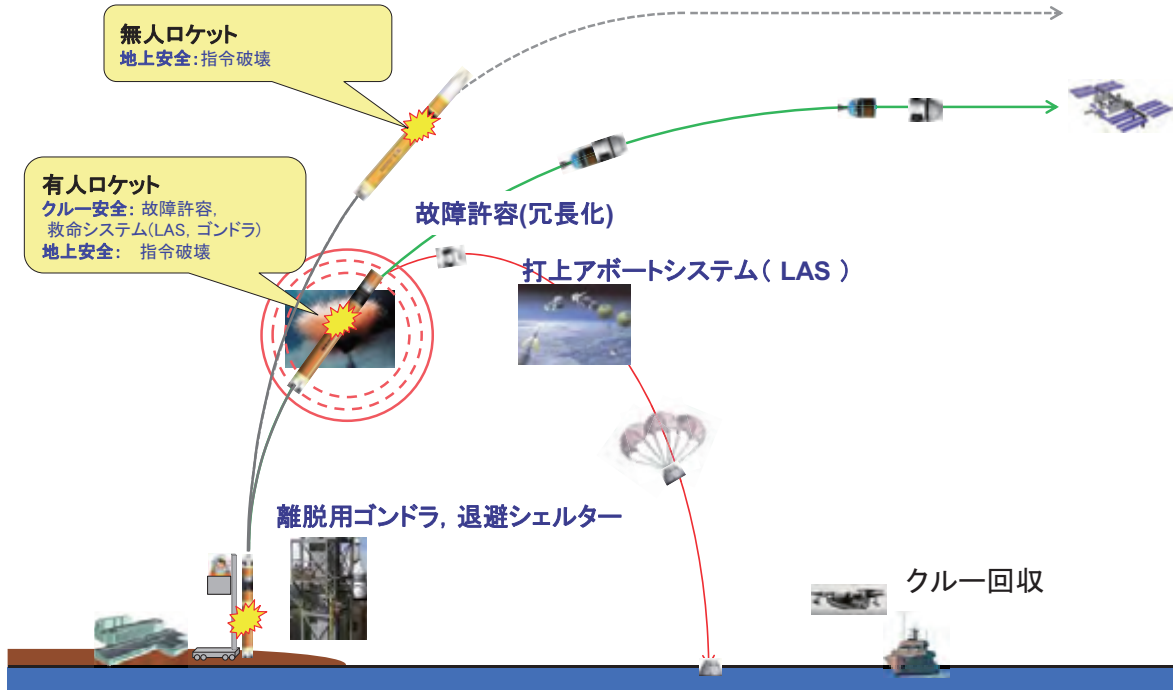
現状(STS)



Teri L Hamlin et al, "Shuttle Risk Progression: Use of the Shuttle Probabilistic Risk Assessment (PRA) to Show Reliability Growth", 2011.

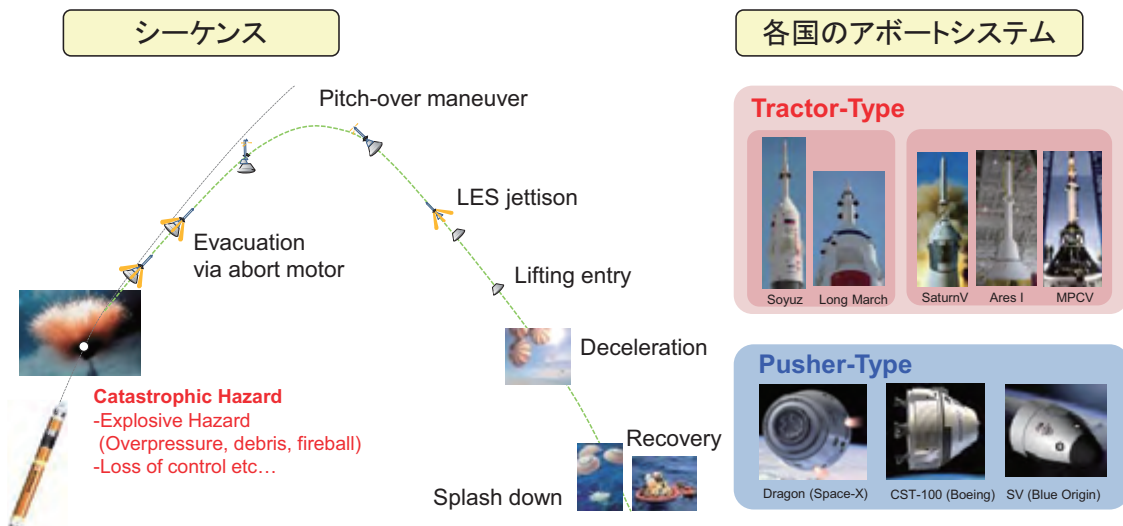


安全化機能 ー無人ロケットと有人ロケット比較



安全化機能 打上アボートシステム (1/2)

・爆発発生などの破局的なハザード発生時にクルーを安全に機体から離脱させるシステム



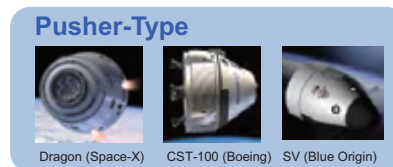
安全化機能 打上アボートシステム (2/2)



11

- ・打上アボートシステムの推力-重量比は宇宙船によって大きく異なる。
- ・爆発威力ばらつきの不確かさを小さくできれば、安全性設計を適正化し、その重量余裕を他の高信頼化・安全性向上に寄与させることができる。

LAS	Passenger	LAS+Capsule :W	Abort Motor:T	T/W	Type	Abort Motor
Apollo-LAS	3	9.4 ton	67.3 tonf	7.15	Tractor	SRM
Soyuz	3	7.6 ton	76.0 tonf	10.0	Tractor	SRM
Orion	6	13.9 ton	227 tonf	16.0	Tractor	SRM
Dragon	7	21.7 ton	54.4 tonf	2.50	Pusher	SuperDraco(hydrazine), 6.8tonf dt_ign=100ms, dt_dur = 5s
CST-100	7	13.8 ton	104 tonf	7.54	Pusher	RS-88 (LOX/Ethanol), 26tonf

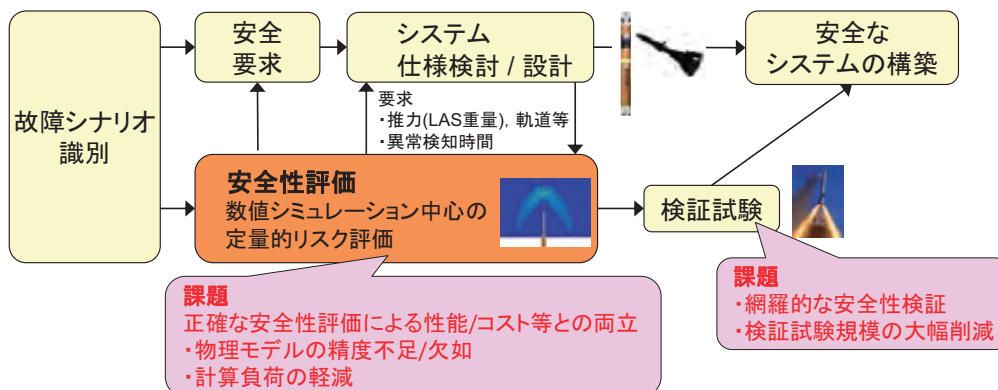


数値シミュレーションを軸とした定量的安全性評価(1/3)



12

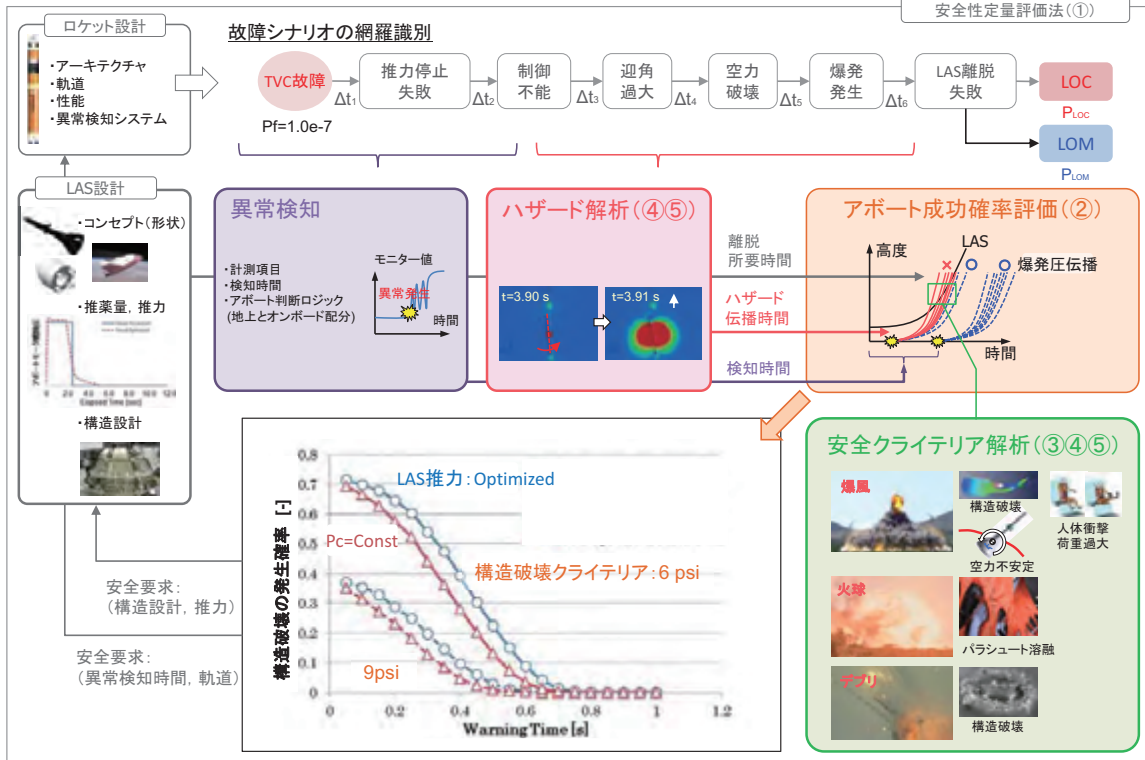
- ・上流設計検討の強化による飛躍的な安全性向上が不可欠
- ・数値シミュレーション中心の定量的リスク評価により定量的安全性評価
 - ▷ 上流での安全性設計の強化
 - ▷ 信頼性/安全設計余裕の適正化
 - ▷ 検証試験規模の削減
- ・NASAのAres計画をはじめとした有人宇宙輸送分野では、クルー喪失確率を算出する定量的リスク評価をベースとした開発を実施。
例: 上流段階から、LASの成立性確認や要求(推力/異常検知時間等)を適正評価
なお、Apollo計画では過剰な安全化設計となっていた(例: 爆発威力)。



数値シミュレーションを軸とした定量的安全性評価(2/3)



13

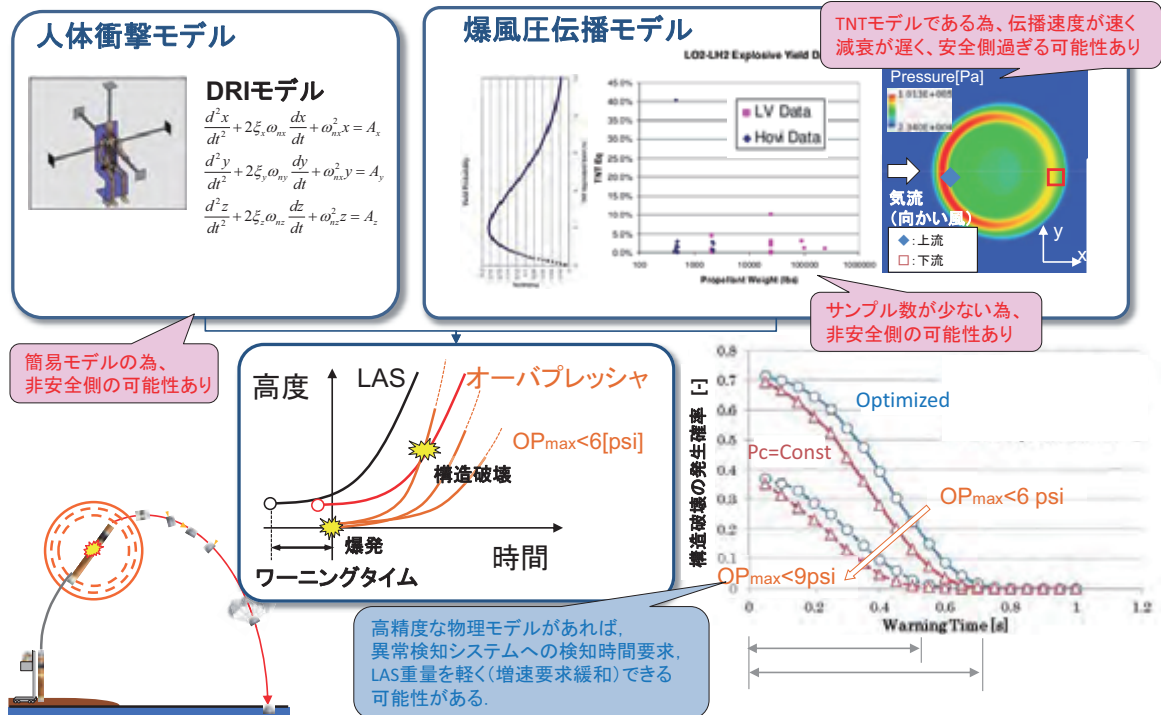


数値シミュレーションを軸とした定量的安全性評価(3/3)



14

・本技術による打上アボートシステム成立性評価の現状を示す。



ロケットの破壊・爆発(1/3)



15

- ・破壊/爆発は、高頻度かつ致命的な高リスクハザードの代表例。
- ・多くのイニシアルイベントは、破壊/爆発に直結するものが多い。
- ・複雑なハザード事象を掴む数値シミュレーションによる設計評価技術を獲得し、定量的リスク評価を軸とした高信頼化/安全性の向上が不可欠。



ロケットの破壊・爆発(2/3)



16



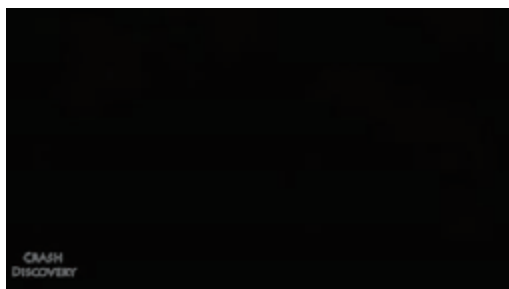
①Titan I(ミサイル)
2段式(RP1/LOX, RP1/LOX)
失敗:1960年2月5日



②Proton(ロケット)
3段式(N2O4/UDMH, N2O4/UDMH, N2O4/UDMH)
失敗:2013年 姿勢制御系ヒューマンエラー(取り付けミス)



③Titan I(ミサイル)
機体:2段式(RP1/LOX, RP1/LOX)
失敗:1959年 固定ボルトの早期着火

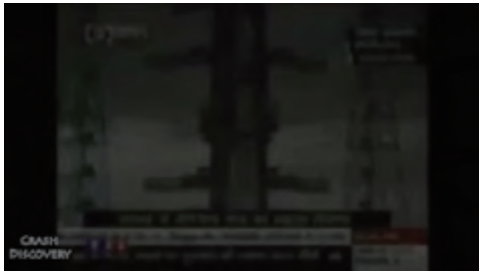


④Delta II(ロケット)
機体:2段式(RP1/LOX, 四酸化二窒素/エアロジン-50)
補助ロケット固体
失敗:1997年 固体ロケット構造破壊(指令破壊)

ロケットの破壊・爆発 (3/3)



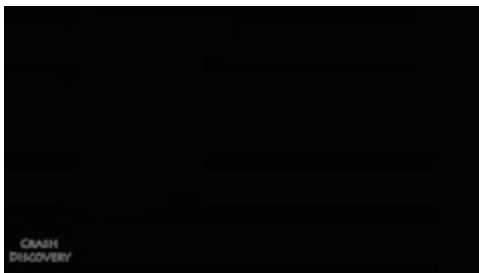
17



⑥GSLV(ロケット)
 機体: 3段式 (HTPB, N2O4/UDMH, LOX/LH2)
 失敗: 2006年 Thrust Controller



⑦Ariane5(ロケット)
 機体: 2段式 (LOX/LH2, N2O4/CH6N2) 補助ロケット固体
 失敗: 1996年 制御装置のソフトウェアエラー



⑧TitanIV(ロケット)
 機体: 2段式 (LOX/LH2, N2O4/CH6N2) 補助ロケット固体
 失敗: 1998年 固体ロケット爆発

ロケットの破壊シナリオ毎の爆発威力



18

- ・スペースシャトルの飛行安全評価用の破壊シナリオ毎の爆発威力を示す。
- ・フライト中の破壊よりも、地上落下等のパッド近傍での破壊による爆発威力が大きい。
 →連携講座での研究スコープのひとつとして地上墜落シナリオを選定した。

TABLE S-1 ESTIMATED SHUTTLE MAXIMUM CREDIBLE EXPLOSIVES EQUIVALENCIES

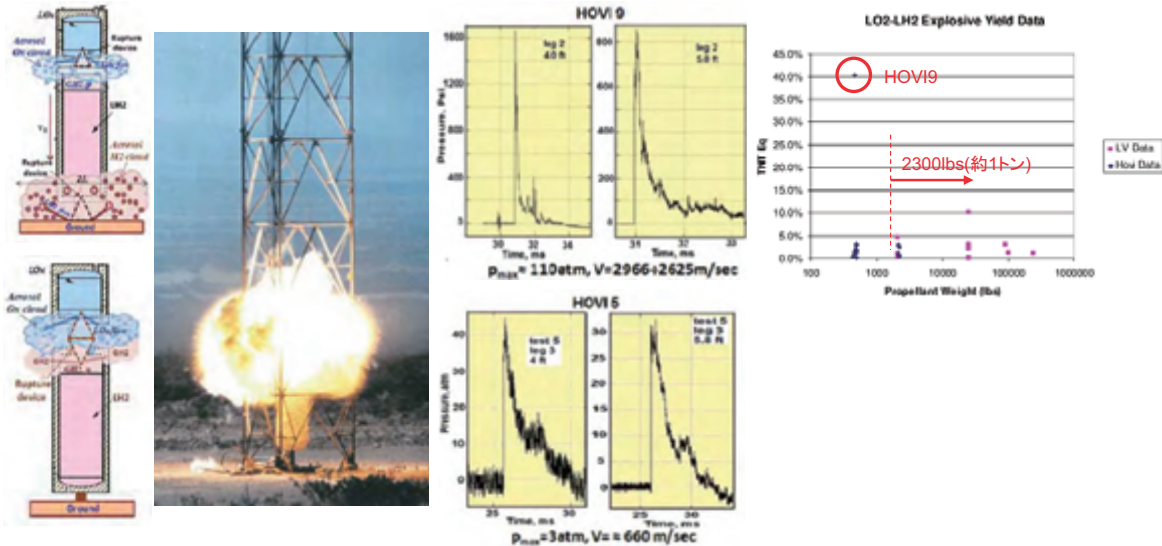
Failure Mode	External Tank	% TNT Yield (By weight)	
Destruct (Range Safety System)	Current Design - Without Orbiter	0.5	
		0.25	
	Redesign (Galileo Mission)	Not Credible	
		50*	
	Direct Fall Back on Pad	0.5	
		10	
	High Velocity Ground Impact (Intact) (W/D Destruct)	0.5	
		10	
	Over Pressurization	- LH ₂ Tank	0.5
		- LOX Tank	10
SSME (Boattail) Explosion	- Flight	0.5	
	- Ground	10	
Failover	- Both SRB's Fail to Ignite	1	
	- One SRB Fails to Ignite	38	
Tipover	- ET - LH ₂ Tank - Barrel	1	
	- Aft Dome	0.5	
TPS Failure	- LOX Tank	0.5	
	- Inter-tank	10	
SRB - Nose Cone/Alt Skirt	- Cable Tray (Destruct)	0	
	- Sep'n Motors, Thermal Curtain, Attach Ring	5-1	
SRB - TVC Hardover (Corkscrew - Destruct)	- Aft Dome	0.5	
	- Inter-tank	5-1	
SRB - Case Rupture	- Adjacent to ET	0.5	
	- Elsewhere	5	
Recontact on Separation - SRB/ET	- Separation	0.5	
	- Alt	0.5	
	- Forward (BT)	10	
	- Orbiter/ET	0.5	
Failure Mode	Solid Rocket Motors	% TNT Yield (By weight)	
Alt Segment at Impact		18	
High Velocity Ground Impact (W/D RSS)		20	
Failover - (Both SRB's Fail to Ignite)		20-50	
Tipover - (One SRB Fails to Ignite)		20-100	

Source: Briefing, Reht, 1979 (Ref. 10)
 *The yield is a function of impact velocity and can reach 150% for velocities in excess of about 500 feet per second.

スペースシャトルの爆発威力の例 Ref "Hazard Analysis of Commercial Space Transportation,"

破壊・爆発モデリング(地上落下) - タンク爆発試験

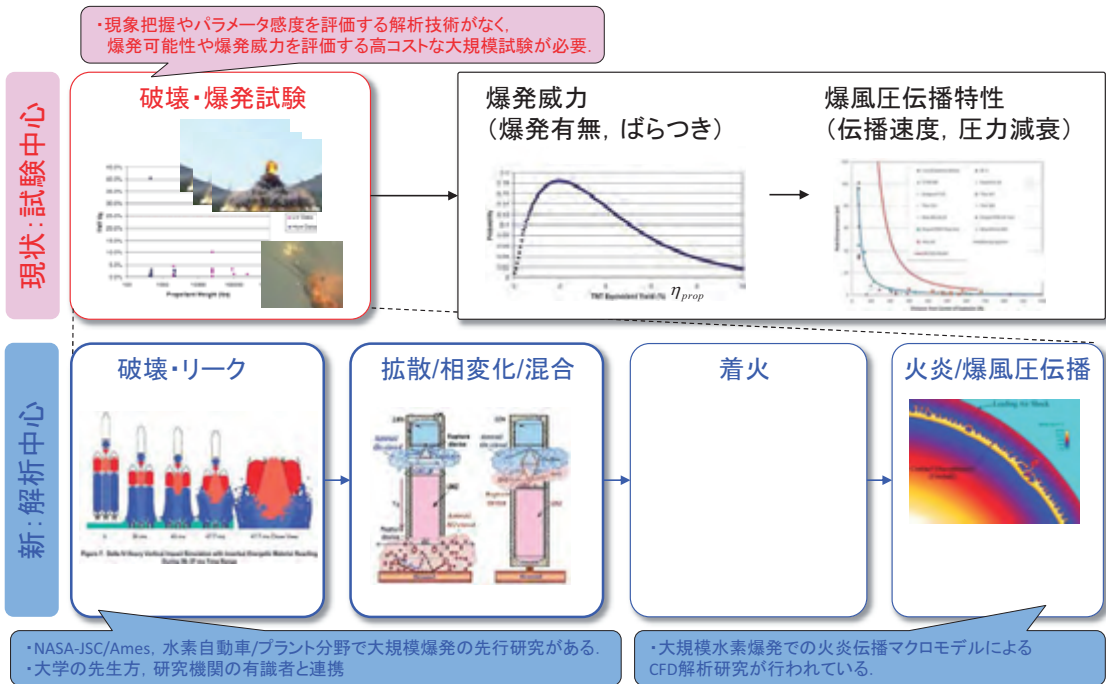
- 液体ロケットタンク落下爆発試験による爆発威力ばらつき評価の概要について示す。
- 20サンプルという少ないサンプル数にも関わらず爆発威力が大きいケースがみられる。
- 破壊/爆発プロセスの現象把握は十分にはなされていない状況である。



Reference
 [1] Viatcheslav, O. et al "Hazards Induced by Breach of Liquid Rocket Fuel Tanks: Conditions and Risks of Cryogenic Liquid Hydrogen-Oxygen Mixture Explosions", 2011.
 [2] 兵藤幸夫 "ロケット等の安全管理", 安全工学, 2004.
 [3] Claus, R., and Zampino, E., "A Proposed Approach for Estimating the Explosive Risk of Launch Vehicles," AIAA Paper 2006-1177, 44th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, NV, January, 2006.
 [4] Bunker, R., Starritt, L., Flint, Q.M., Eck, M., Taylor, J. "NASA/NASDA Joint Hydrogen Oxygen Vertical Impact (HOVI) Test Program," NASA TR-820-001R, April 2, 1998.

破壊・爆発モデリング(地上落下) - 新たな評価法イメージ

- 現状は高コストな安全性試験により爆発威力ばらつきを評価。
- 破壊/爆発モデルを獲得し、効率的な安全性評価法を獲得したい。



・NASA-JSC/Ames, 水素自動車/プラント分野で大規模爆発の先行研究がある。
 ・大学の先生方、研究機関の有識者と連携

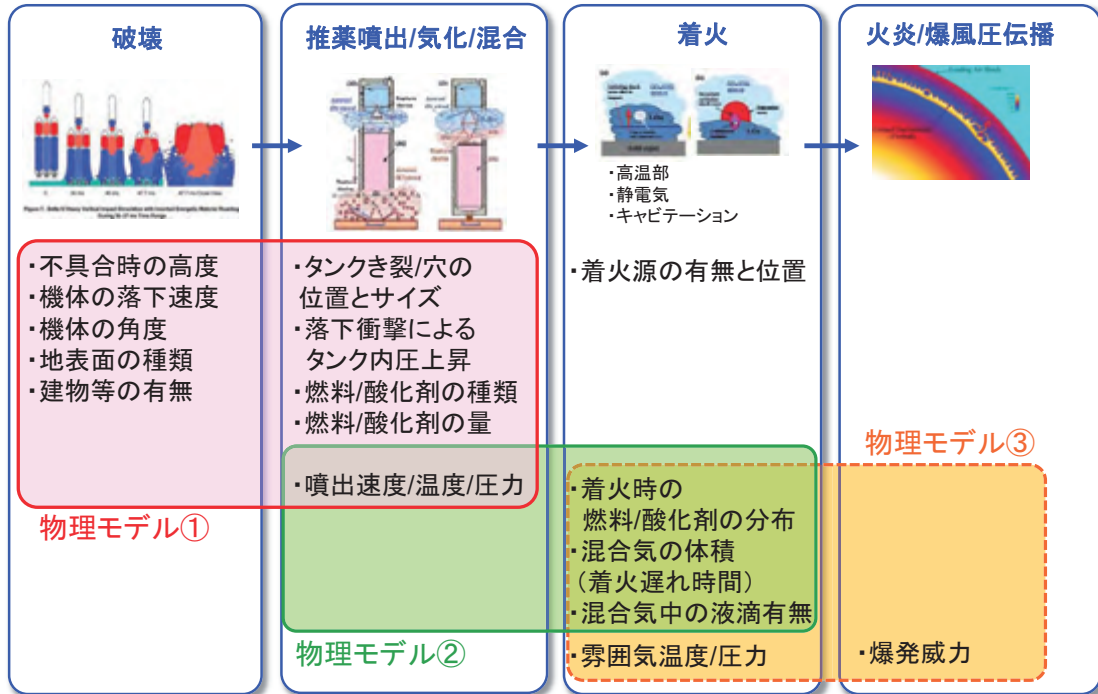
・大規模水素爆発での火炎伝播マクロモデルによるCFD解析研究が行われている。

破壊・爆発モデリング(地上落下) –メカニズム



21

・液体ロケットの破壊・爆発プロセスの影響因子を以下に示す。

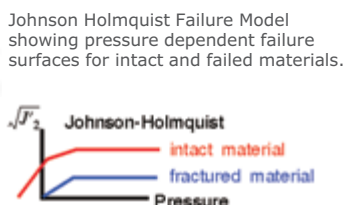
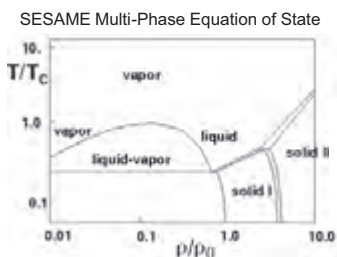


破壊・爆発モデリング(地上落下) – 先行研究調査

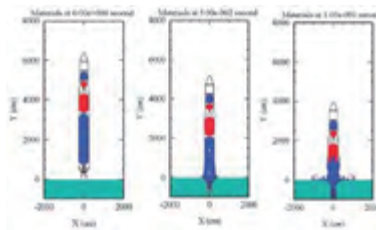


22

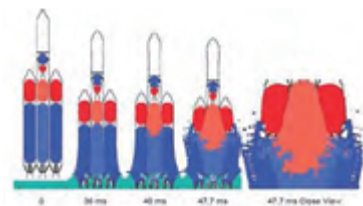
- ・評価対象: ロケット破壊様相, 燃料と酸化剤の噴出, 混合
- ・複数のコア機体をクラスタリング化した Delta IV Heavy形態と, Delta IV Medium形態との爆発威力の比較解析を実施。
- ・Sandia National LabのCTHコードを用いて解析。
 - Multi-material, Eulerian, Large deformation, Strong shock wave, Solid mechanics Code
 - 3D rectangular/ 2D rectangular, cylindrical /1D rectilinear, cylindrical, spherical meshes (with AMR capability)
 - SESAME tabular and analytic equations of state model the nonlinear behavior of materials in the high-pressure regime. It can model solid, liquid, vapor, liquid-vapor, solid-liquid and solid-solid phase changes.
 - An elastic-perfectly plastic model with thermal softening is available. The Johnson-Cook, Zerilli Armstrong, and Steinburg-Guinan viscoplasticity models are available. In addition, the Johnson Holmquist brittle strength and failure model is available for modeling brittle materials such as ceramic or concrete.



Delta IV Medium形態の解析 (LOXとLH2の混合箇所と着火遅れの評価)



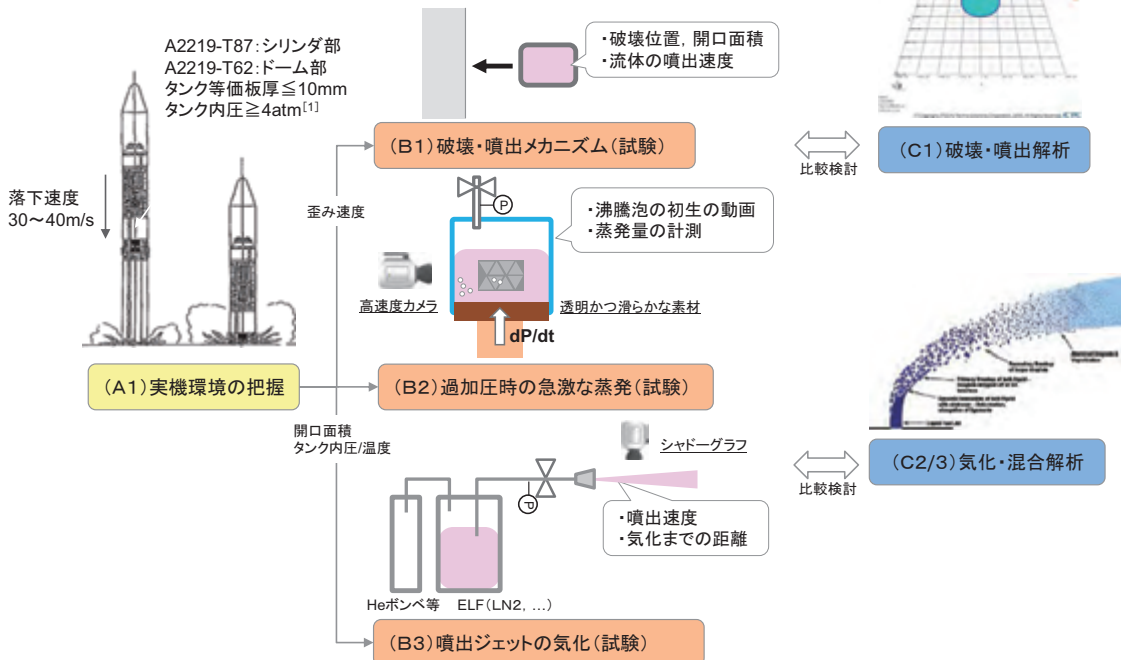
Delta IV Heavy形態の解析 (爆発した中心コアの他コアへの影響伝播)



[1] Lambert, R. R., "Liquid Propellant Blast Yields For Delta IV Heavy Vehicles," 34th Department of Defense Explosives Safety Board Seminar, National Technical Information Service, ADA532286, July 2010.

破壊・爆発モデリング(地上落下)

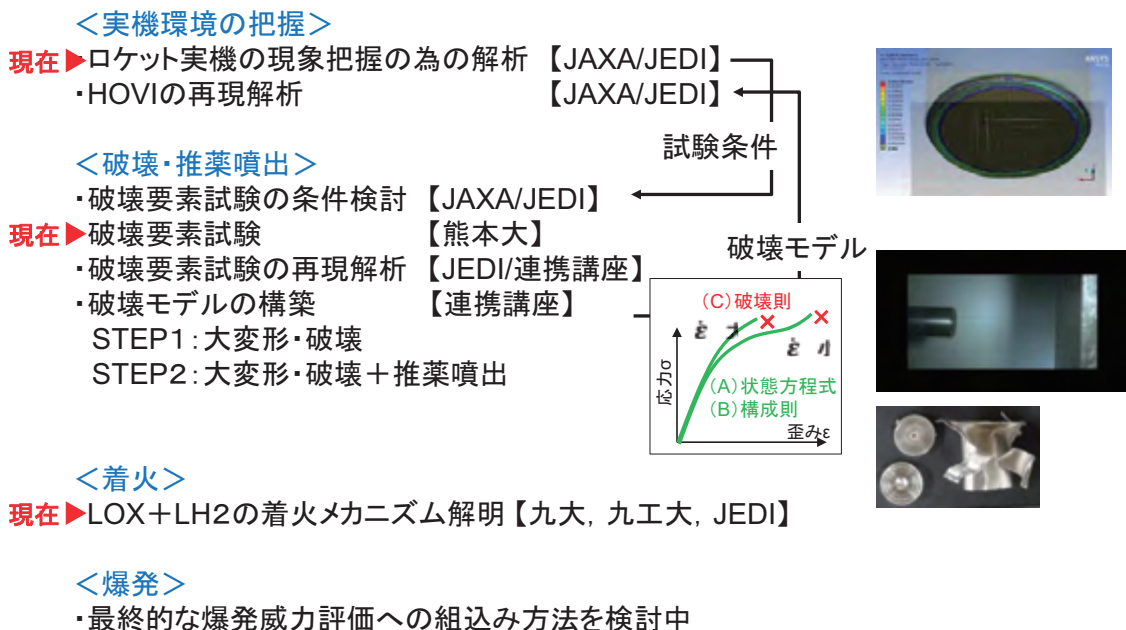
・地上落下時の破壊/推薬噴出に対する研究の全体イメージを示す。



[1] 富田信之, 前田則一, 長谷川 恵一, 幸節雄二, "ロケット工学基礎講義," 2011.

破壊・爆発モデリング(地上落下) - 研究ステップ

ゴール: 液体ロケットタンク落下試験(HOVI)のシミュレーション技術の獲得。

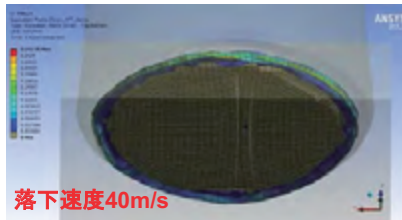
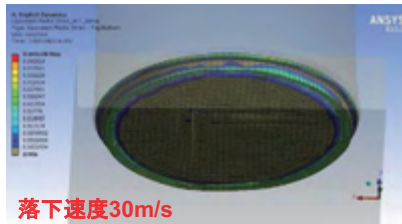
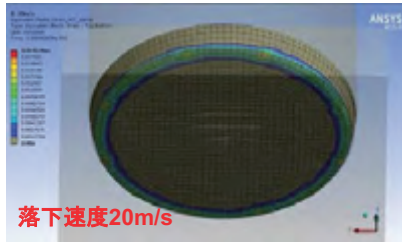


破壊・爆発モデリング(地上落下) - 実機環境の把握

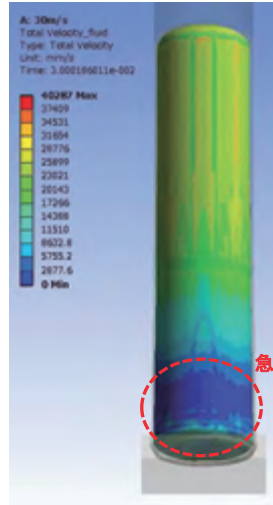


25

相当塑性歪み



タンク内推進薬の速度



- ・タンク底部側での座屈変形となることを確認。
→要素試験結果も同様の傾向となった。
- ・タンク構造部の地面への衝突により急激に内圧が上昇することを確認。

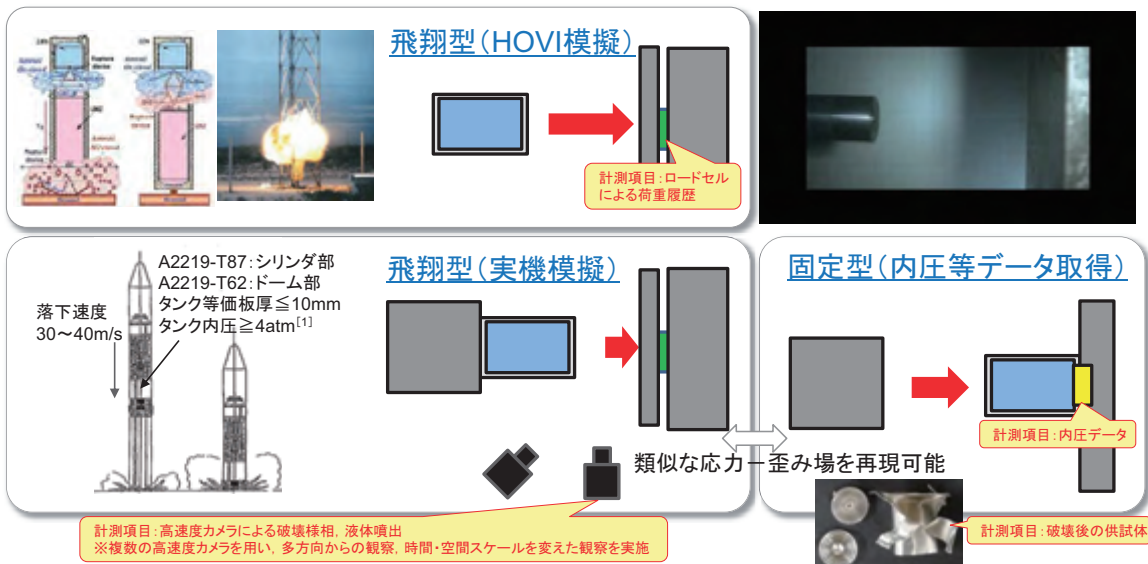
破壊・爆発モデリング(地上落下) - 要素試験概要



26

【試験条件】

- ・破壊/爆発試験設備を有する熊本大学との共同研究を行う方針。
- ・推薬を模した液体入りのアルミ合金缶を用い衝突実験を行う。
- ・破壊様相に対する影響をみる因子は以下の通り。
 (1) 供試体のサイズ, (2) 液体の有無, (3) 破壊シナリオ

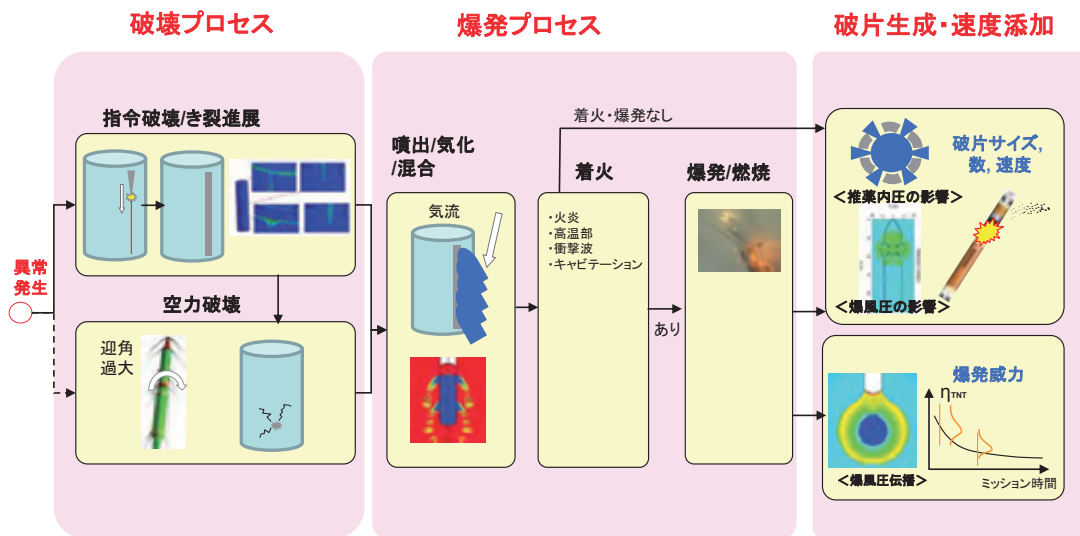


無人ロケットの安全性評価の高精度化

破壊・爆発モデリング(指令破壊) —メカニズム



- ・LSCによるスリット生成後のき裂進展の可能性の研究を行っている.
- ・現状は, 様々な地上試験結果を元に, 十分なマージンを考慮した安全性評価を行っている.



破壊・爆発モデリング(指令破壊) –メカニズム



29

【対象とする破壊シナリオ】

- ① 指令破壊時の内圧及び軸荷重によるき裂進展
- ② 外部爆発の爆風圧による破壊

【モデル毎の影響因子】

破壊モデル (状態方程式, 構成則, 破壊則)

LSCによる加工硬化 溶接部の材料特性

LSC溶断による変質 補強構造の影響

材料の温度依存性

荷重モデル

自重, 空力荷重

内圧
(突沸等による影響)

SRB-A推力

定常的な荷重

爆発後0ms

衝撃荷重

実機の解析 (指令破壊等)

高歪み速度下での大変形
(座屈等を含む)

き裂進展

破壊・爆発モデリング(指令破壊) –新しい評価法イメージ



30

・現在検討中の指令破壊後のタンク破片数の評価法の全体イメージを示す。

マクロモデル(Shell)
・マクロな応力-歪み場の評価

サブモデル(Solid)
・応力拡大係数, 応力集中の評価
(き裂進展の可能性評価)

材料試験・要素試験

- ・破壊靱性値Kc等の取得
- ・リブによるき裂進展抑制効果の確認

初期き裂のIsogridパターンとの位置関係の不確かさをどのように扱うか？

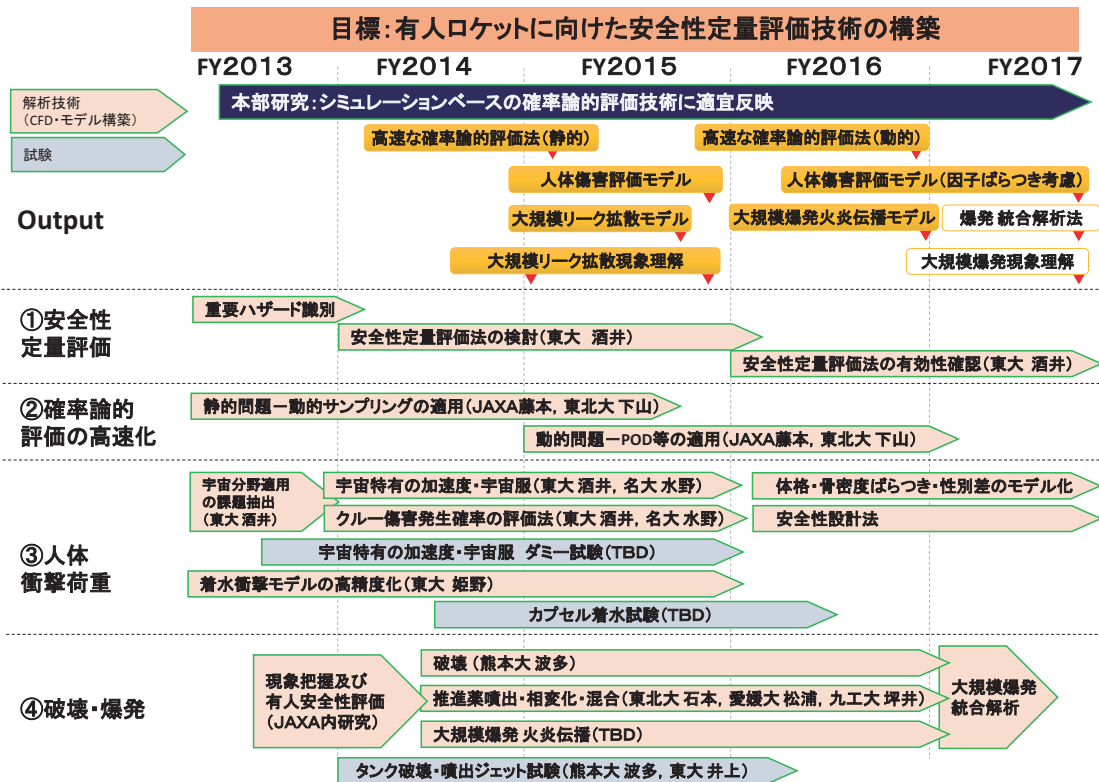
き裂進展: YES

リブによるき裂進展抑制効果をどのようにモデル化するか？

き裂進展モデル

JAXA社会連携講座における研究テーマ

連携講座ロードマップ(安全性)



まとめ



33

- ▷ JAXAにおけるシミュレーション技術を活用した安全性評価法の改良である
有人ロケットの定量的クレー安全性評価法の構築,
ロケットの飛行安全評価の高精度化の取組みについて紹介した.

- ▷ その実現のためには, 破壊・爆発事象をはじめとしたハザードシミュレーション技術の確立が不可欠であり, JAXA社会連携講座において現象把握, 及び物理数学モデリング研究を進めている.

- ▷ とくに破壊・爆発シミュレーション技術の獲得は, 水素自動車, 燃料電池, 大量液体水素貯蔵, 及び核廃棄物の輸送の分野等においても共通課題であり, 連携講座におけるロケットタンク破壊の研究成果を積極的に外部発信していく方針である.