

日本原子力学会 2016年秋の大会  
計算科学技術部会セッション  
「外部ハザード評価のための数値解析」

(3) 航空機衝突に対する  
原子力発電所施設の耐衝撃設計

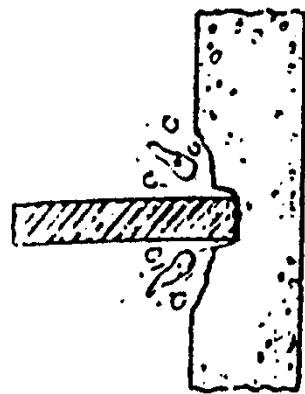
2016年9月8日

日本原子力研究開発機構  
安全研究センター 構造健全性評価研究グループ

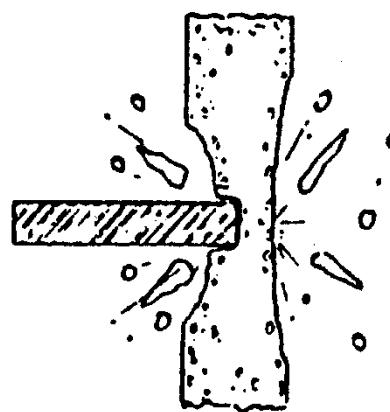
坪田 張二

- (1) 航空機衝突に関する既往研究の概要
- (2)航空機衝突に関する最近の研究動向
- (3)まとめおよび今後の課題

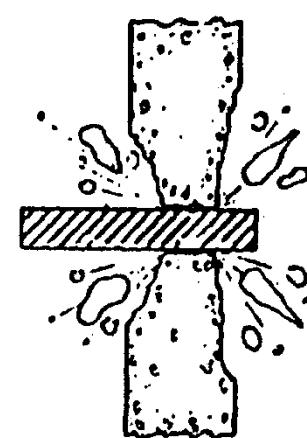
**局部損傷**  
(応力波応答)



貫入

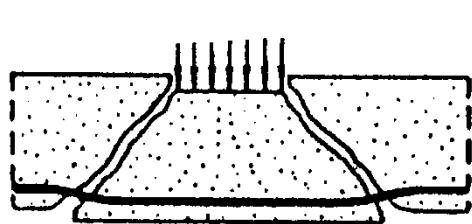


裏面剥離

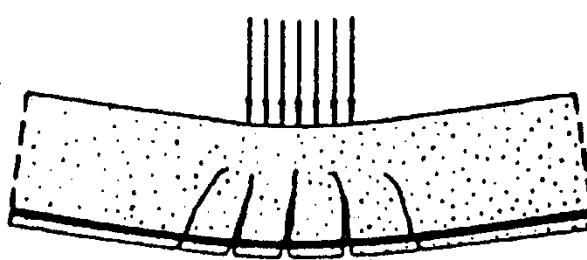


貫通

**全体損傷**  
(弾塑性応答)



パンチングシア破壊



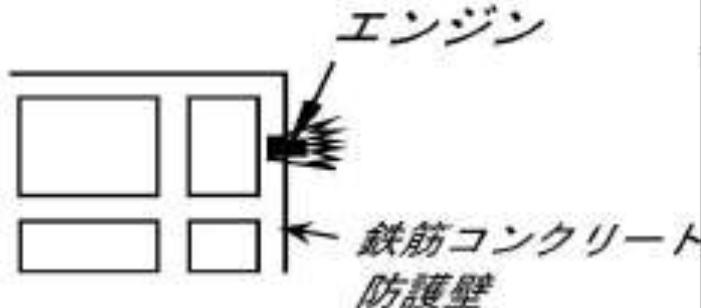
曲げ破壊

## 設計条件の設定

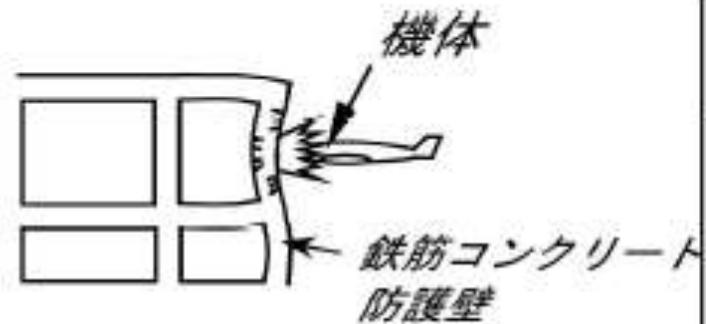
- 想定航空機の種類
- 衝突速度
- 衝突角度
- 衝突位置



機体のうち比較的硬い  
エンジンの貫通防止設計



機体全体の衝撃荷重による屋根  
及び壁の全体的破壊の防止設計



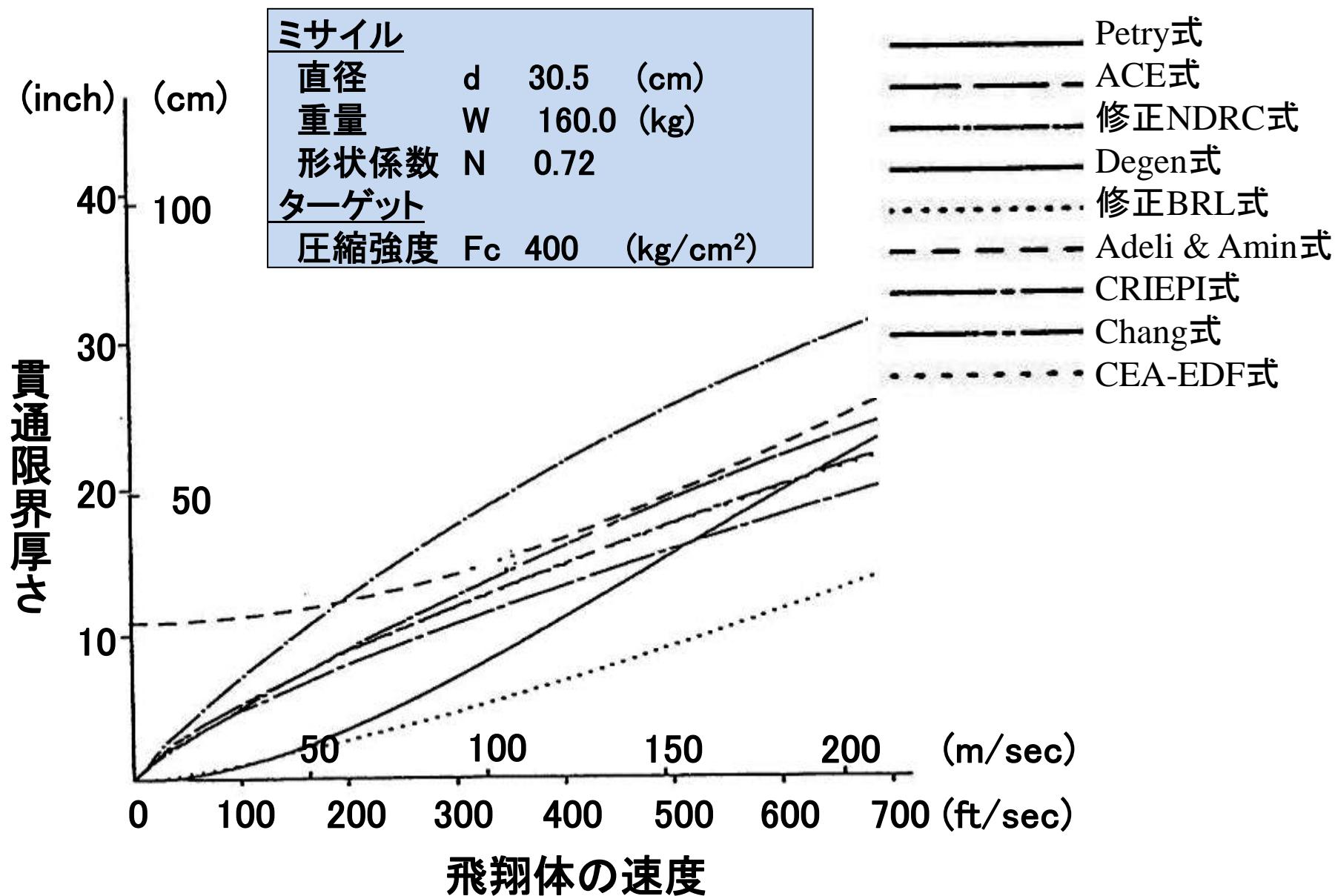
## 航空機衝突に関する既往研究の概要

(F4-Phantom戦闘機を対象とした既往研究)

## 飛翔体の局部損傷評価に関する既往研究と実験目的

- ◆ 主に軍事研究をベースにした貫通限界厚、裏面剥離限界厚の評価式(実験式)
- ◆ 速度、飛翔体重量、直径、先端形状、コンクリート強度等をパラメータとした実験式
- ◆ 主に対象は剛飛翔体
- ◆ 航空機のエンジンは剛飛翔体ではなく、衝突時に変形する柔飛翔体
- ◆ 柔飛翔体に対する貫通限界厚、裏面剥離限界厚の評価式(実験式)はない
- ◆ エンジンを対象とした局部損傷評価式の確立を目的として小型・中型・大型実験を計画・実施

## 既往研究: 貫通限界厚さ評価式





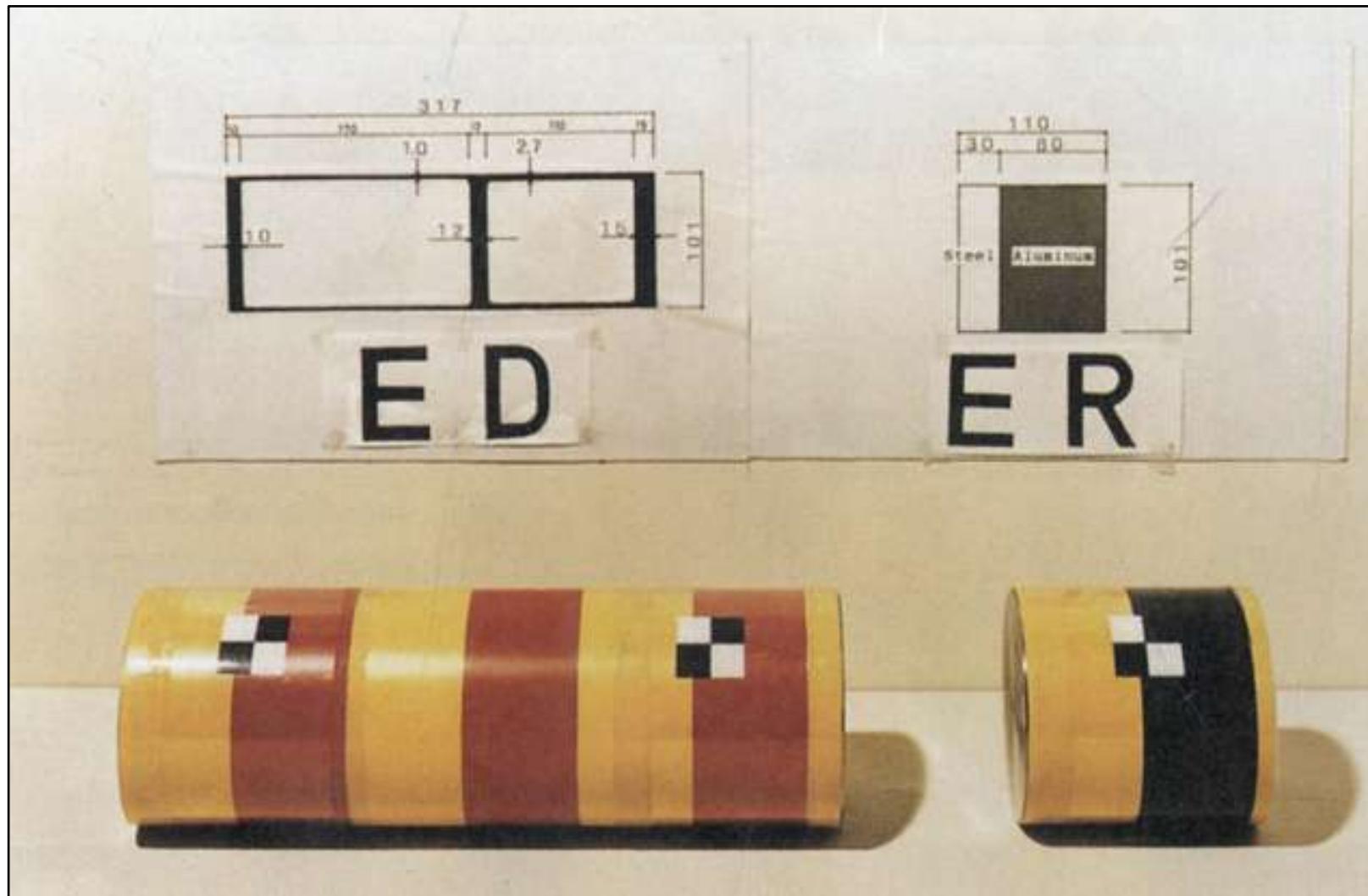
# 柔飛翔体(航空機エンジン)の小型衝撃実験

## 小型衝撃実験 (1987年：鹿島技術研究所で実施)

- エンジンと等価な剛飛翔体の貫通限界厚さ、裏面剥離限界厚さの既往実験式との整合性の検討
- エンジンを模擬した柔飛翔体の貫通限界厚さ、裏面剥離限界厚さを実験により評価し、評価式を提案

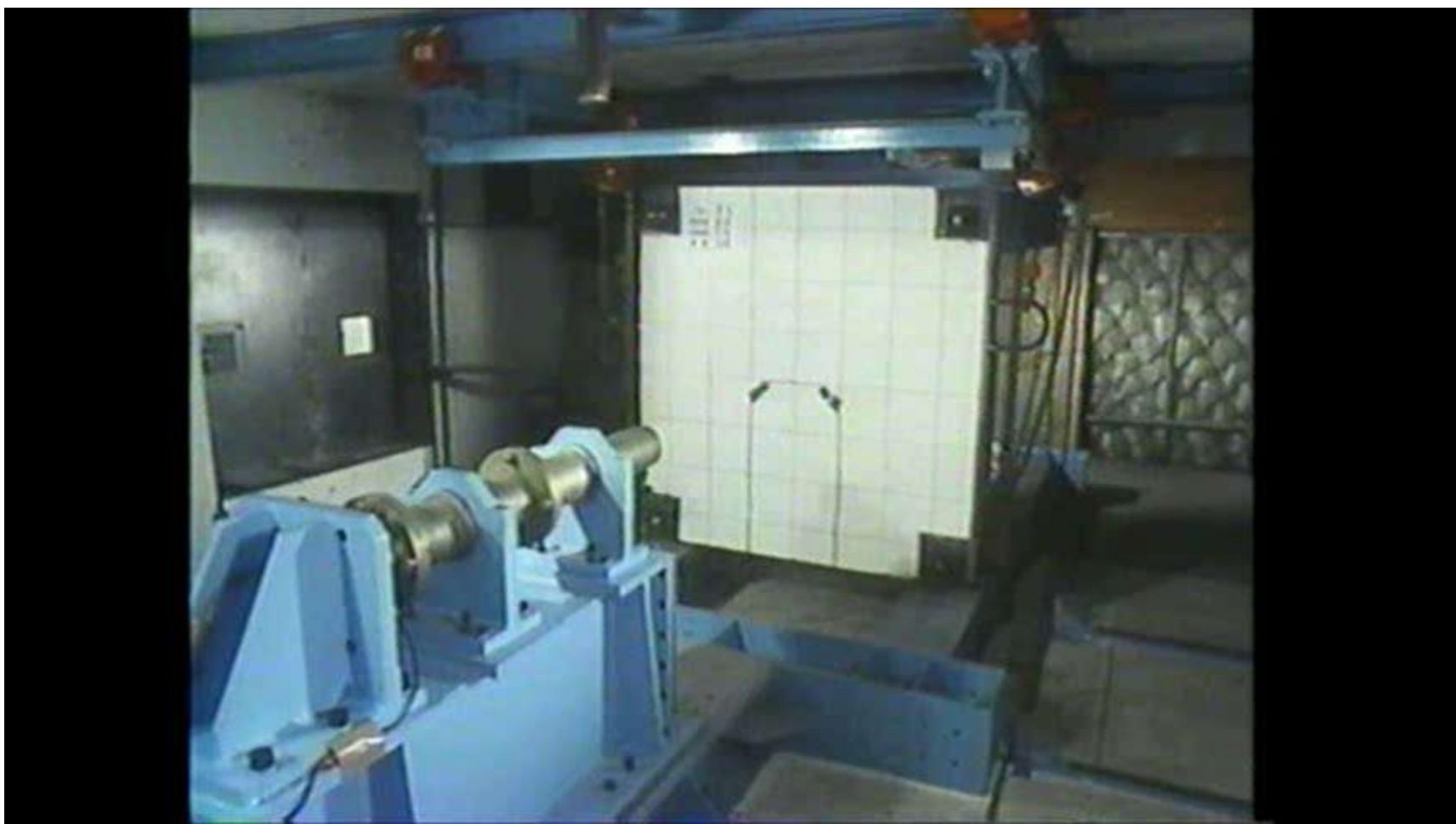


# 小型衝撃実験で用いた飛翔体



直径: 305mm

重量: 160.0kg



## ■ 中型衝撃実験実験(電中研が実施)

縮尺: 1/7.5

試験体: 4m × 4m

飛翔体重量: 100kgf

版厚: 40cm ~ 100cm

飛翔体直径: 300mm

衝突速度: 100, 150, 215, 250m/s

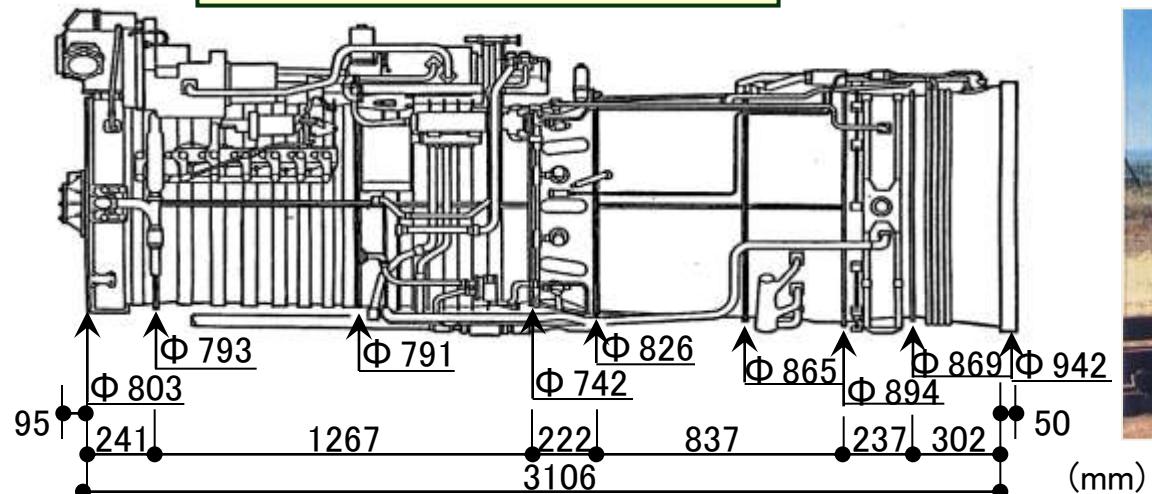


空型実験で用いた  
飛翔体モデル

# 柔飛翔体(航空機エンジン)の大型実大実験

## リアルモデル

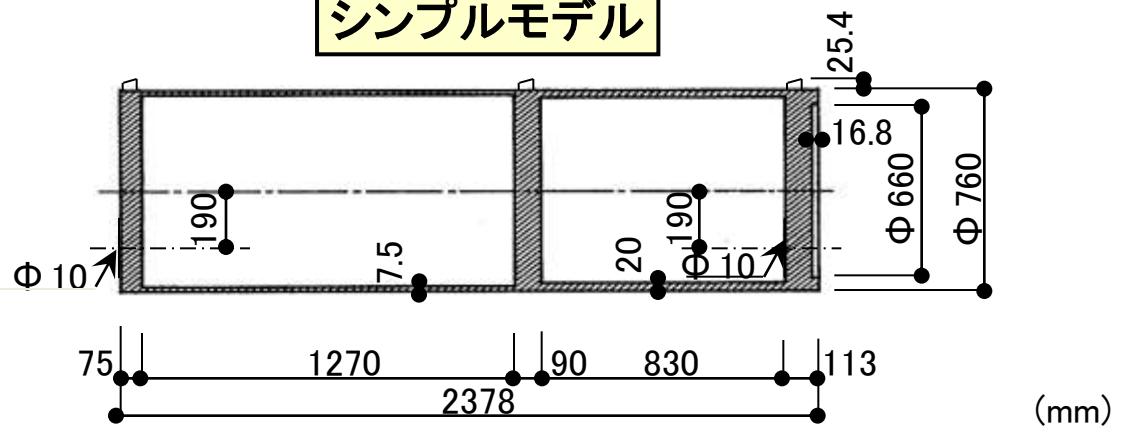
## F4-Phantom搭載実物エンジン



## 大型実験で用いた飛翔体



## シンプルモデル



試験体: 7.0m × 7.0m

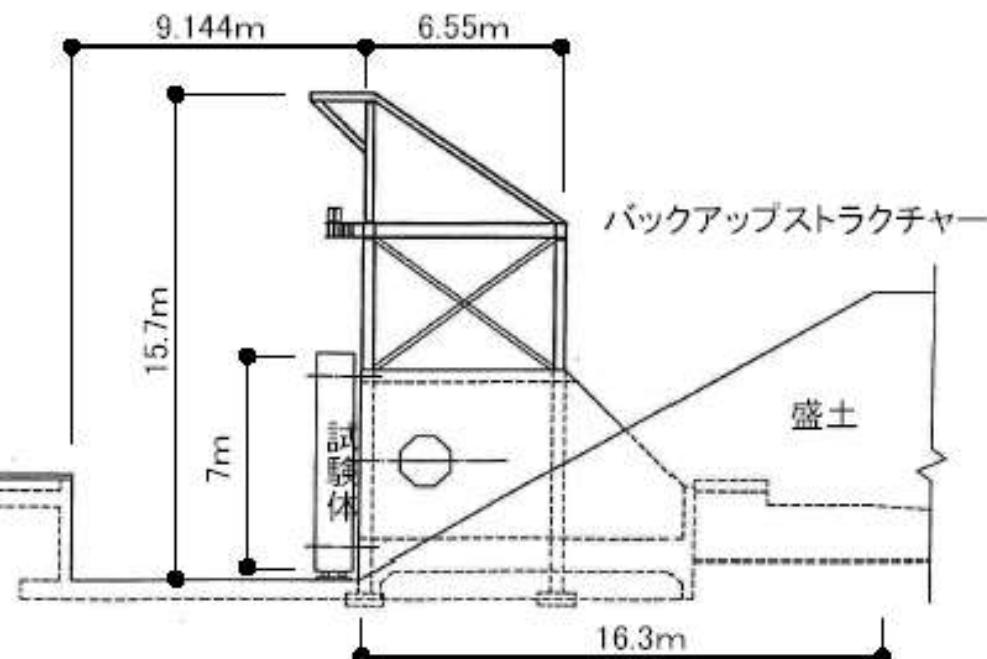
厚さ: 900~1,600mm 6体

飛翔体重量: 1.500kg

飛翔体直径: 760mm

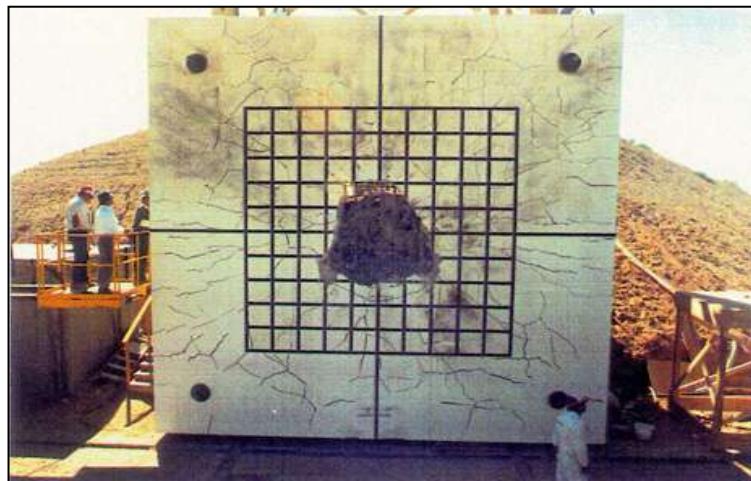
飛翔体衝突速度: 210m/s

飛来物及びロケット





## No.1試験体 (90cm厚)の衝撃実験結果



前面



上面

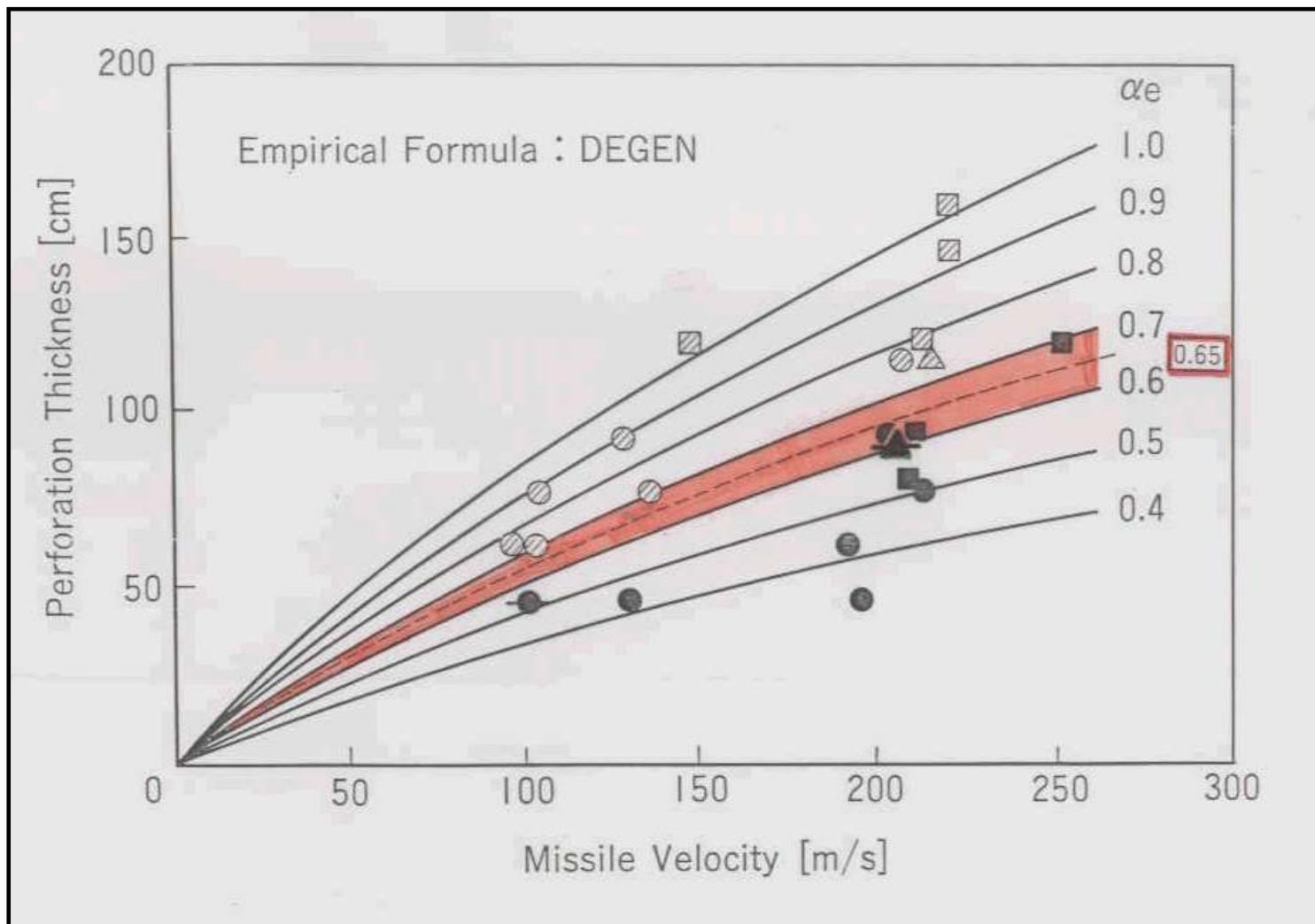


裏面

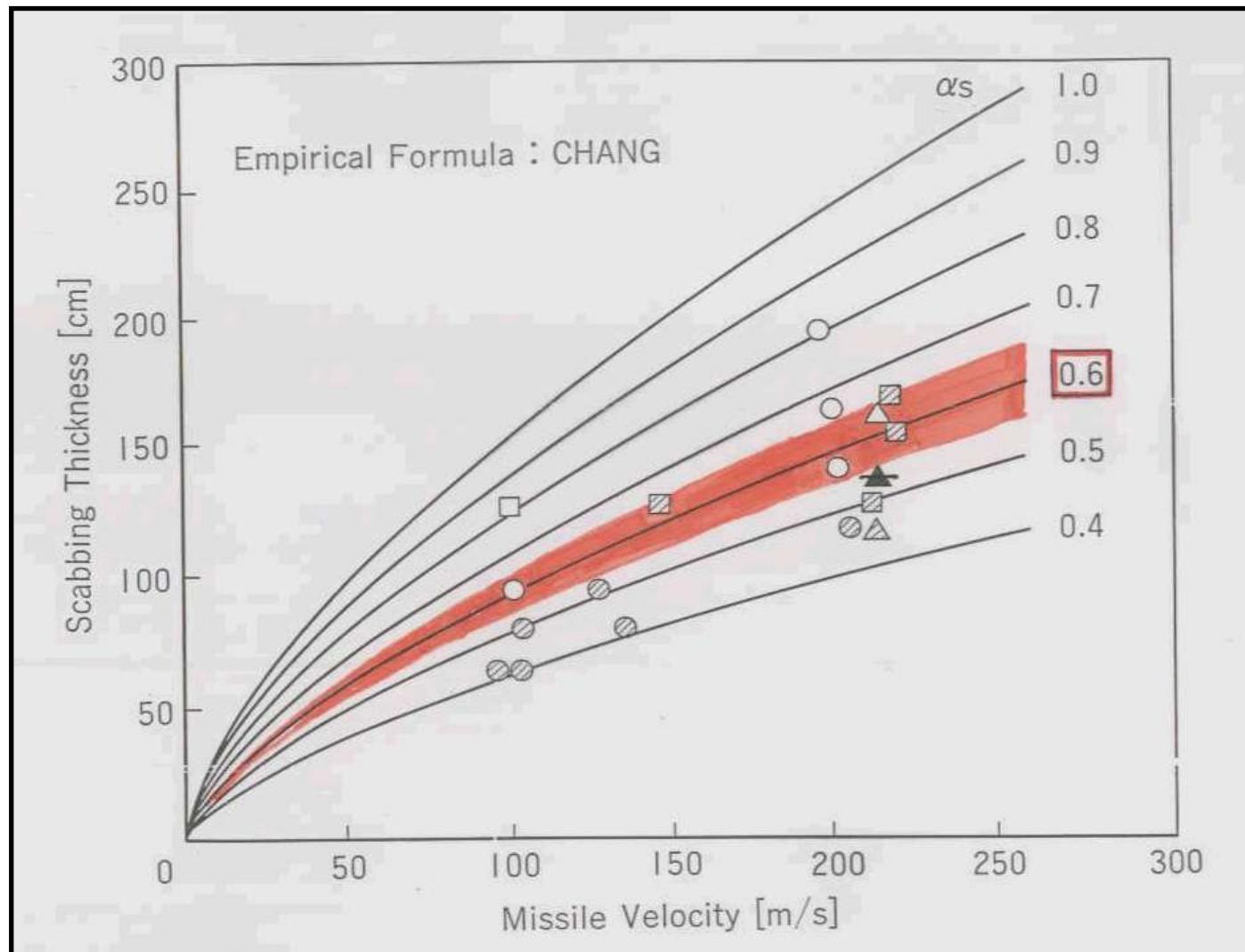


エンジン

## 柔飛来物 (航空機エンジン) による局部損傷低減率の最終確認 (1) 貫通限界厚さ



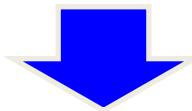
柔飛来物 (航空機エンジン) による局部損傷低減率の最終確認  
(2) 裏面剥離限界厚さ



## 航空機エンジンによる局部損傷評価式の提案

◆貫通限界厚さ= $\alpha p \times$ (Degen式で算定される限界厚さ)  
ただし、 $\alpha p=0.65$

◆裏面剥離限界厚さ= $\alpha s \times$ (Chang式で算定される限界厚さ)  
ただし、 $\alpha s=0.60$



米国 NEI 07-13 Rev.8P

“Methodology for Performing Aircraft Impact Assessments for New Plant Design (April,2011)”

「Local Damage」の算定評価式として採用

- 航空機衝突による衝撃力を実大実験により計測・評価
- 実験は米国サンディア国立研究所に委託



## RIERA Model

J.D.RIERA, “On the Stress Analysis of Structures Subjected to Aircraft Impact Forces”, Nuclear Engineering and Design 8 (1968)

剛な壁に航空機が衝突した時の衝撃荷重：

$$P(t) = P_b[x(t)] + \mu[x(t)]v^2(t)$$

$$x(t) = \int_0^t v(\xi) d\xi \quad : \text{Noseからの距離}$$

$P_b[x(t)]$  : 機体をcrushあるいは変形させるに必要な力

$\mu[x(t)]$  : 単位長さ当たりの機体の質量

$v(t)$  : 機体のuncrushed部分の速度

$$F = \frac{d}{dt} [MV]$$

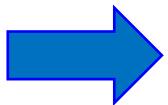
$M$ : 物体の質量  $V$ : 速度  
 $MV$ : 運動量 (Momentum)  
 $F$ : 衝撃力 (Force)

$$F = M \frac{dV}{dt} + V \frac{dM}{dt}.$$

$$F = M \cdot \alpha + dM/dx \cdot dx/dt \cdot V$$

ただし

$$= P_c[x(t)] + \mu[x(t)] \cdot V(t)^2$$



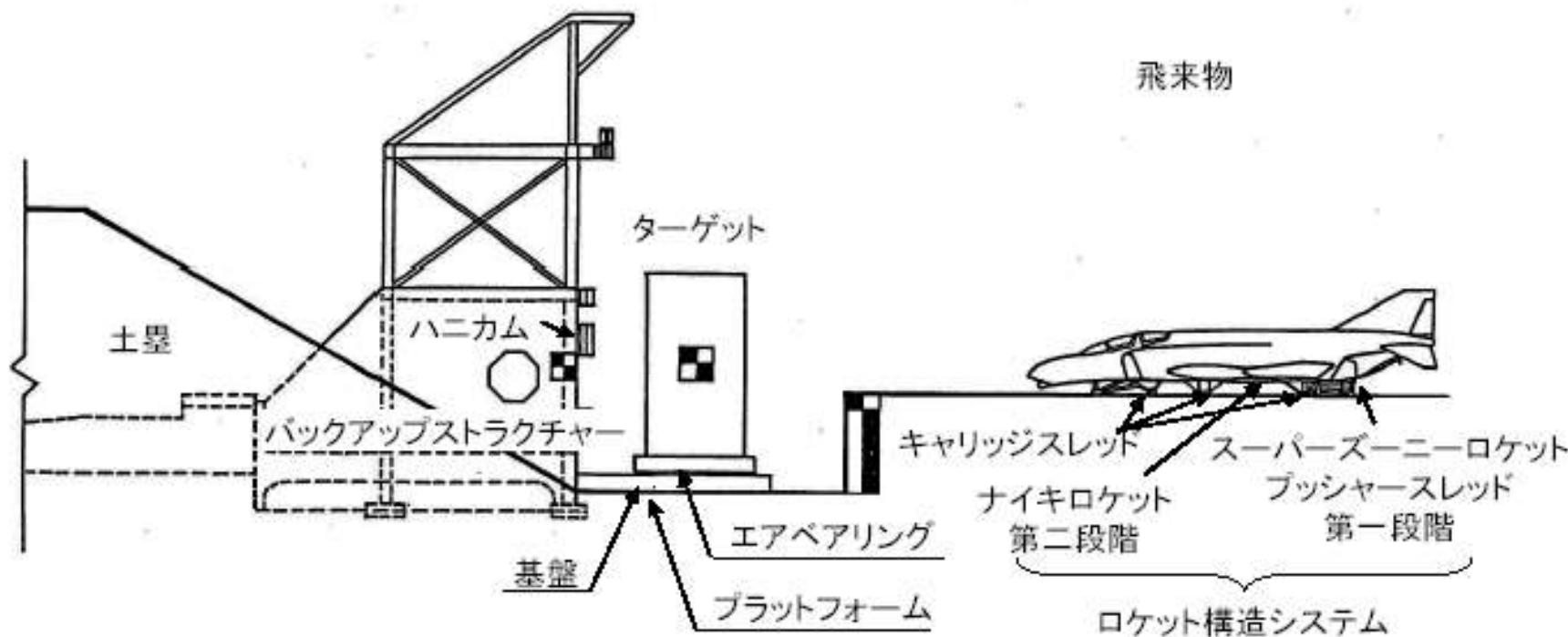
RIERA Model

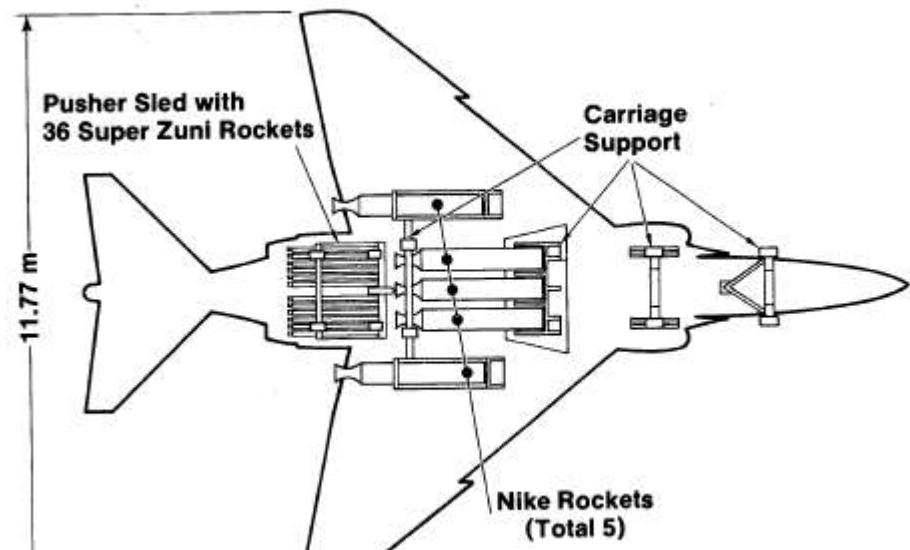
$P_c[x(t)]$ : 機体をcrushあるいは変形させるに必要な力

$\mu[x(t)]$ : 単位長さ当たりの機体の質量

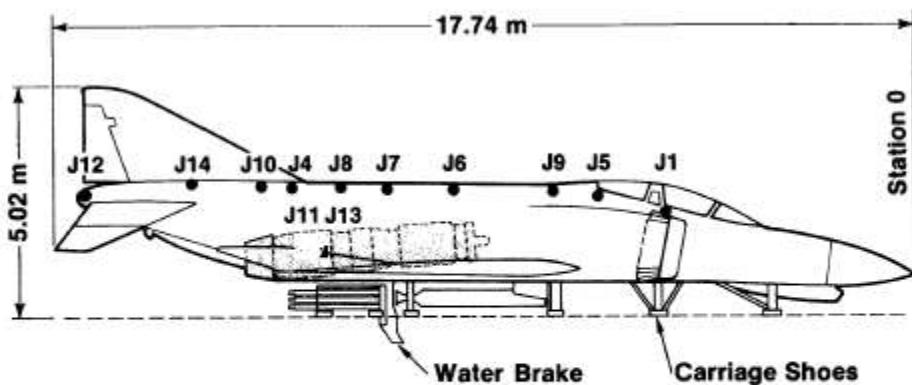
$V(t)$ : 機体のuncrushed 部分の速度

## 実験方法





実験用 Phantom 推進用ロケット



- Accelerometers for Fuselage (10 total)
- Accelerometers for Engine (1 on each engine)

実験用 Phantom に取り付けた加速度計

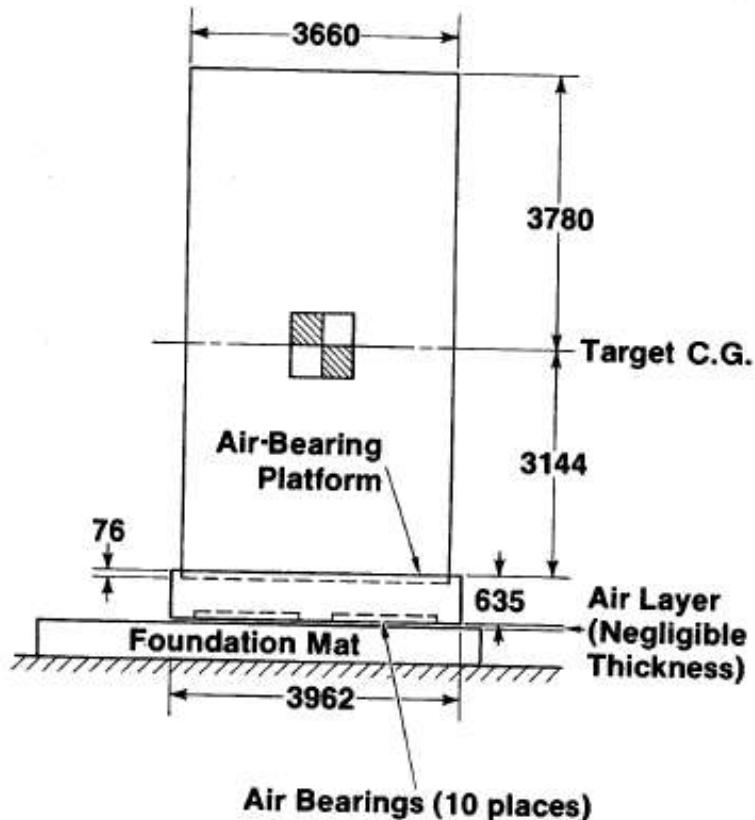
## 実験条件

飛来物重量: 19.0ton  
内訳

機体重量: 12.7ton  
燃料(水): 4.8ton  
ロケット等: 1.5ton

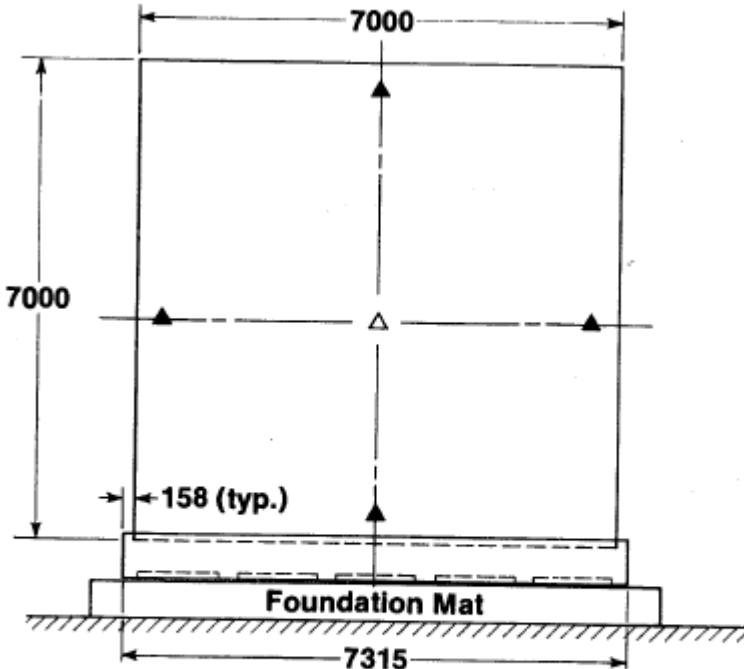
衝突速度: 215m/sec

## Target(RC版)の構造と計測器



寸法:  $7.0 \times 7.0 \times 3.66\text{m}$

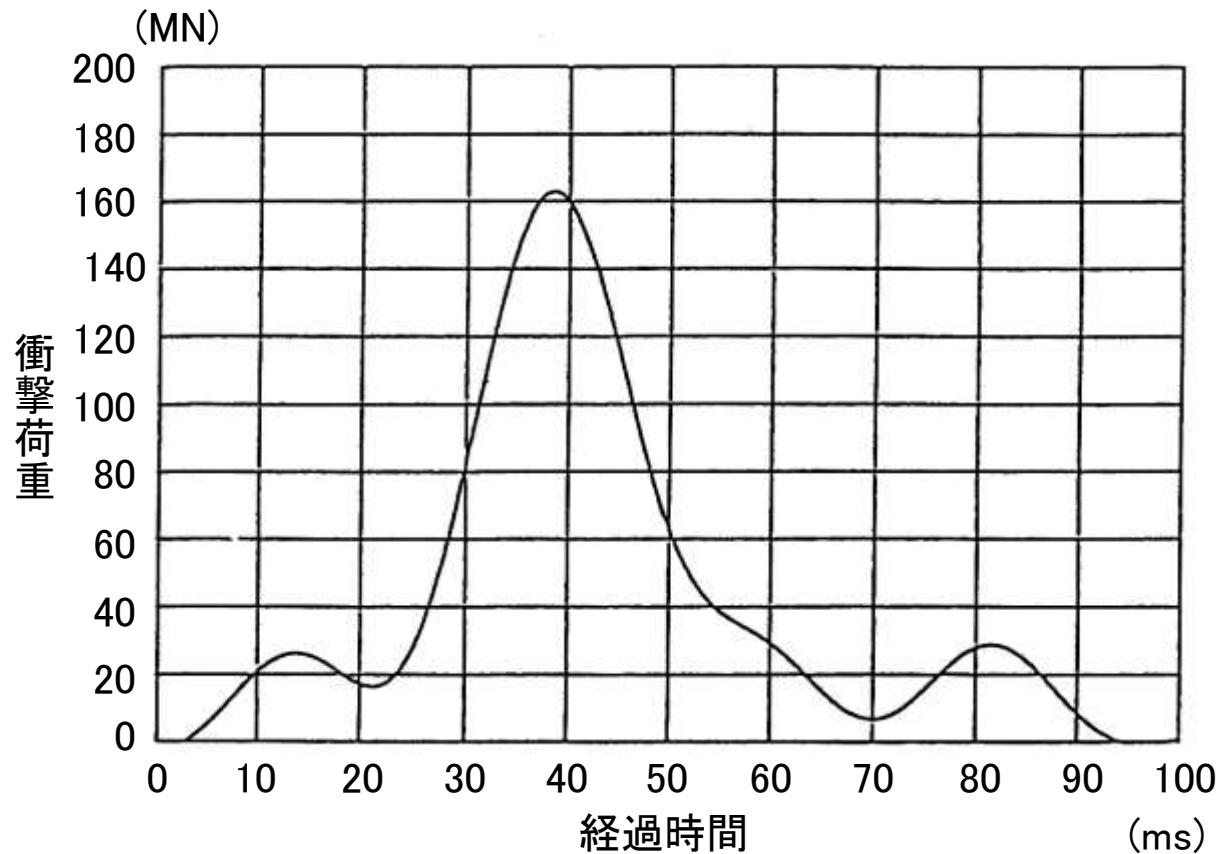
総重量: 469ton



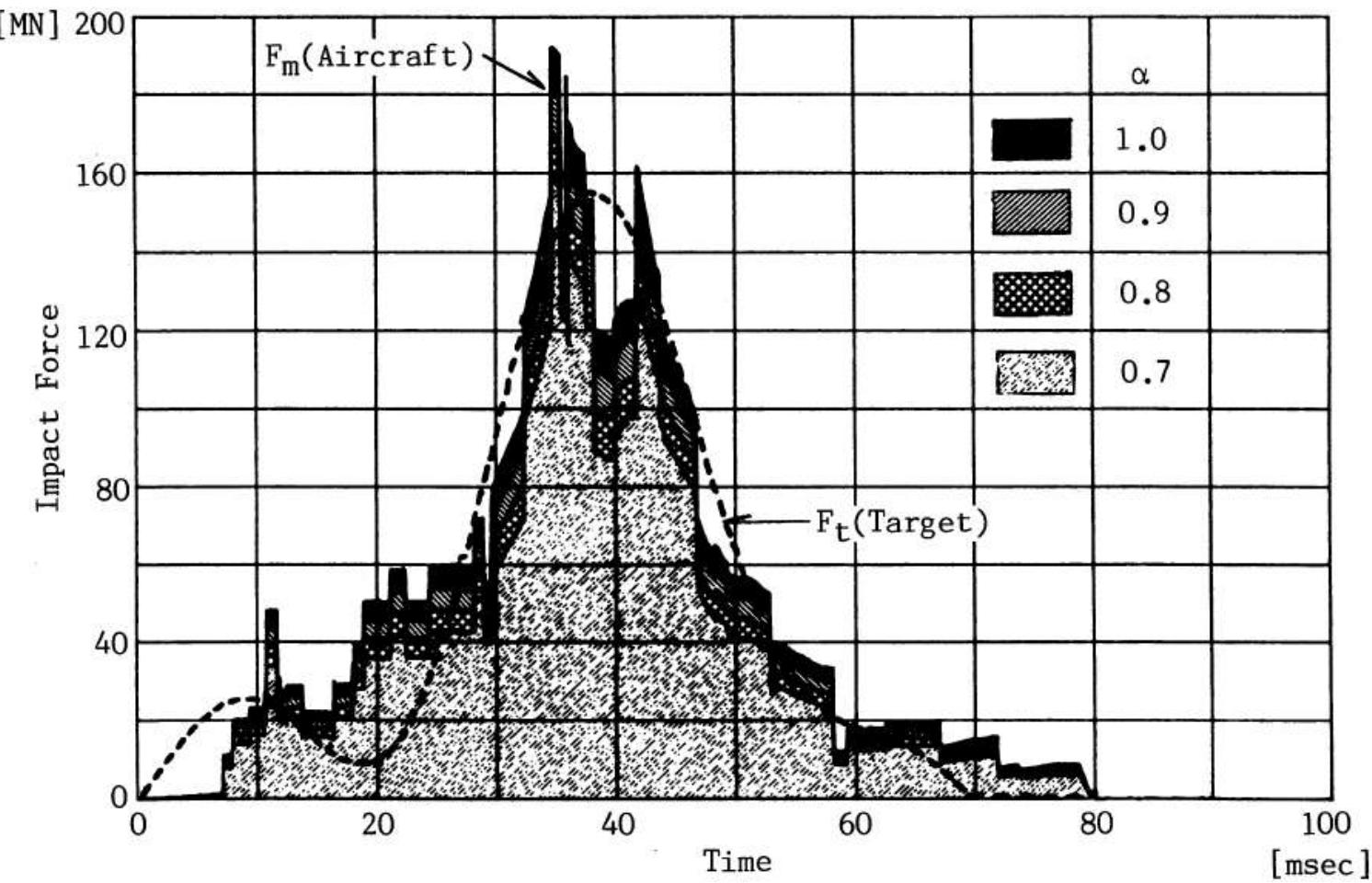
▲ Accelerometers,  
Velocity Gages,  
Displacement Gages  
△ Accelerometer



ターゲットの応答計測結果から求めた衝撃荷重:  $F_t$ (Target)

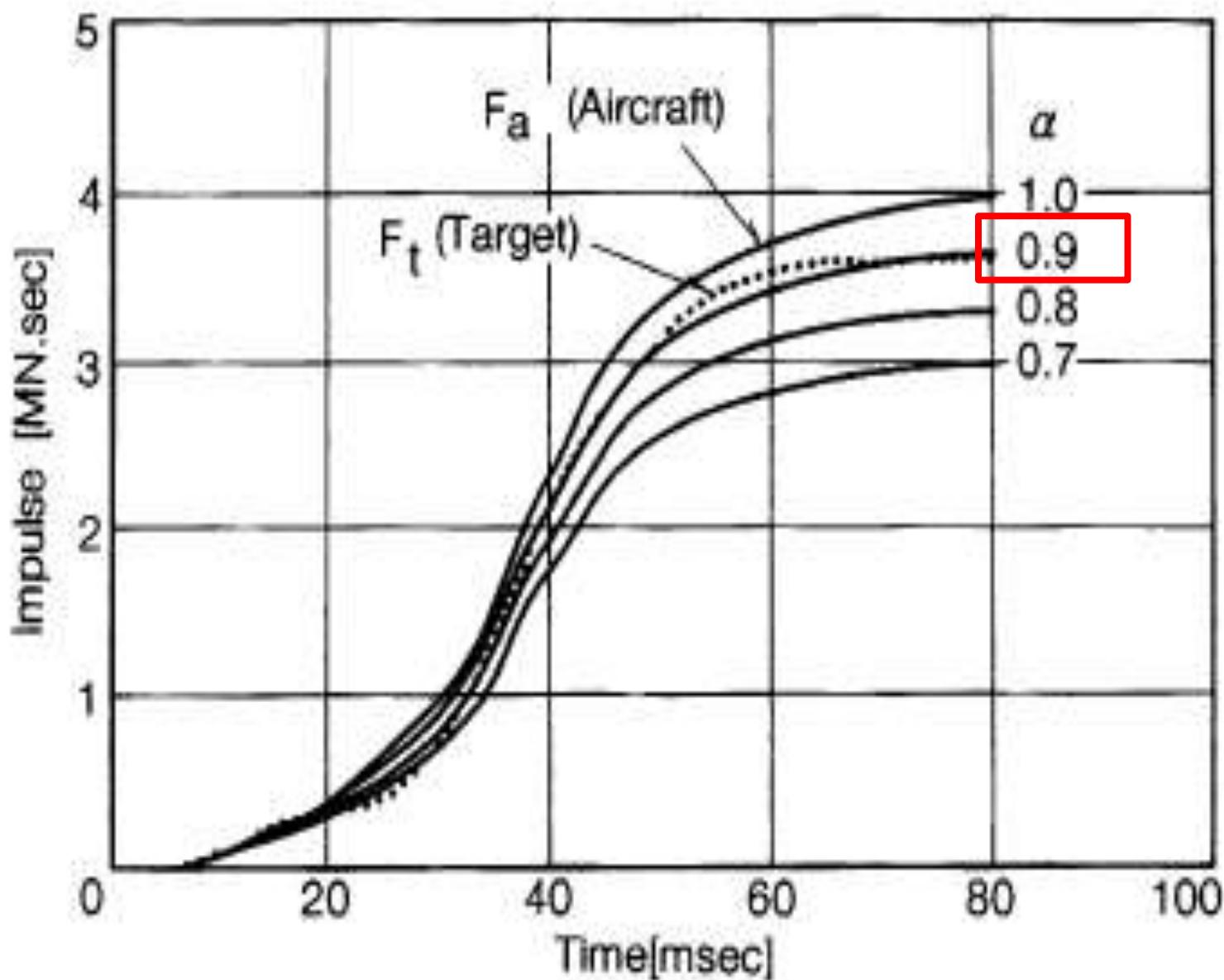


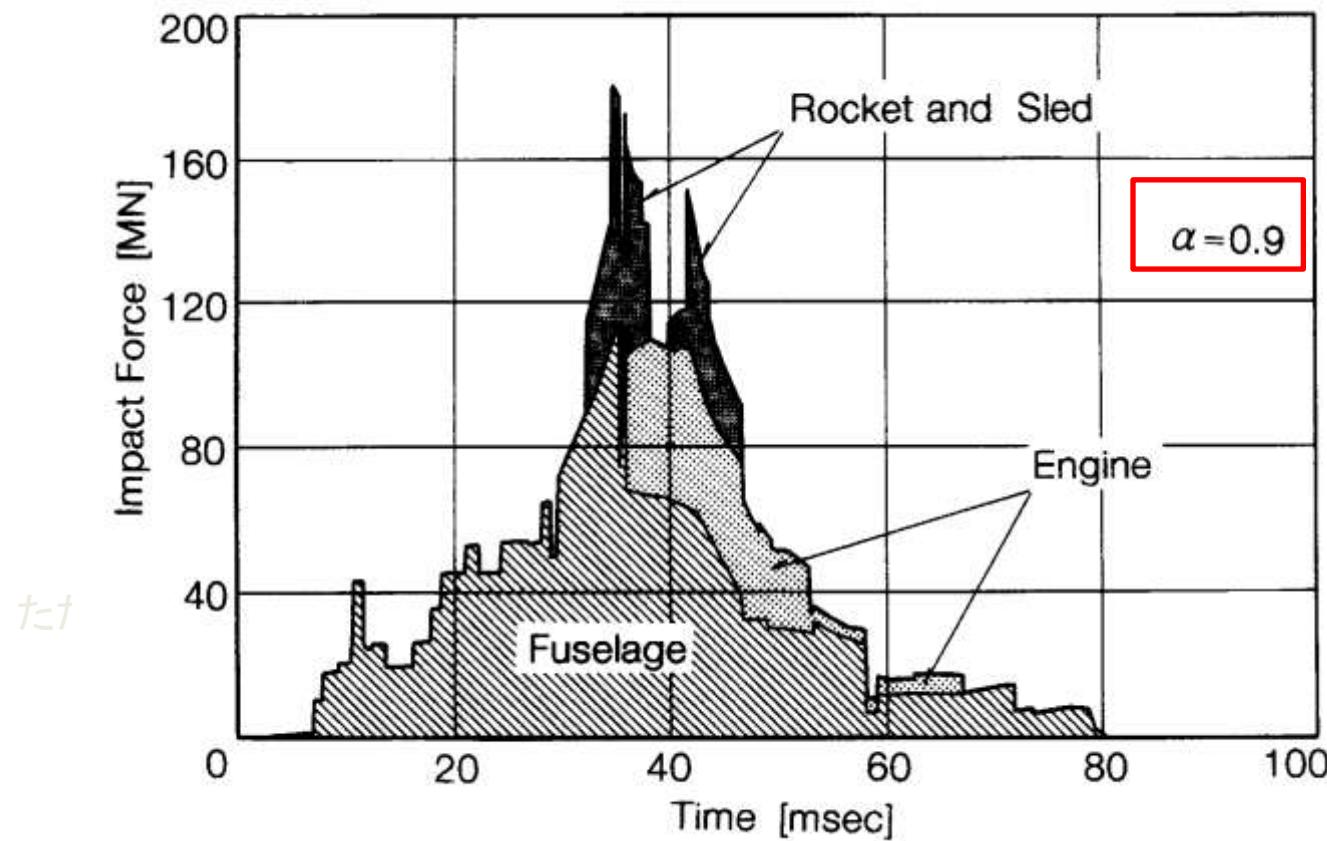
## F-4 Phantomを用いた実大衝撃実験結果(2)



$$F(t) = Pb[x(t)] + \alpha \mu[x(t)] \cdot V(t)^2$$

$\alpha$ : Coefficient of Effective Mass の導入(修正RIERA式)





米国 NEI 07-13 Rev.8P

“Methodology for Performing Aircraft Impact Assessments for New Plant Design (April,2011)”においても本実験結果を採用 ⇒ **修正RIERA式**

$$F(t) = Pb[x(t)] + \alpha \mu[x(t)] \cdot V(t)^2 \quad \alpha = 0.9$$

- ◆ 汎用衝撃解析ソフト(LS-DYNA, AUTODYN, ABAQUS, ADINA等)を用いた大規模シミュレーション解析が主流
- ◆ シミュレーション解析の種類
  - 衝撃荷重評価解析
  - Force-History Method
  - Interaction Method
- ◆ 解析検証モデルとして、F-4 Phantom 実大衝撃実験を多用
- ◆ 最近では、大型民間航空機を対象としたシミュレーション解析が増加
- ◆ SPH Model (Smoothed Particle Hydrodynamics Model)の採用

Siefert A., Henkel F. O. (2013): Validation of Integral Crash Simulation Method by Sandia Test Results for F4, Trans. 22<sup>th</sup> International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, Div. IV

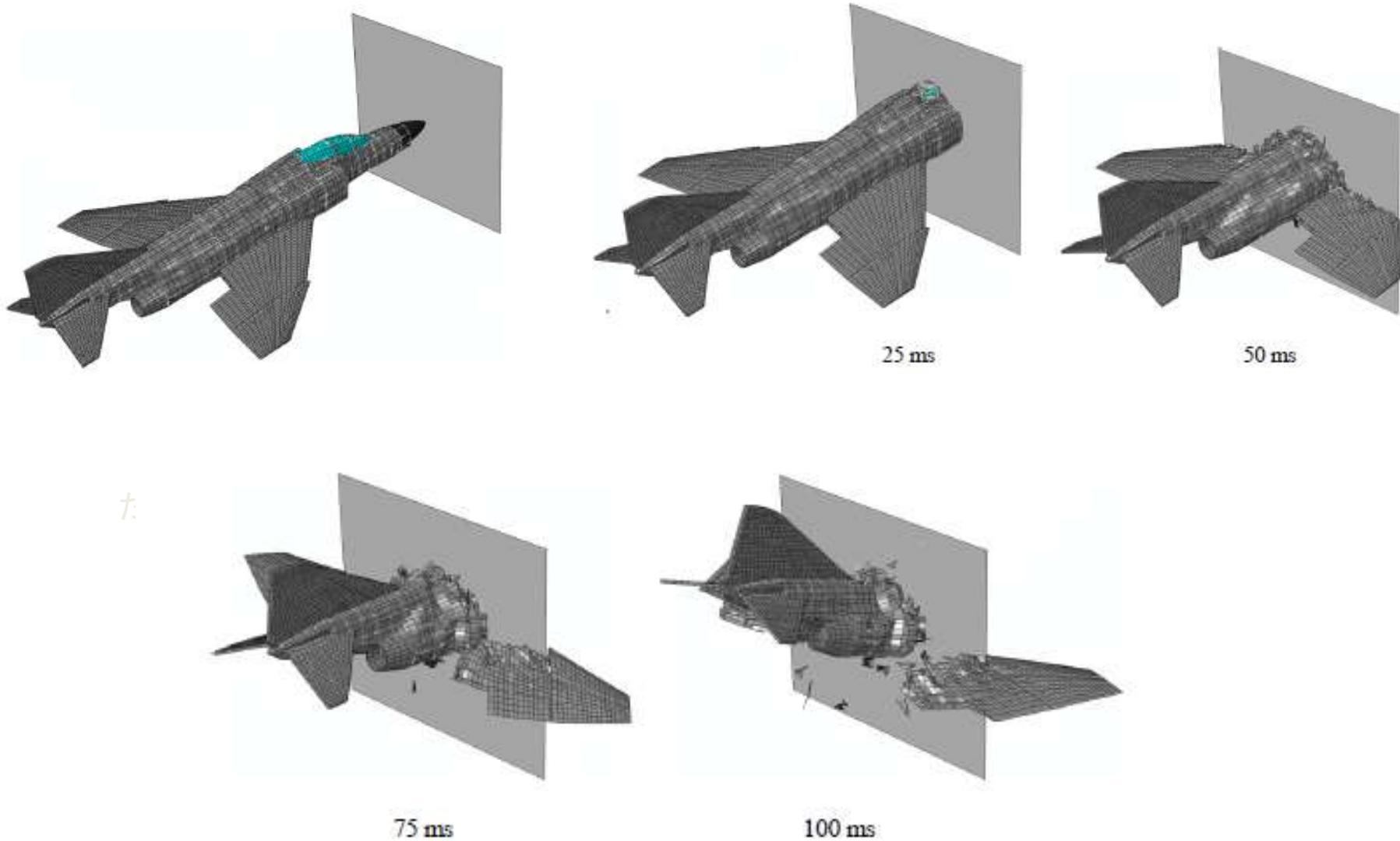


Frame

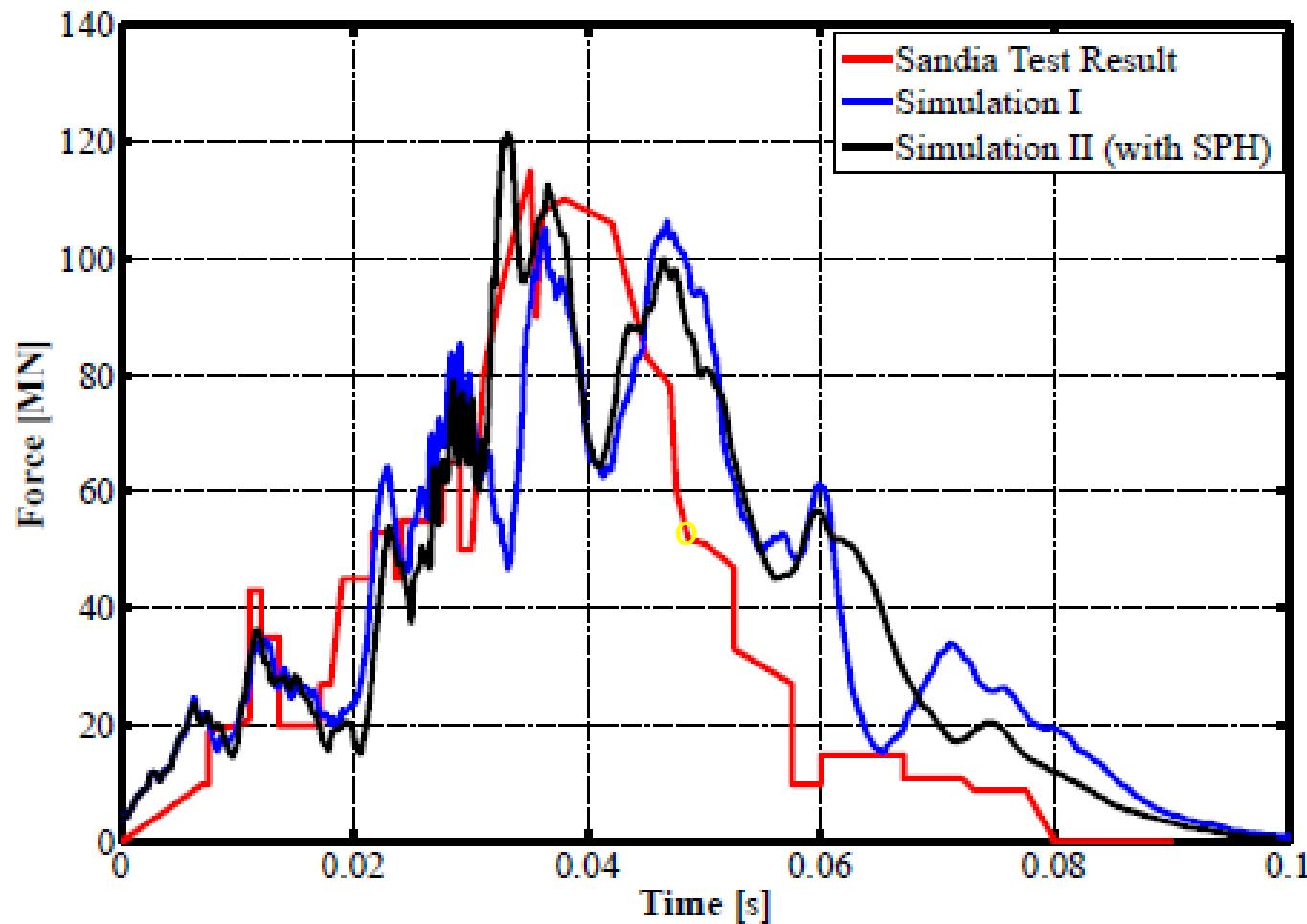
Cross Section

Isometric View

F4-Phantom のモデル化



Simulation results of Phantom F4 on a rigid wall with velocity of 215m/s

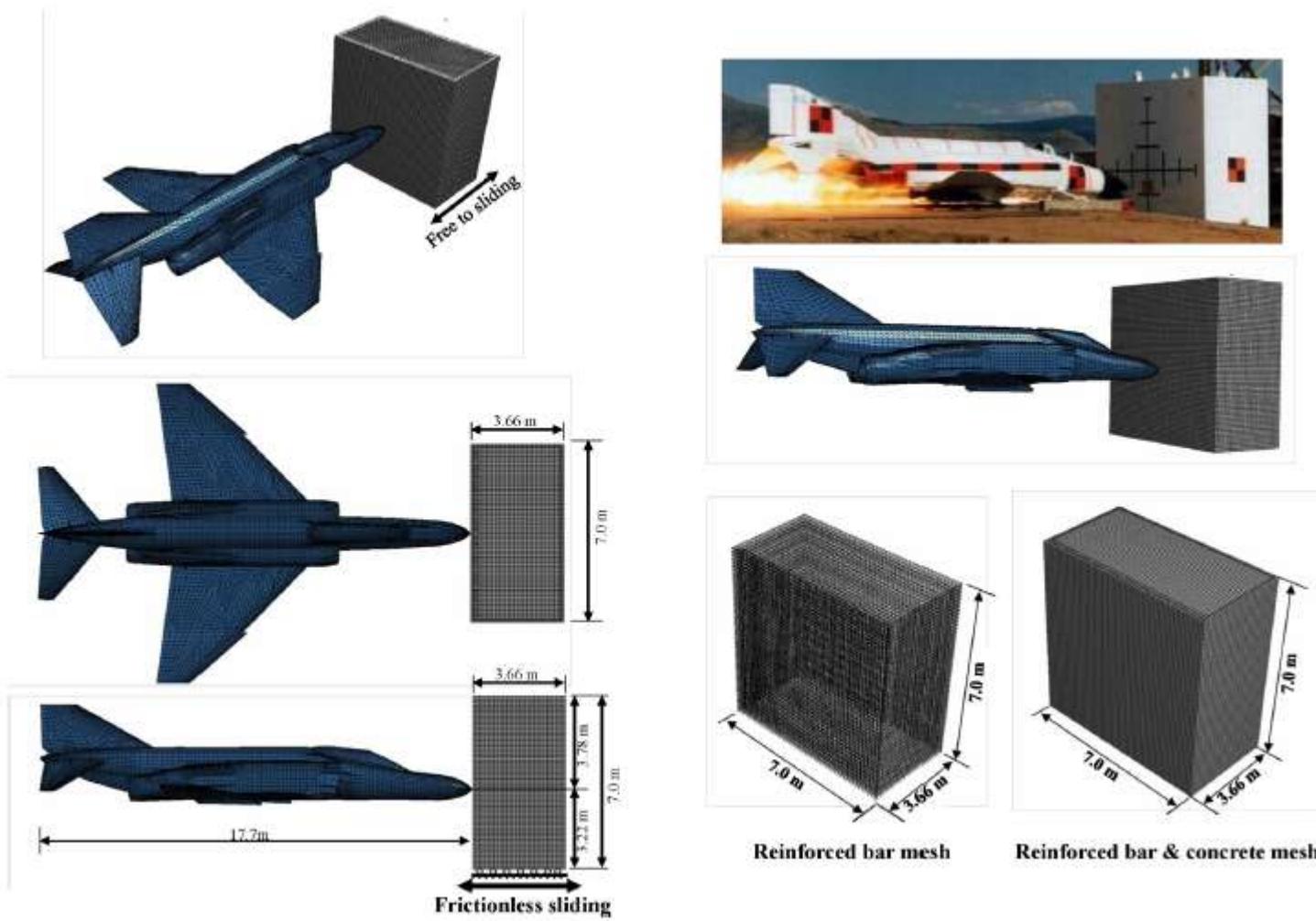


Comparison of load-time-function for measurement and simulation

Variant I: Discrete elements

Variant II: Particle elements

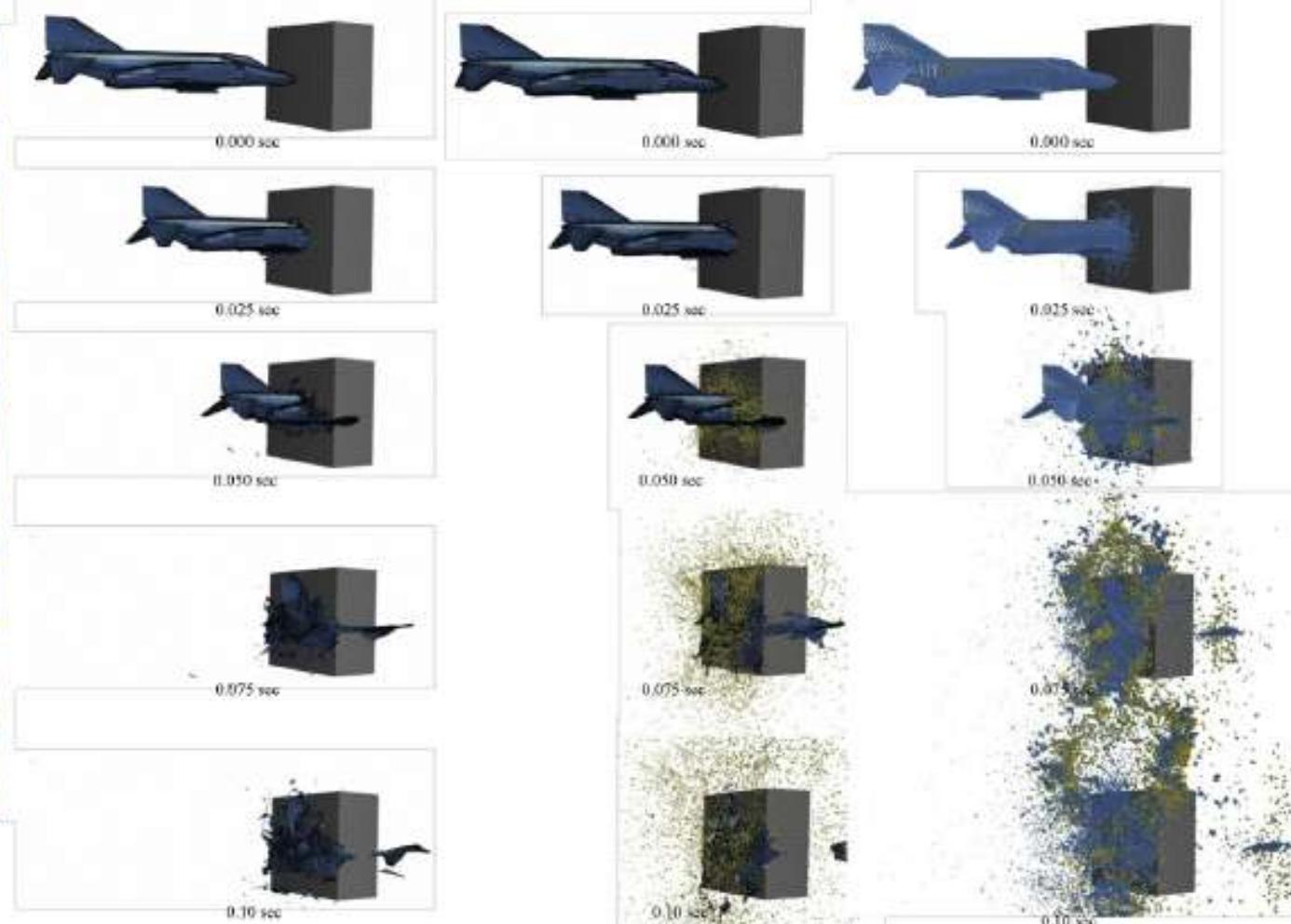
Lee K., Jung J. W., Hong J. W. (2014): Advanced Aircraft Analysis of an F-4 Phantom on a Reinforced Concrete Building, Nuclear Engineering and Design, Vol. 273, 505-528



## 衝撃荷重評価解析の研究事例2



<https://share.sandia.gov/news/resources/video-gallery/index.html>



Lagrangian Model

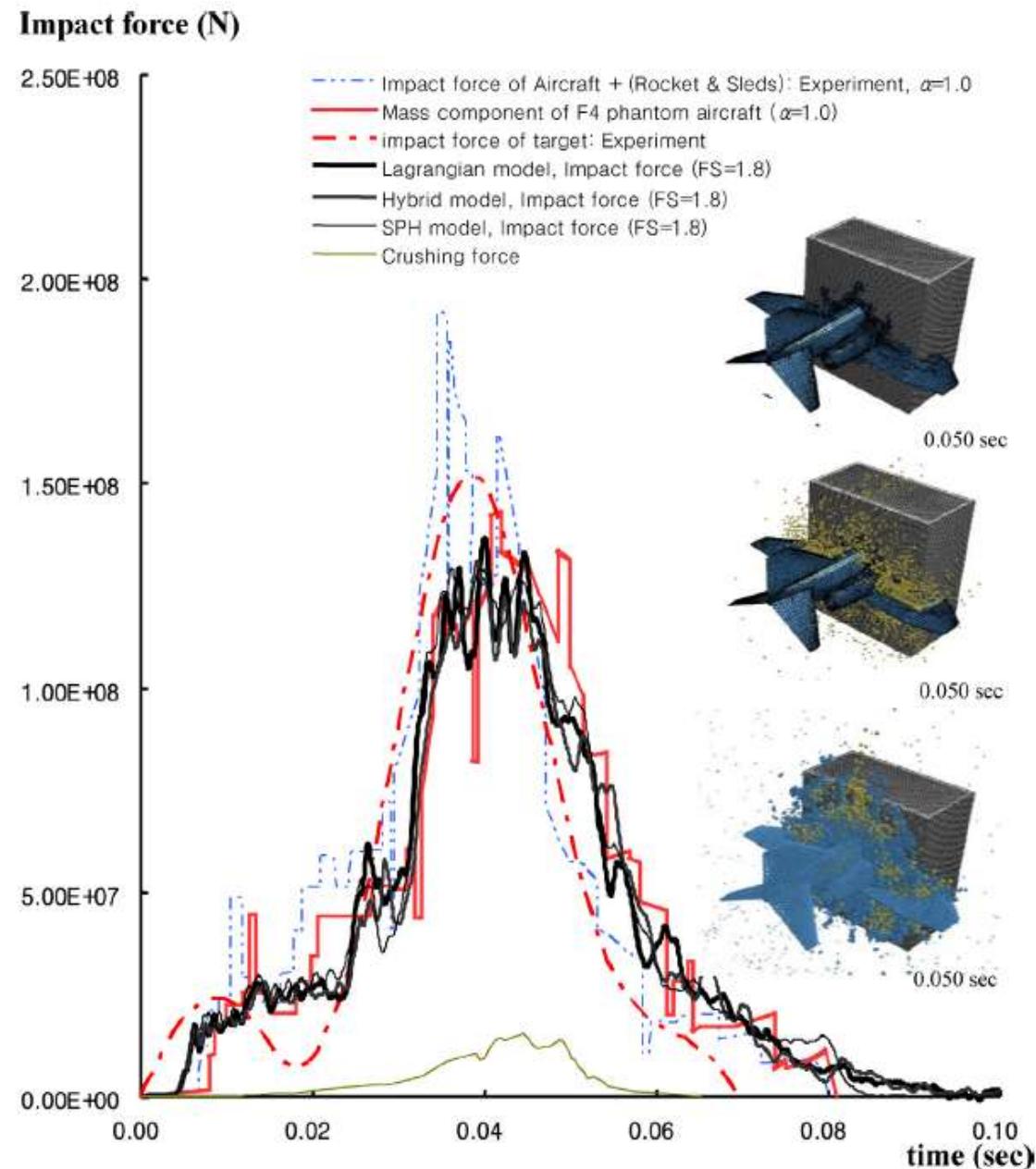
Hybrid Model

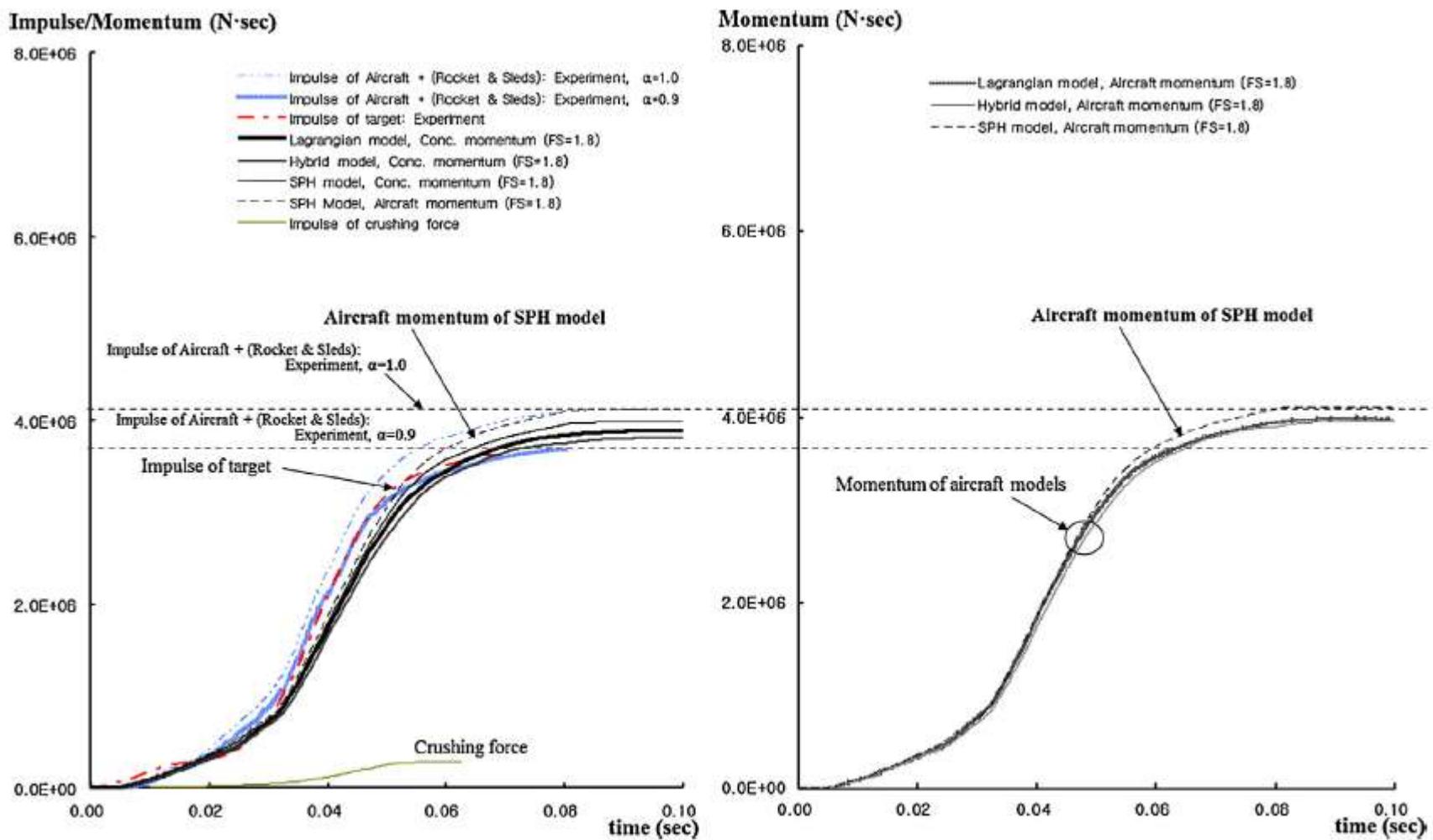
SPH Model

Target concrete wall impact analysis ( failure strain=1.8)

Impact force time history  
against a target concrete  
wall (failure strain=1.8)

ただし

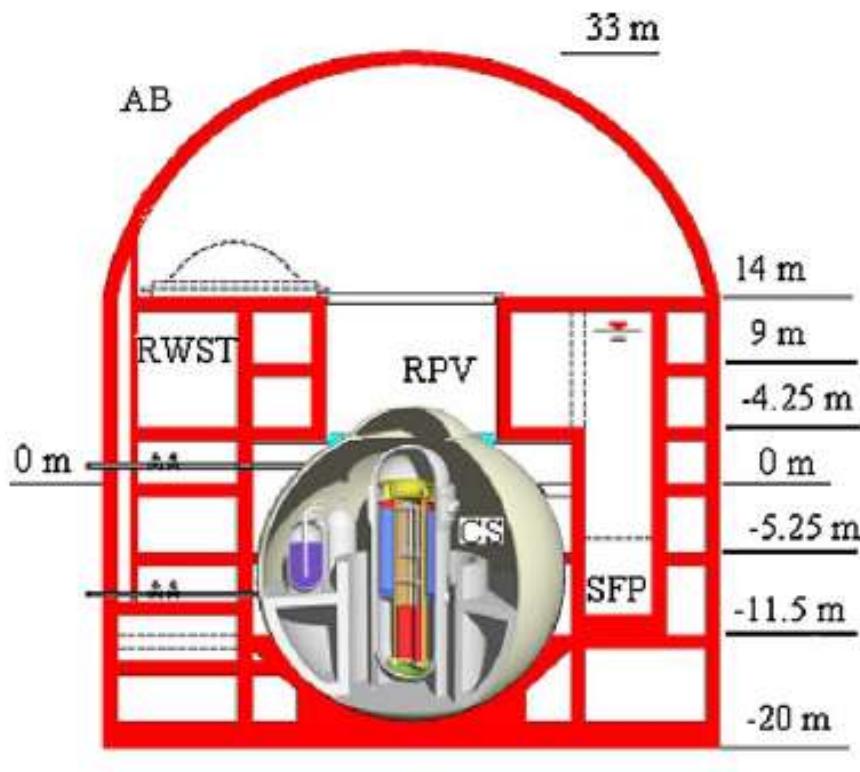




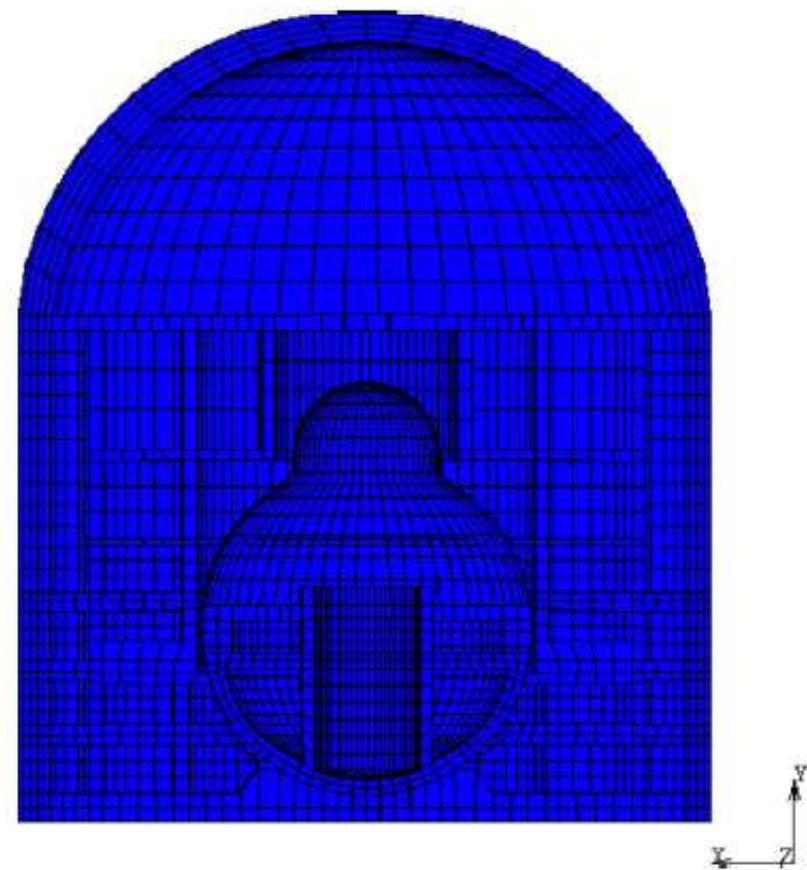
Impulse/moment of the concrete wall and aircraft models

# Force-History Methodを用いた解析の研究事例1

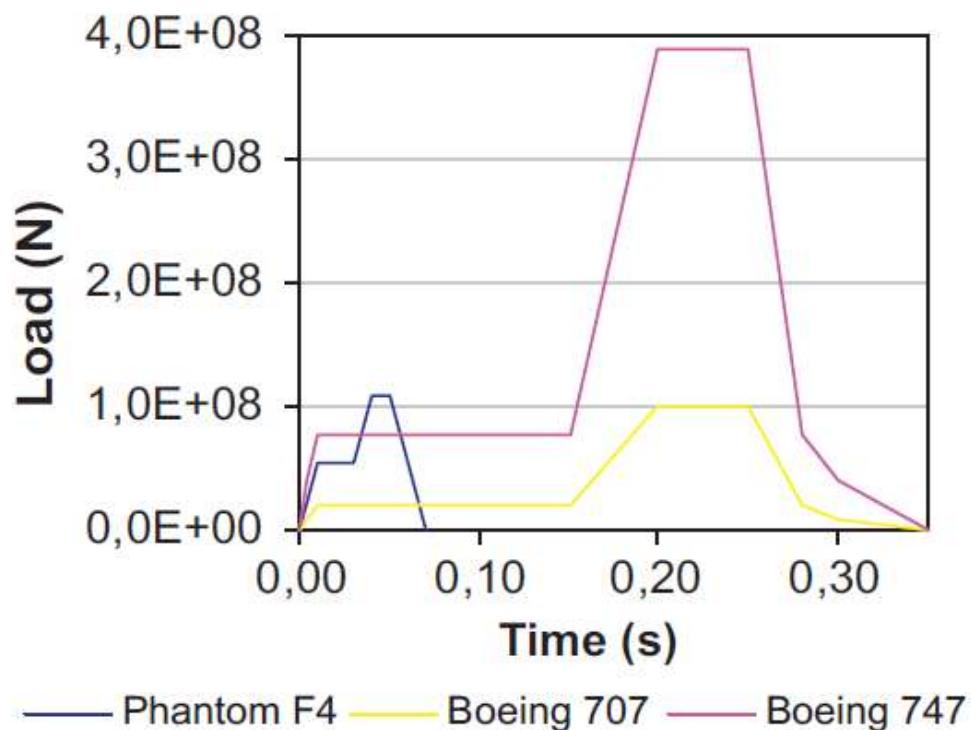
Frano R. L., Forasassi G. (2011):Preliminary Evaluation of Aircraft Impact on a Near Term Nuclear Power Plant, Nuclear Engineering and Design, Vol. 241, 5245-5250



IRIS CB

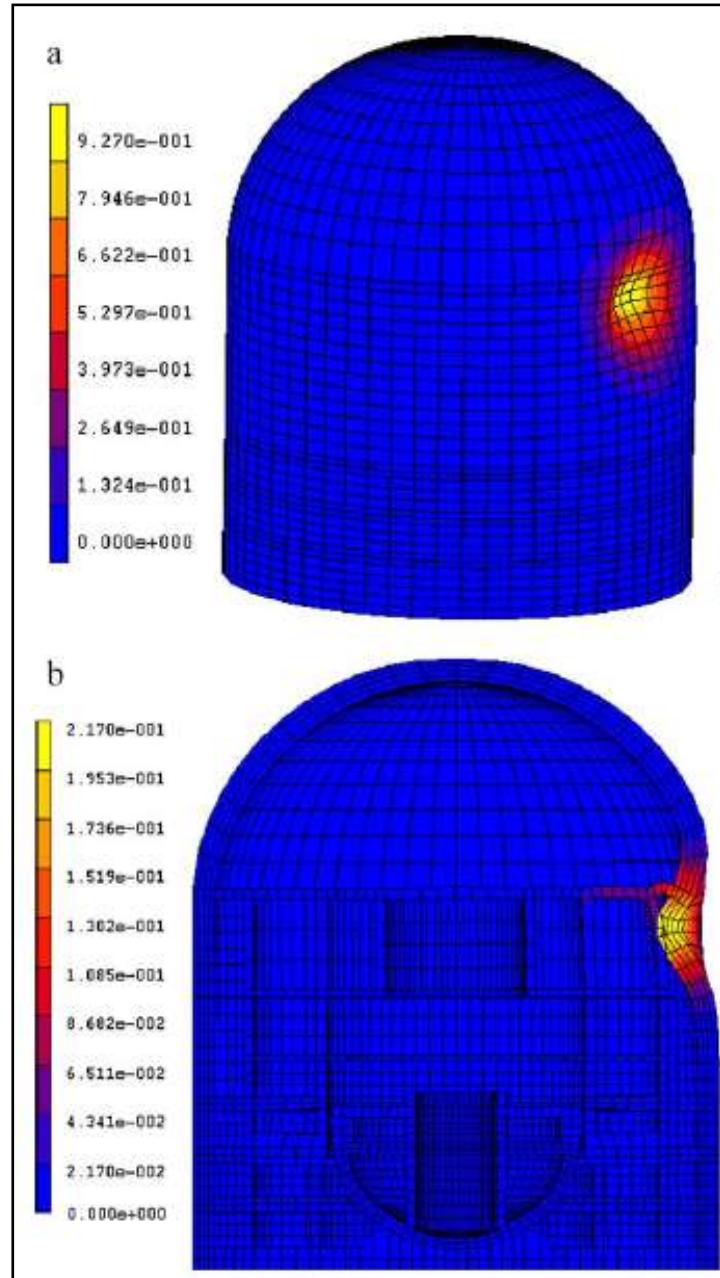


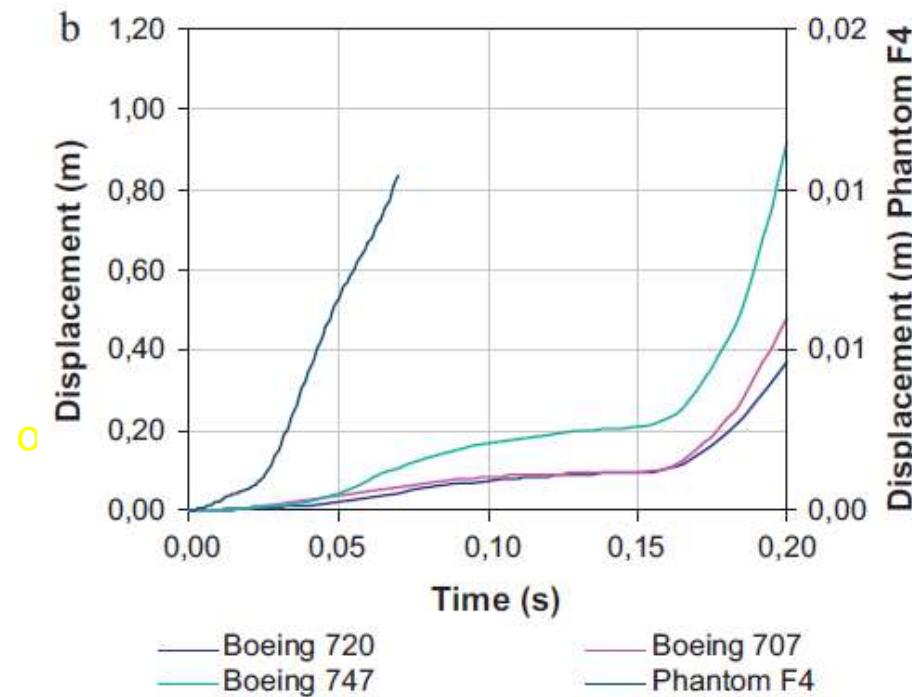
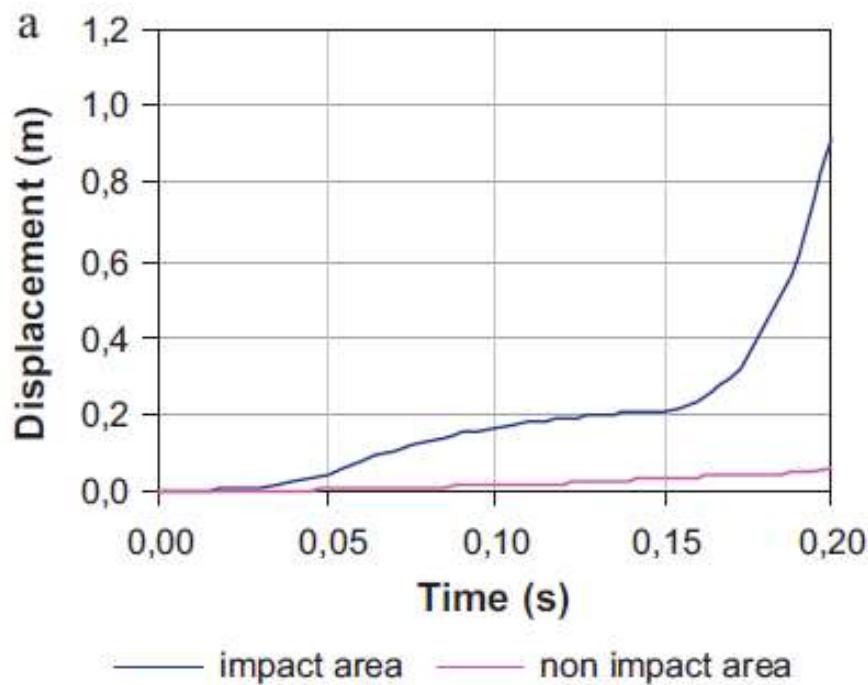
NPP outer containment model



Load Time Functions

CB Deformation Shape Subjected to Boeing 747 (a) and Phantom F4 (b) Impacts

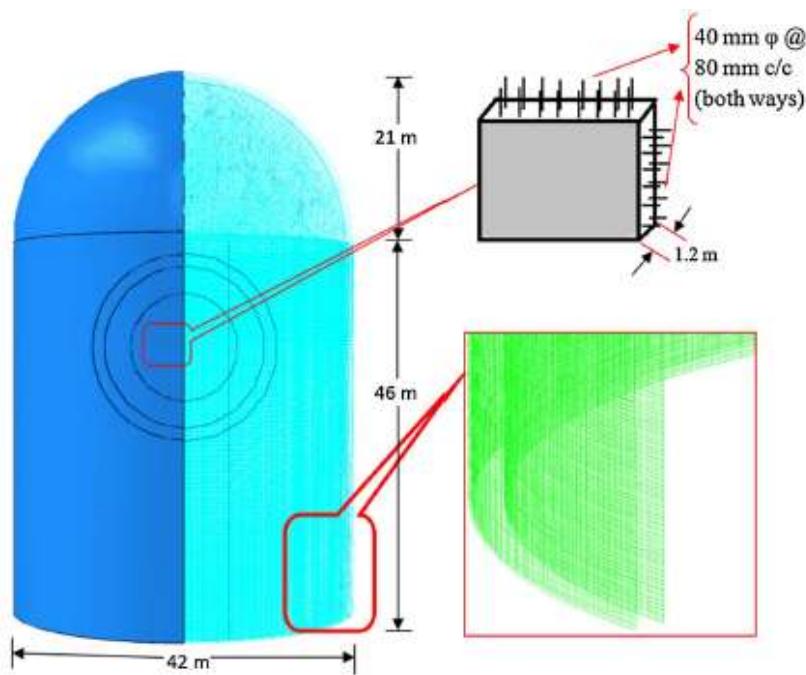




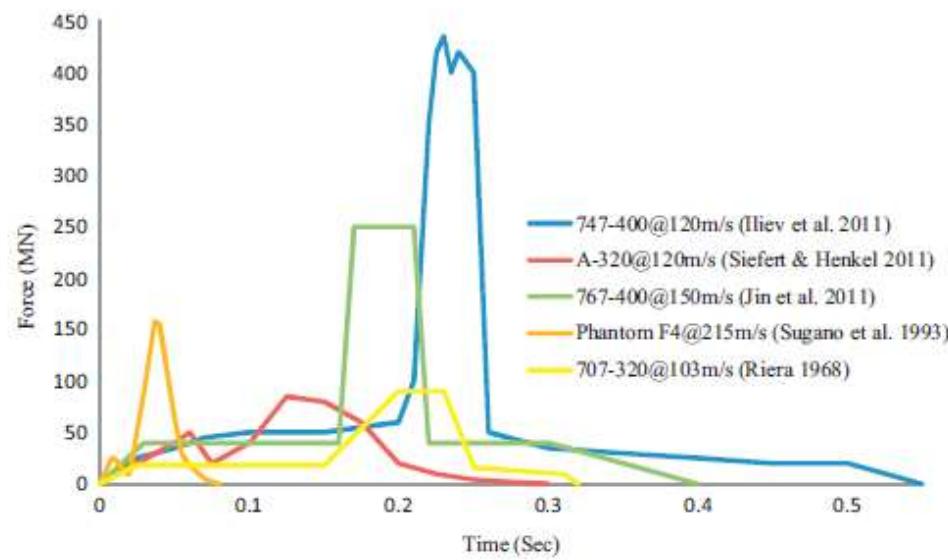
Penetration depth: (a) at the impacted /not impacted walls,  
(b) for different aircraft type

# Force-History Methodを用いた解析の研究事例2

Sandique M. R., Iqbal M. A., Bhargava P. (2013): Nuclear Containment Structure Subjected to Commercial and Fighter Aircraft Crash, Nuclear Engineering and Design, Vol. 260, 30-46



Geometric model of containment and detailing of reinforcement



Reaction time response of the aircrafts

# Force-History Methodを用いた解析の研究事例2

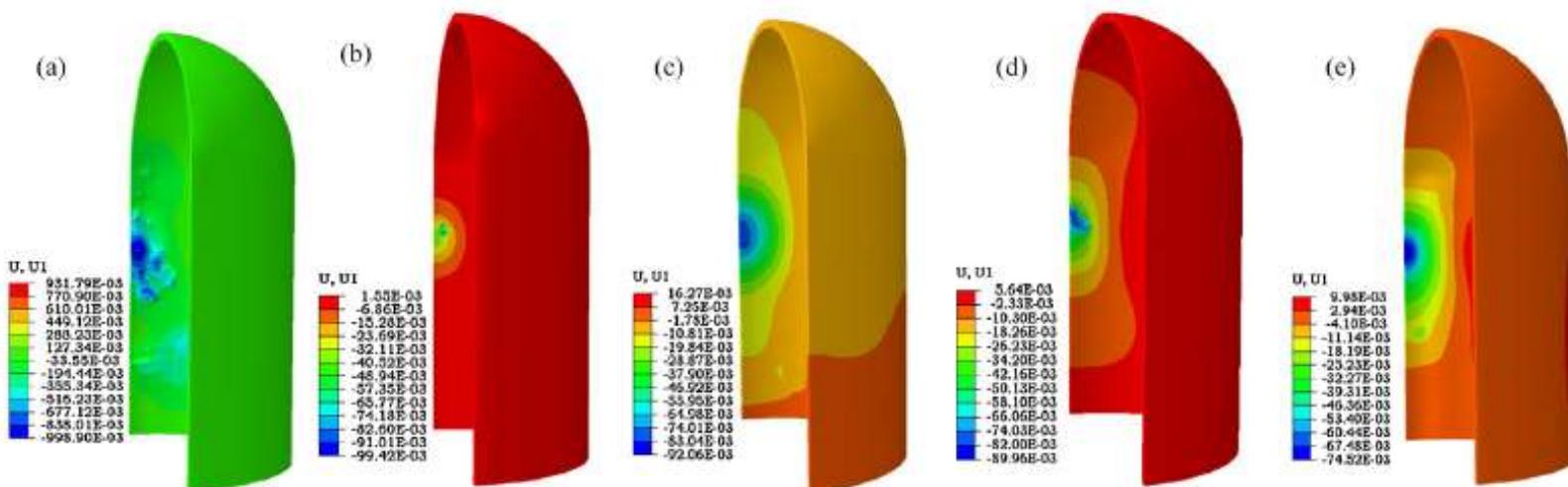
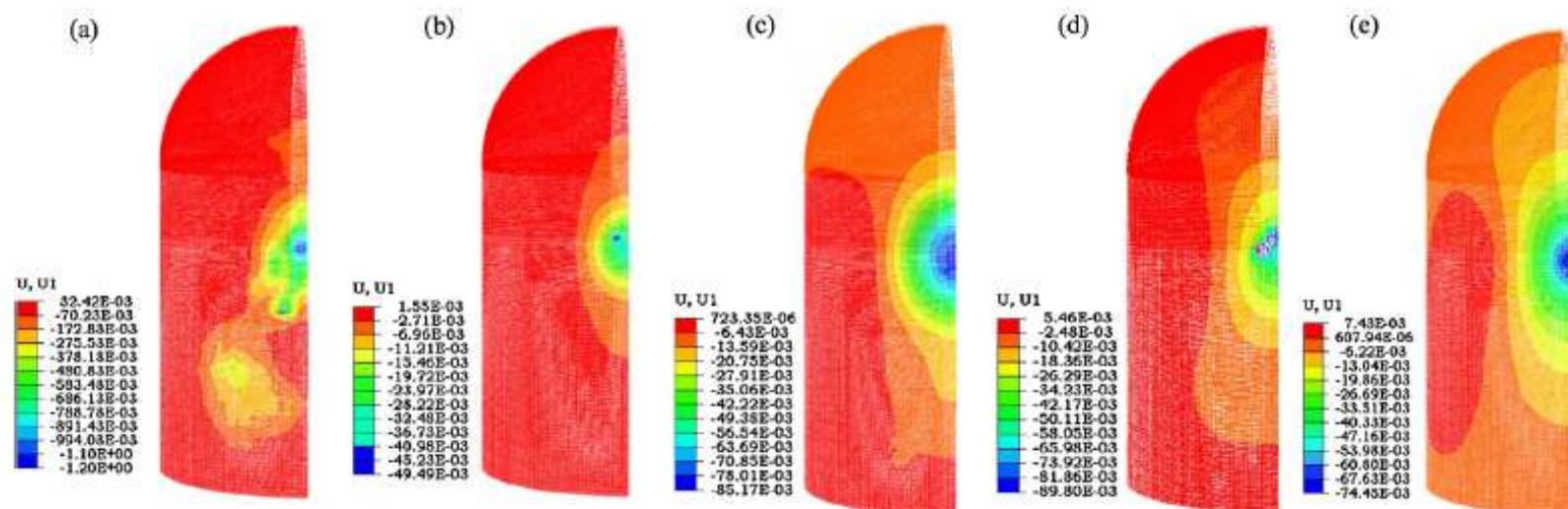
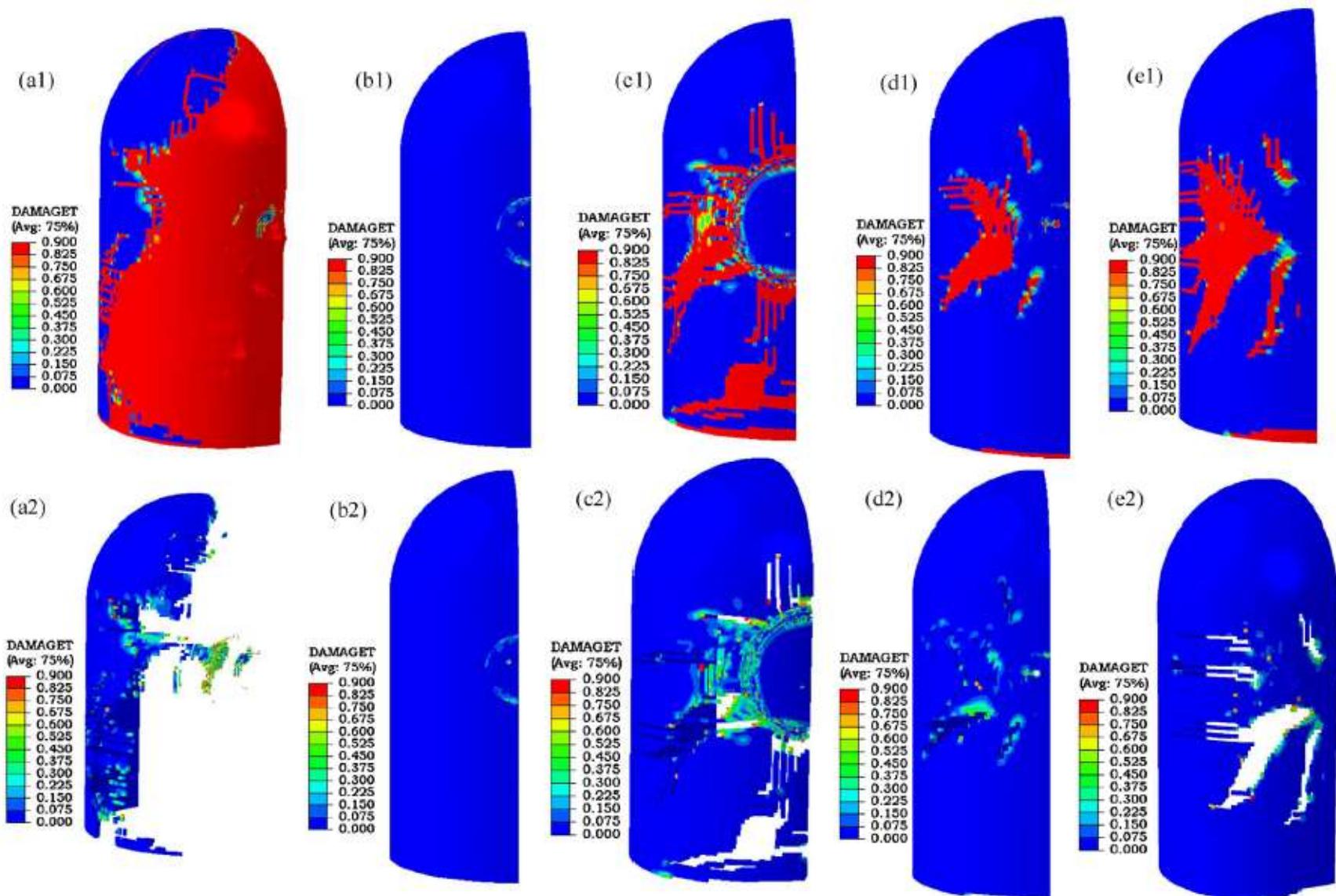


Fig. 7. Maximum displacement (deformation) in concrete in the direction of loading: (a) 747-400 (b) Phantom F4 (c) 767-400 (d) 707-320 (e) A320.



Maximum displacement (deformation) in the inner reinforcement in the direction of loading: (a) 747-400, (b) Phantom F4, (c) 767-400, (d) 707-320, (e) A320

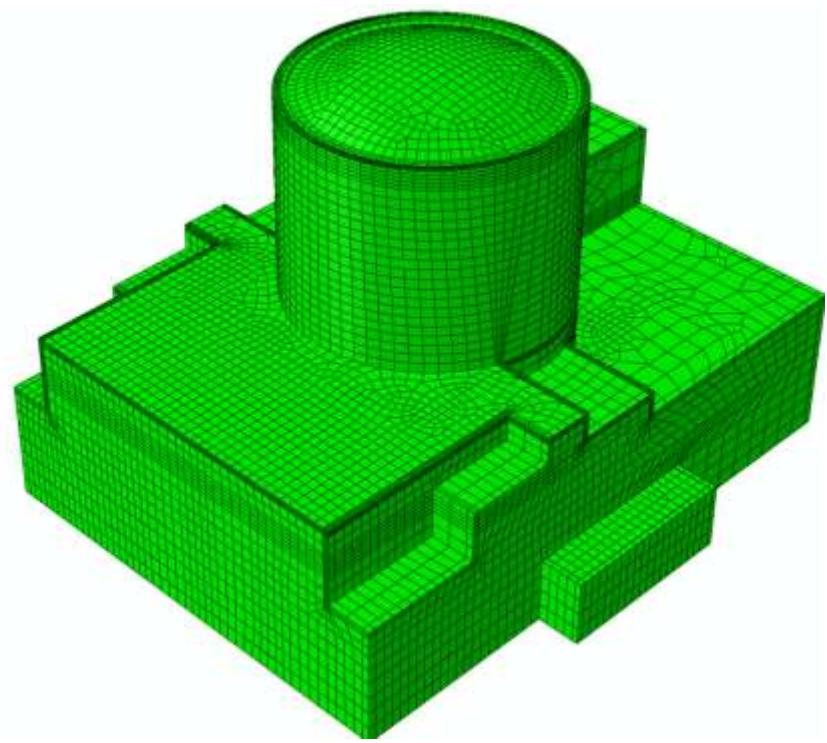
## Force-History Methodを用いた解析の研究事例2



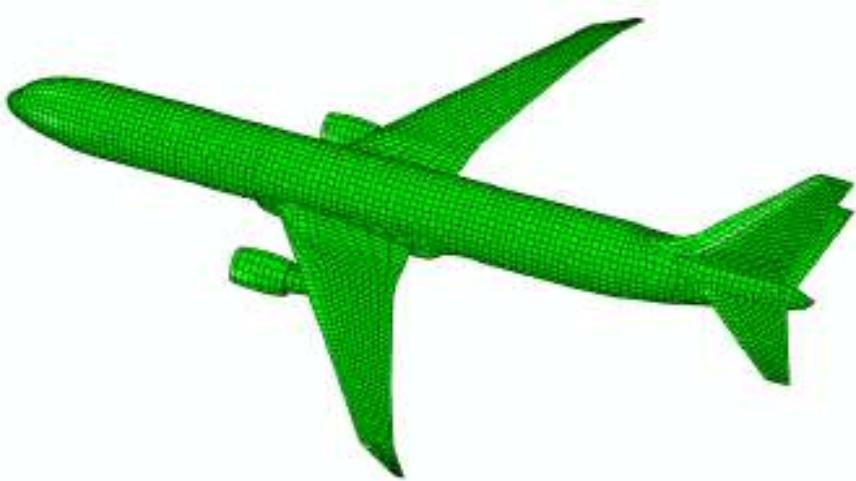
Tension damage contour of concrete:

(a) 747-400, (b) Phantom F4, (c) 767-400, (d) 707-320, (e) A320

Jin. B. M. et al. (2011): Development of Finite Element Model of Large Civil Aircraft Engine and Application to the Localized Damage Evaluation of Concrete Wall Crashed by Large Civil Aircraft, Trans. 21<sup>th</sup> International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, Div. V, 1-8

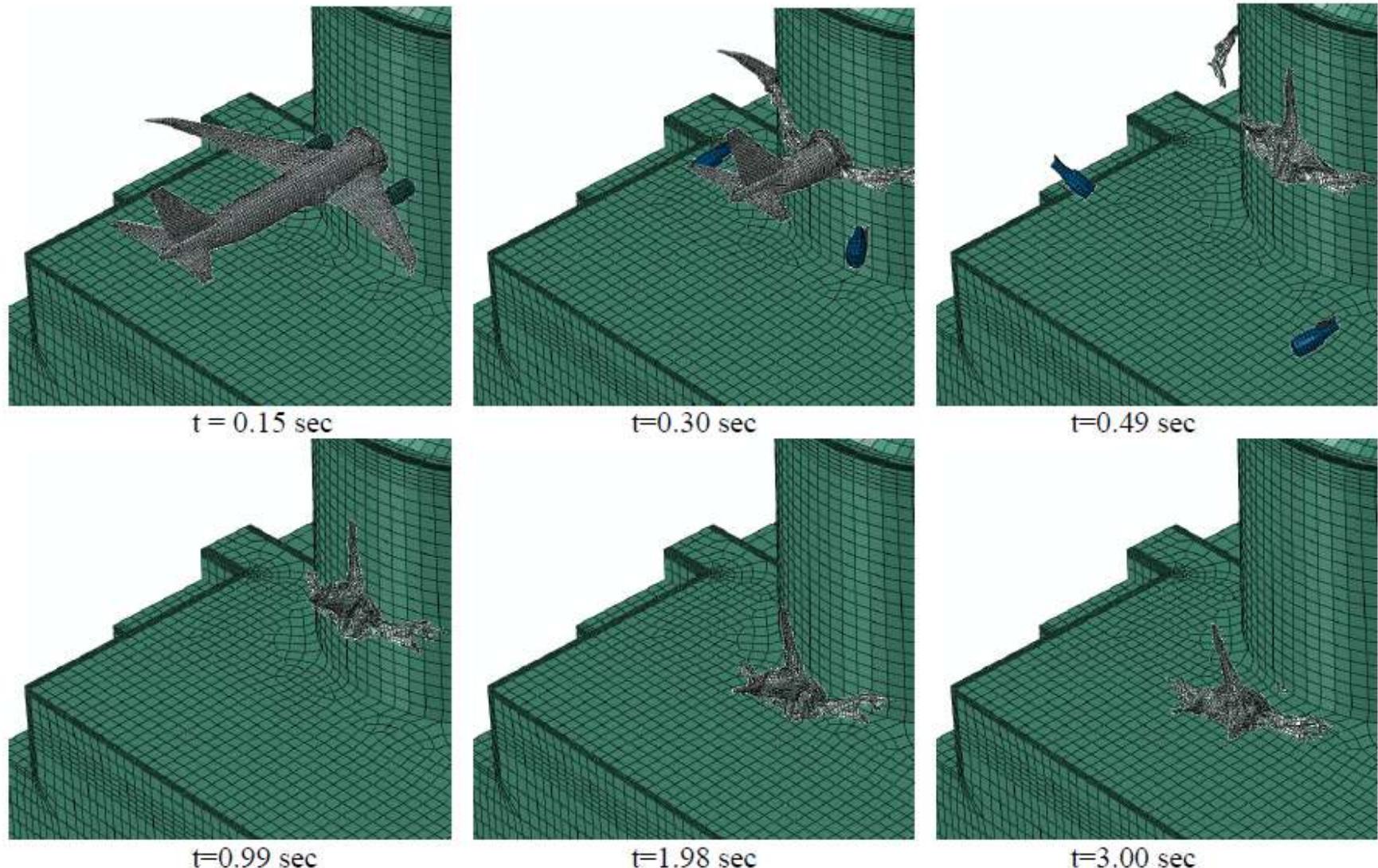


Finite mesh of NPP structures

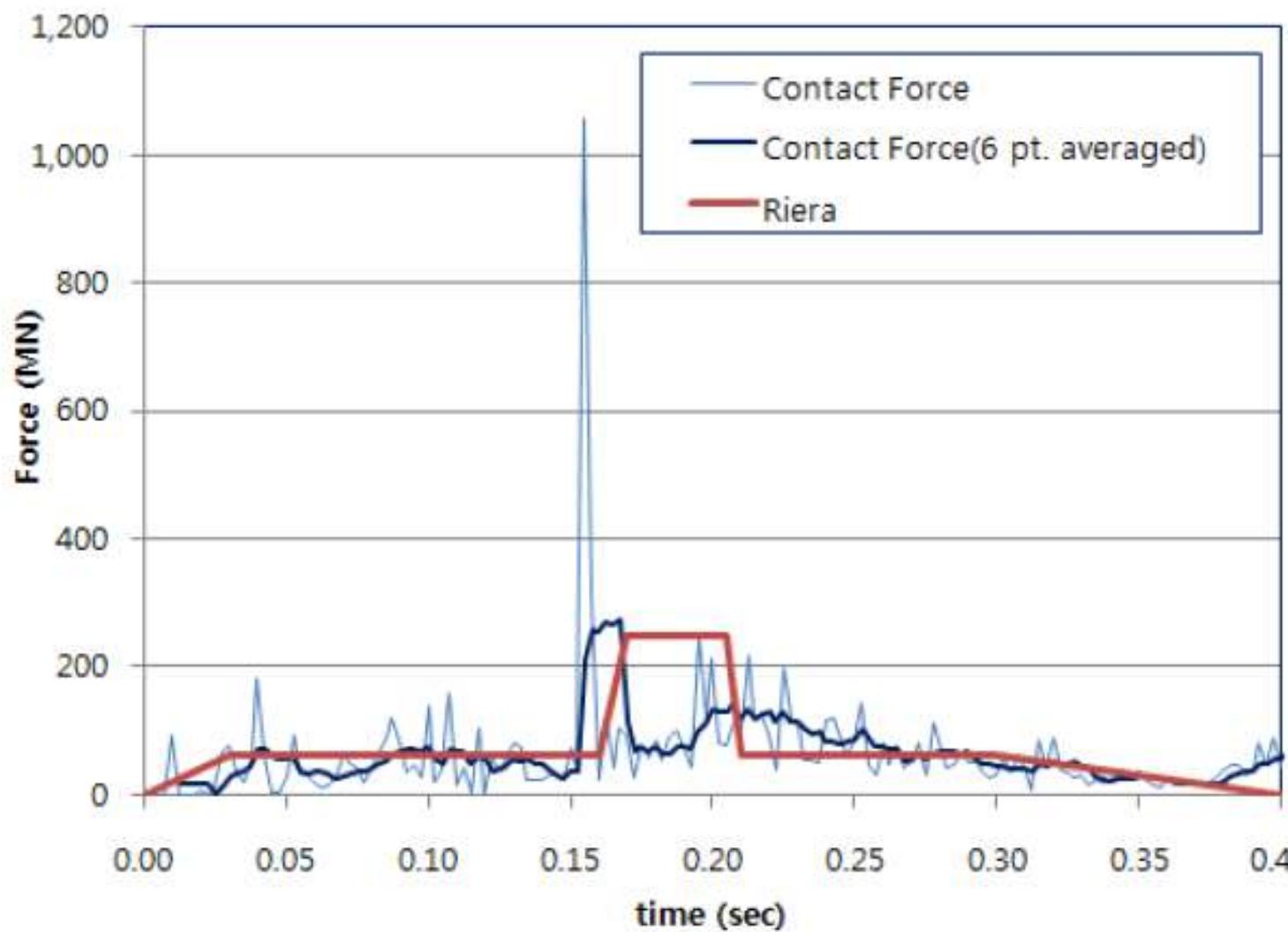


Developed B767-400 model

## Interaction Methodを用いた解析の研究事例1

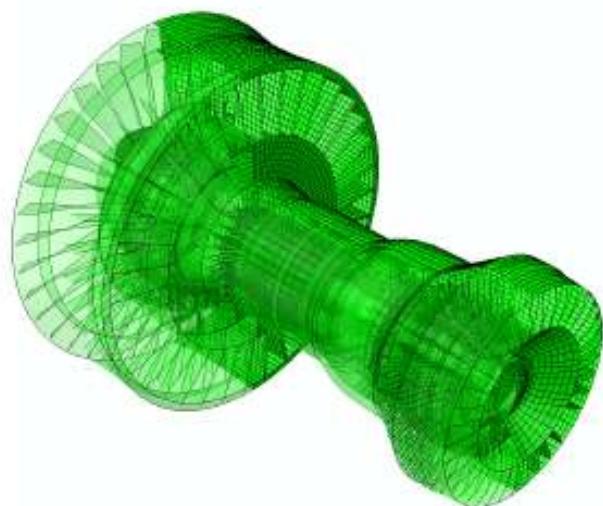


B767-NPP Impact Sequences

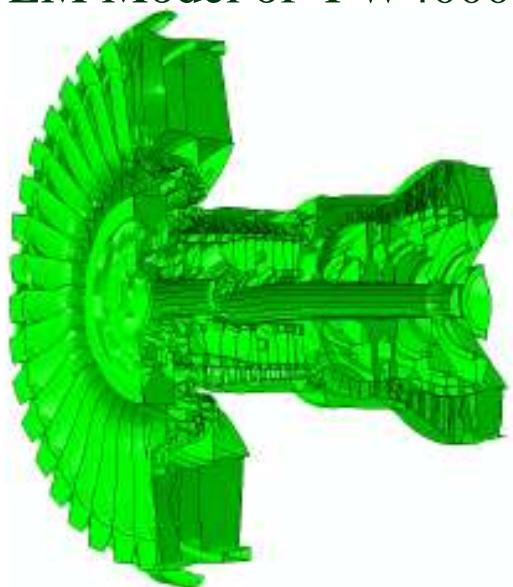


Impact Load-Time History (NPP)

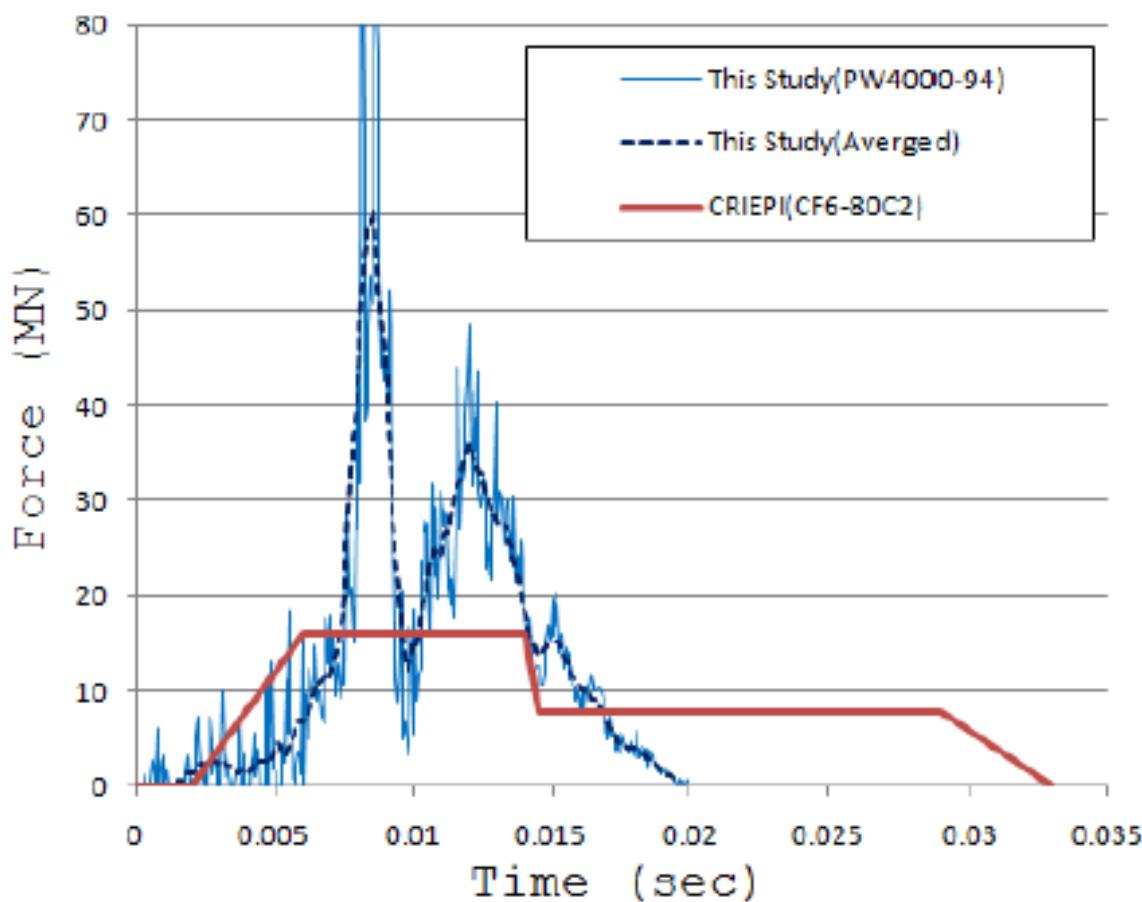
## Interaction Methodを用いた解析の研究事例1



FEM Model of PW4000-94



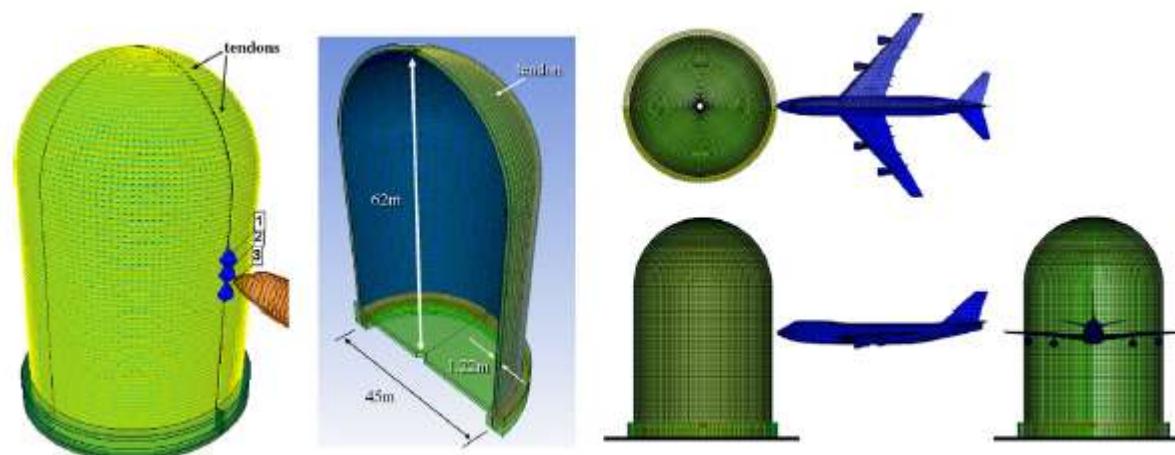
Deformed Configuration



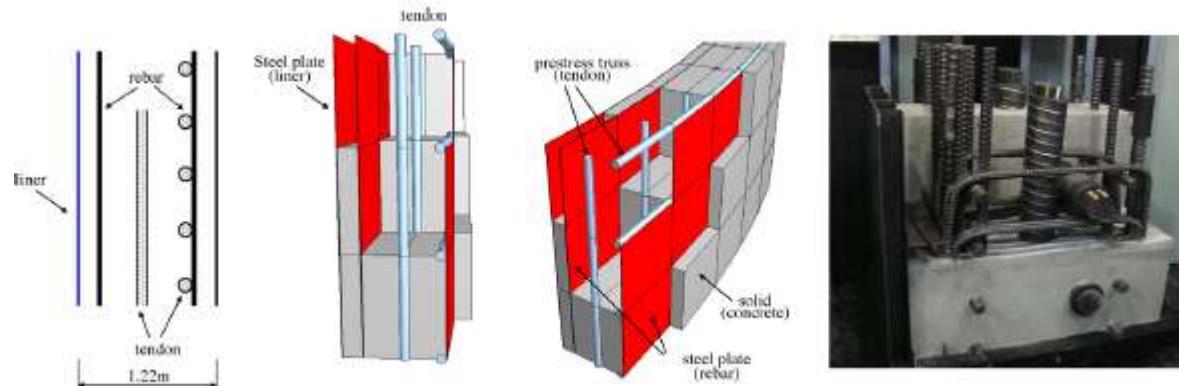
Comparison of Impact Load-Time Histories

# Interaction Methodを用いた解析の研究事例1

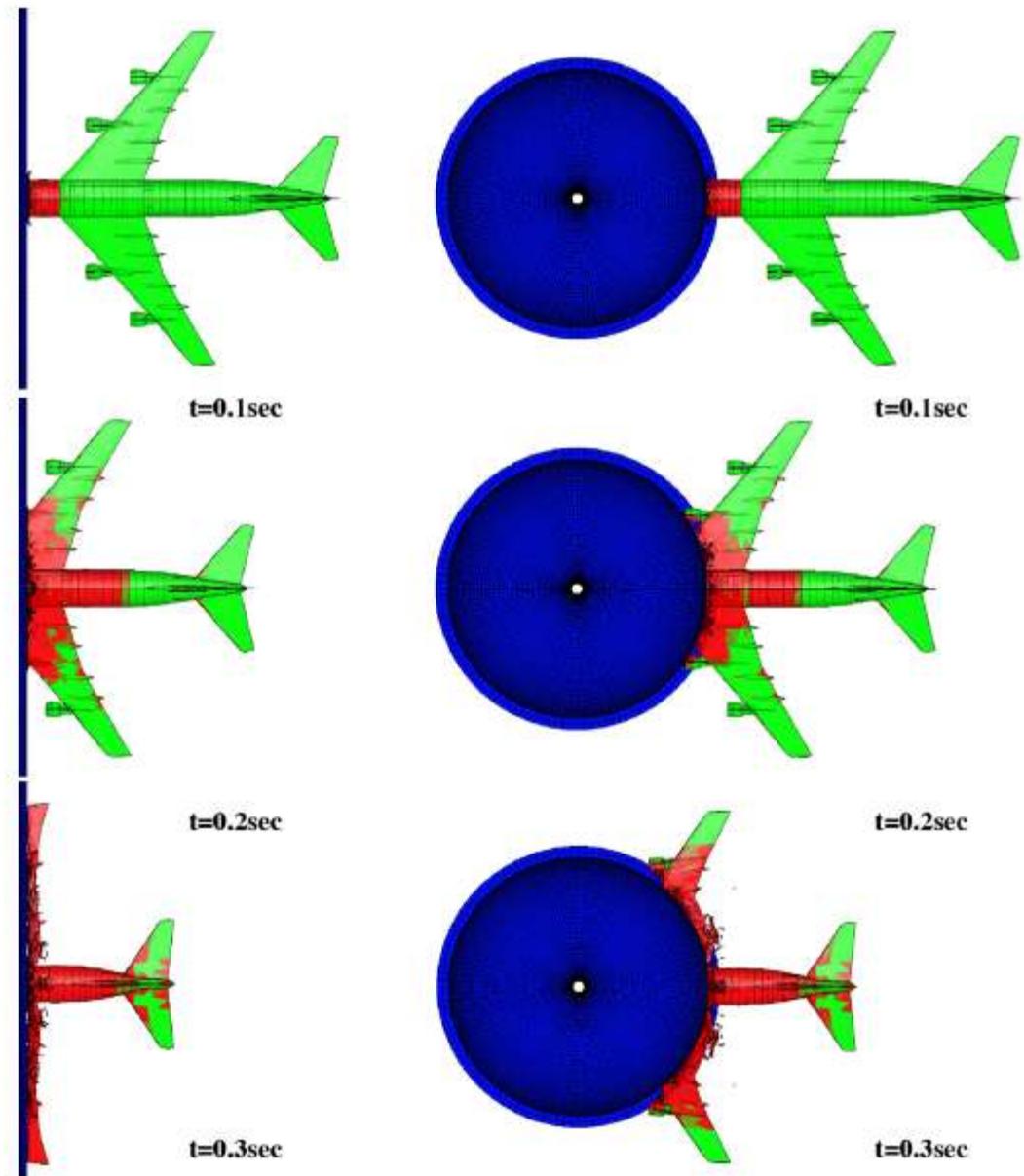
Lee K., Han S.E., Hong J.W. (2013): Analysis of Impact of Large Commercial Aircraft on a Prestressed Containment Building, Nuclear Engineering and Design, Vol. 265, 431-449



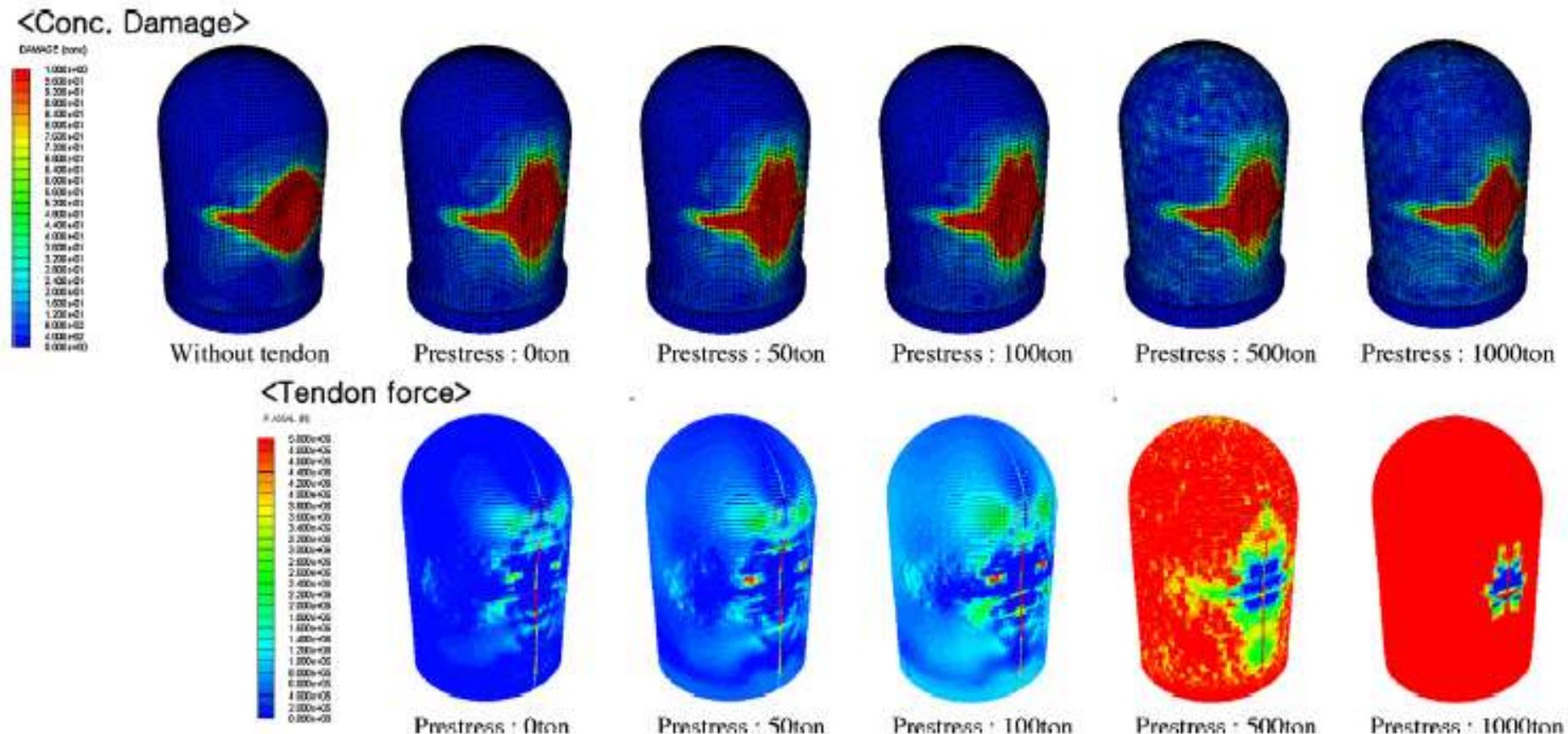
Fictitious Concrete Nuclear Containment Building Used for Aircraft Impact Analysis



Details of the Concrete Wall Section

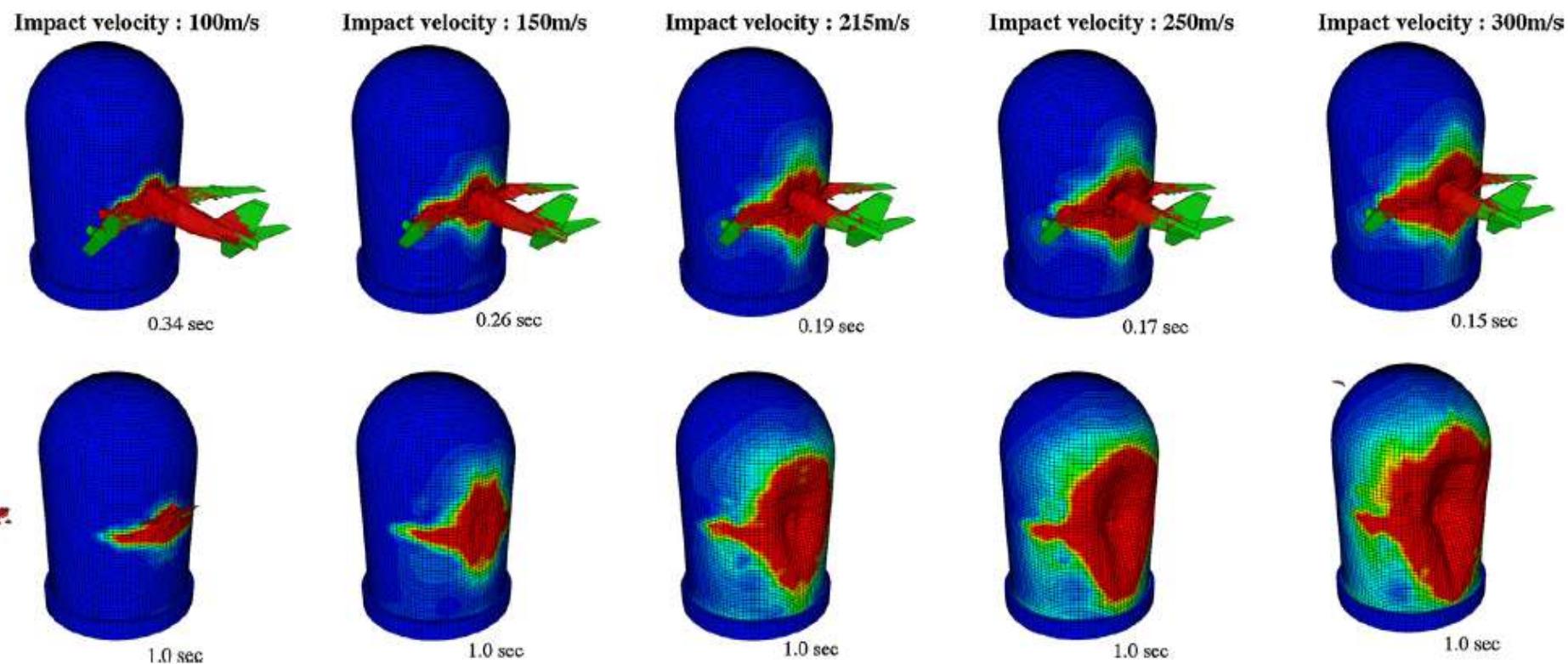


Impact Configurations According  
to the Shapes of Target Structures:  
(a) Planner Wall Impact and  
(b) Cylindrical Concrete  
Containment Wall Impact



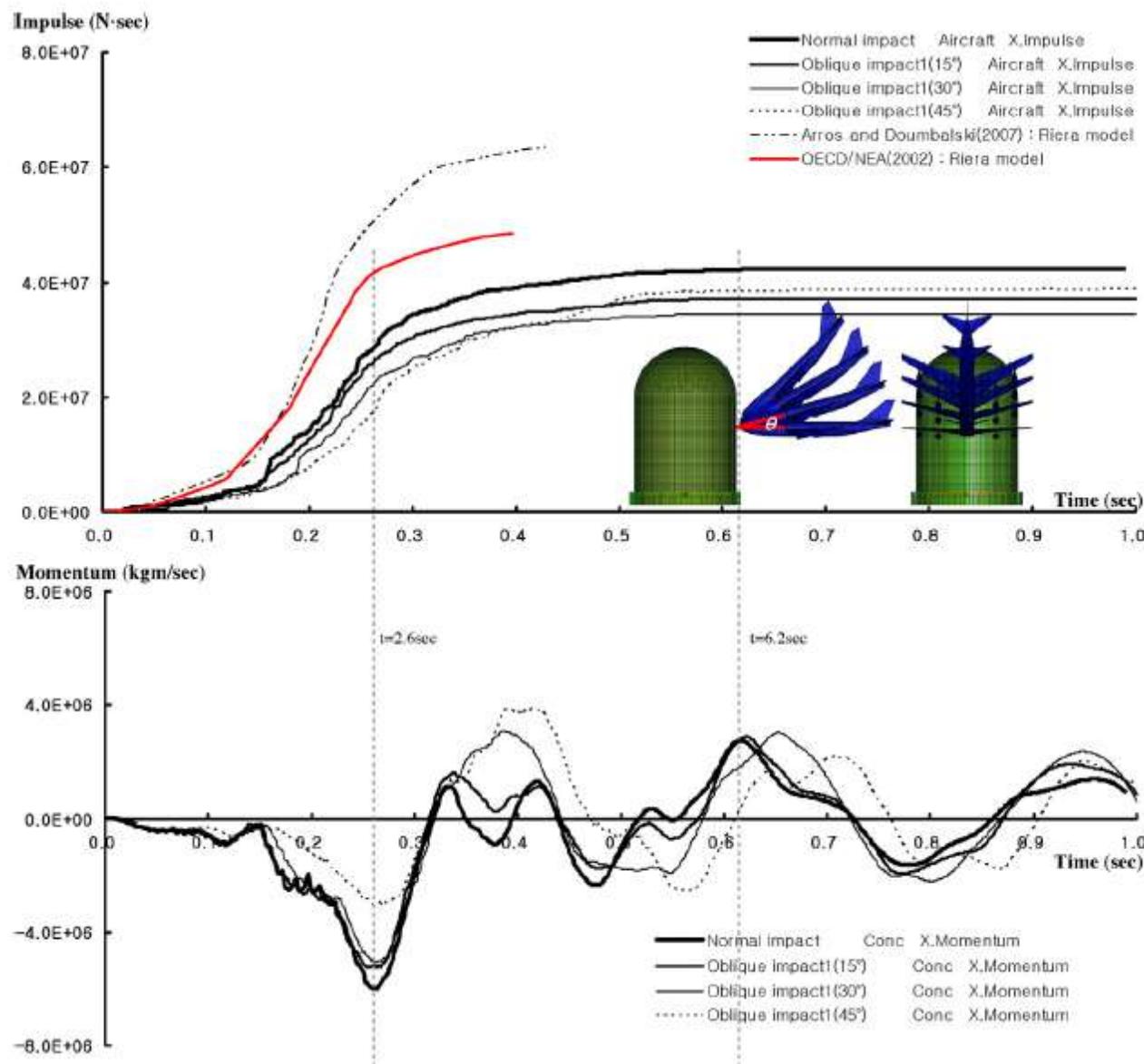
Concrete Damage and Tendon Force of the Concrete Containment Building  
according to the tendon pre-stress (at 1.0 sec, impact velocity: 150m/sec)

## Interaction Methodを用いた解析の研究事例1



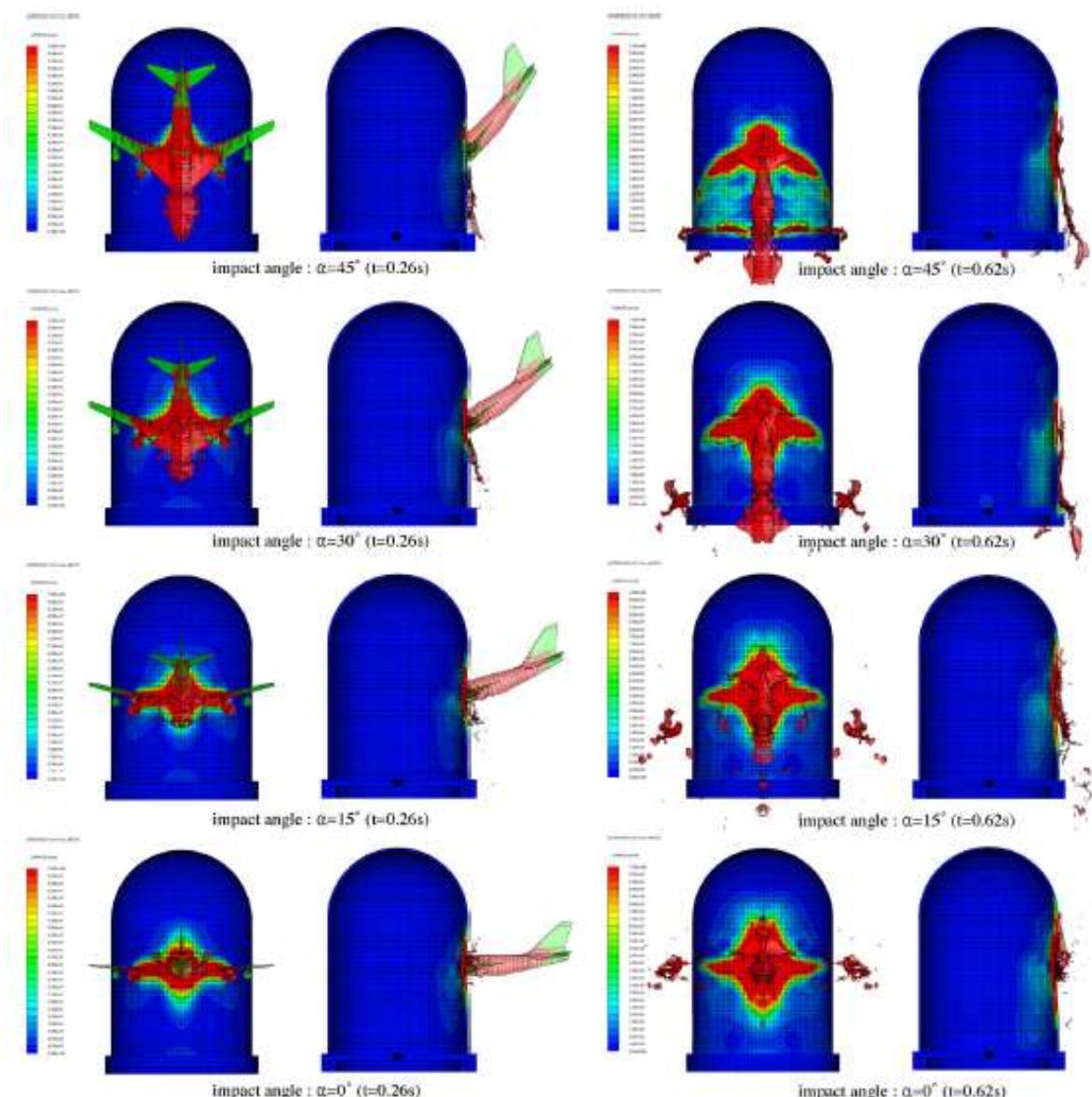
Concrete damage of the containment building according to the impact velocity  
( tendon pre-stress : 0 ton)

## Interaction Methodを用いた解析の研究事例1



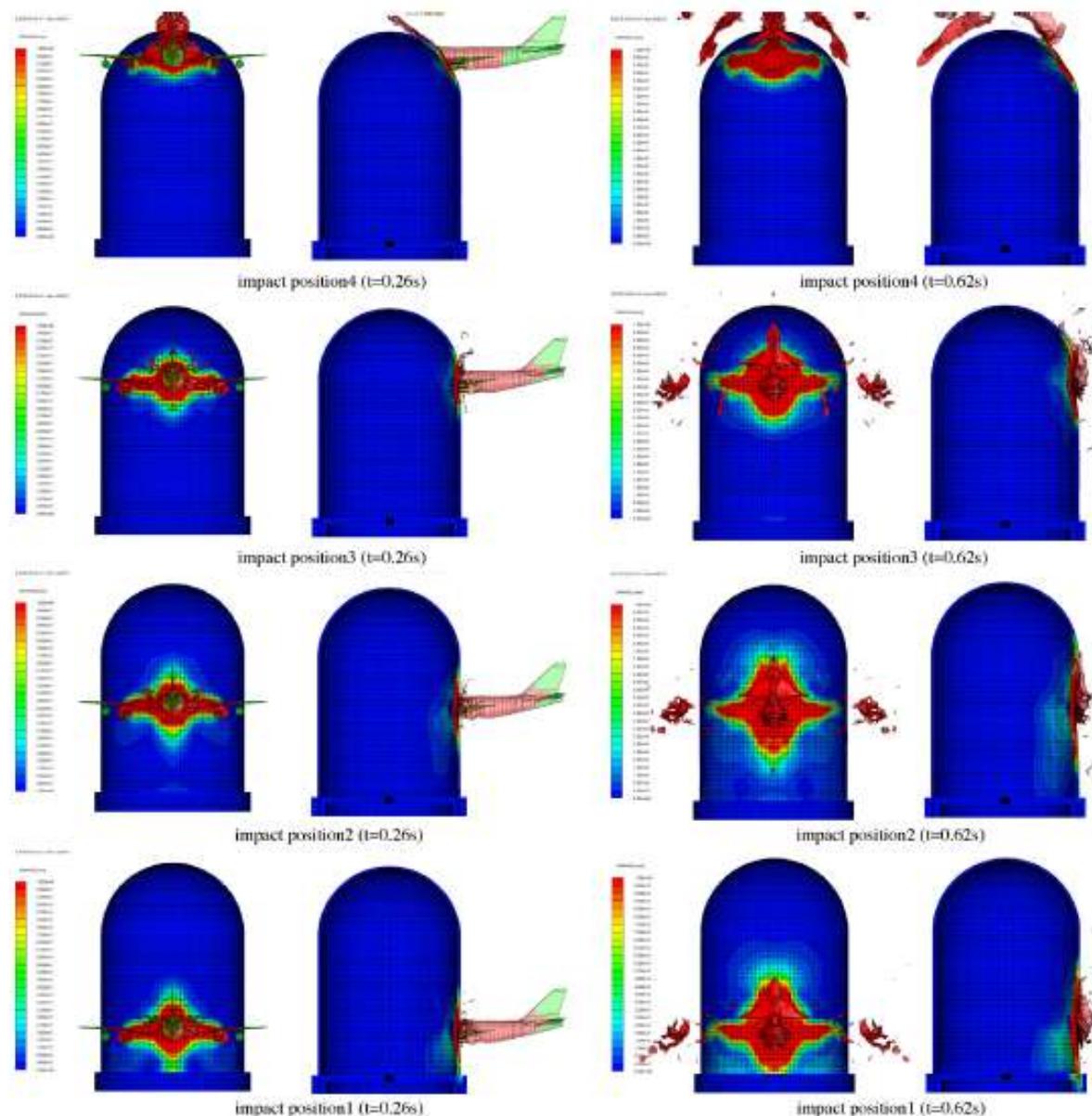
Structural response for different impact angles (tendon pre-stress: 0 ton)

## Interaction Methodを用いた解析の研究事例1



Deformation and concrete damage for different impact angles

## Interaction Methodを用いた解析の研究事例1



Deformation and concrete damage for different impact positions

# まとめおよび今後の課題

## まとめ

- ◆ 既往研究(F4 Phantomを用いた衝撃実験)の紹介
- ◆ 最近の研究動向と事例の紹介



- ◆ 構造解析ソフト技術の発展
- ◆ 航空機衝突の衝撃現象の詳細シミュレーションが可能



## 今後の課題

- ◆ 解析手法の妥当性検証のための実験データの整備
- ◆ 衝撃波応答による重要機器類の振動・破損の評価
- ◆ 航空機燃料の火災による躯体・機器類の損傷評価
- ◆ 既設原子力発電施設の耐衝撃補強システムの構築