

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

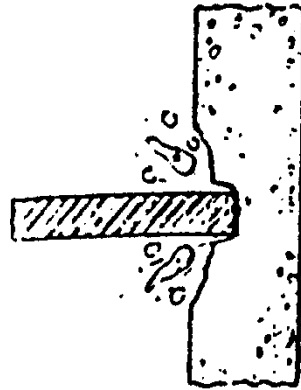
日本原子力研究開発機構
安全研究センター 構造健全性評価研究グループ

坪田 張二

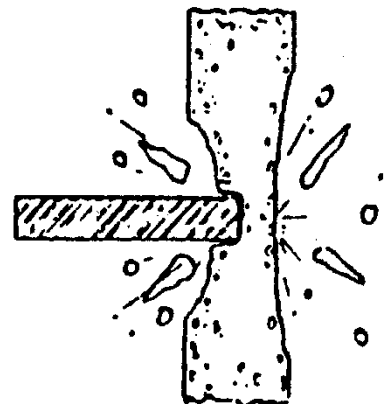
- (1) 航空機衝突に関する既往研究の概要
- (2) 航空機衝突に関する最近の研究動向
- (3) まとめおよび今後の課題

局部損傷

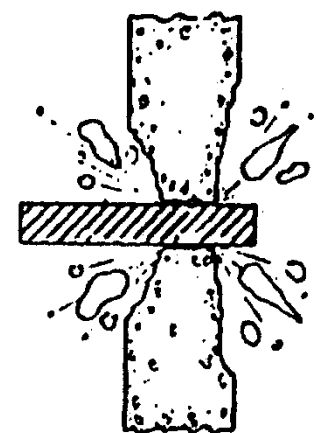
(応力波応答)



貫入



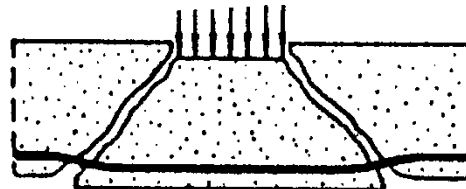
裏面剥離



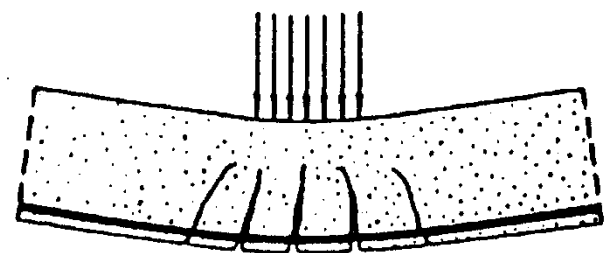
貫通

全体損傷

(弾塑性応答)



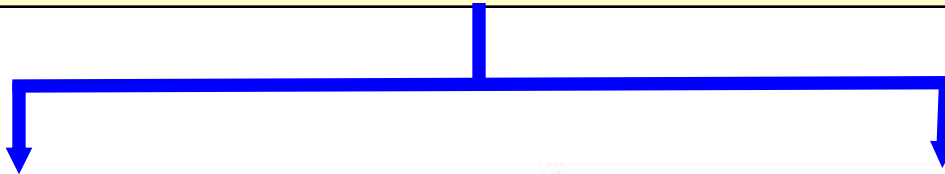
パンチングシア破壊



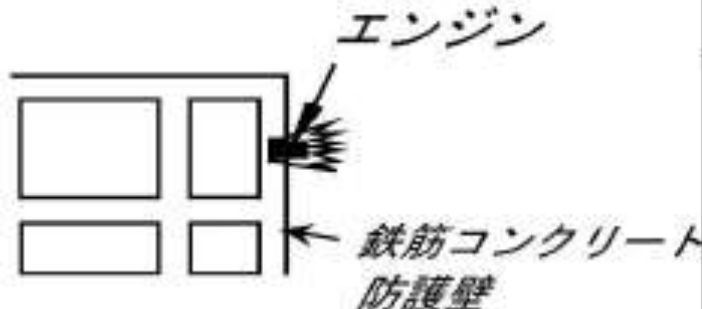
曲げ破壊

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

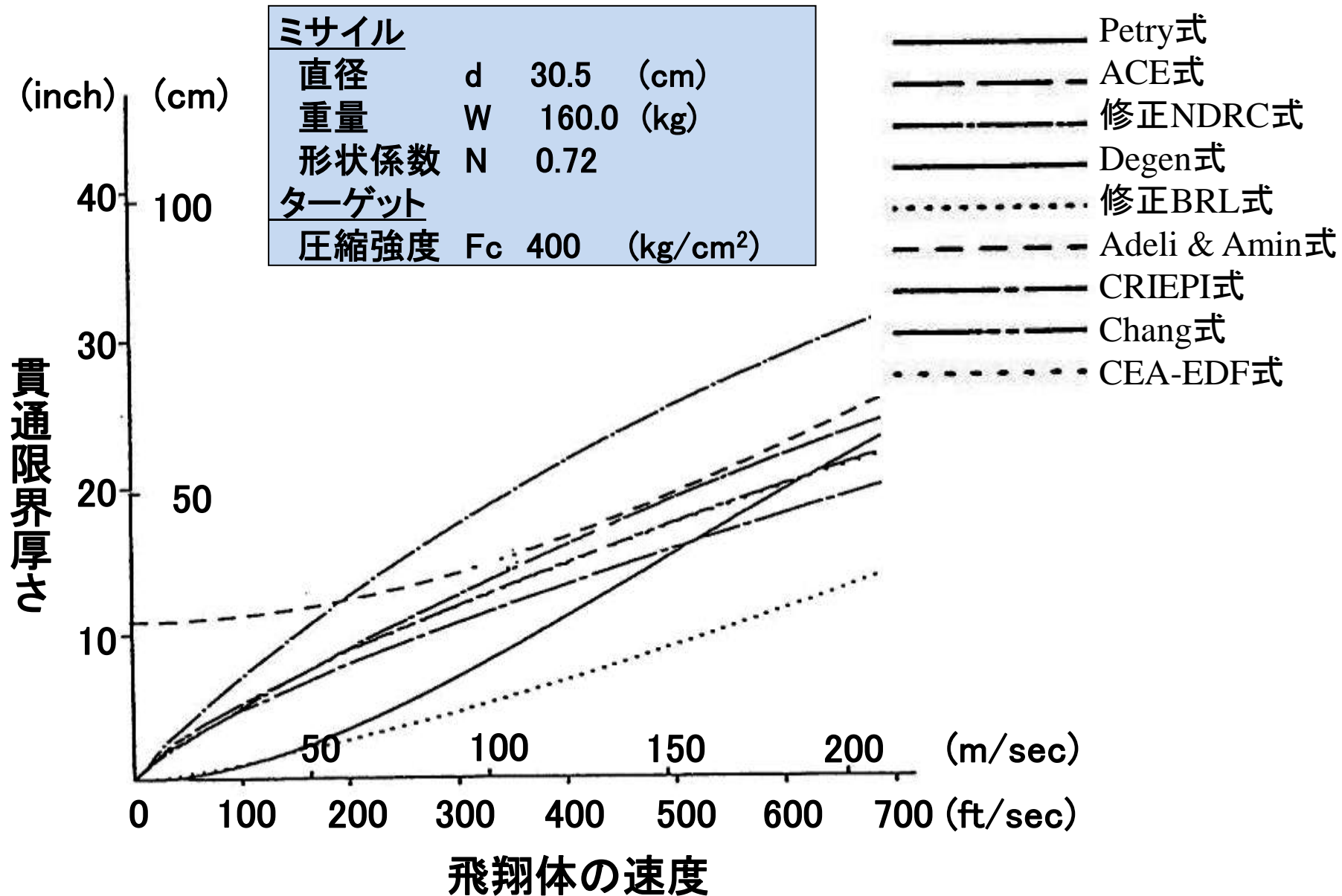


航空機衝突に関する既往研究の概要

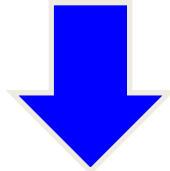
(F4-Phantom戦闘機を対象とした既往研究)

飛翔体の局部損傷評価に関する既往研究と実験目的

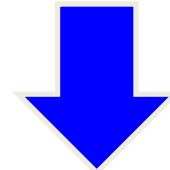
- ◆ 主に軍事研究をベースにした貫通限界厚、裏面剥離限界厚の評価式(実験式)
- ◆ 速度、飛翔体重量、直径、先端形状、コンクリート強度等をパラメータとした実験式
- ◆ 主に対象は剛飛翔体
- ◆ 航空機のエンジンは剛飛翔体ではなく、衝突時に変形する柔飛翔体
- ◆ 柔飛翔体に対する貫通限界厚、裏面剥離限界厚の評価式(実験式)はない
- ◆ エンジンを対象とした局部損傷評価式の確立を目的として小型・中型・大型実験を計画・実施



小型実験
(縮尺1/7.5)



中型実験
(縮尺1/2.5)



大型実験
(実大実験)

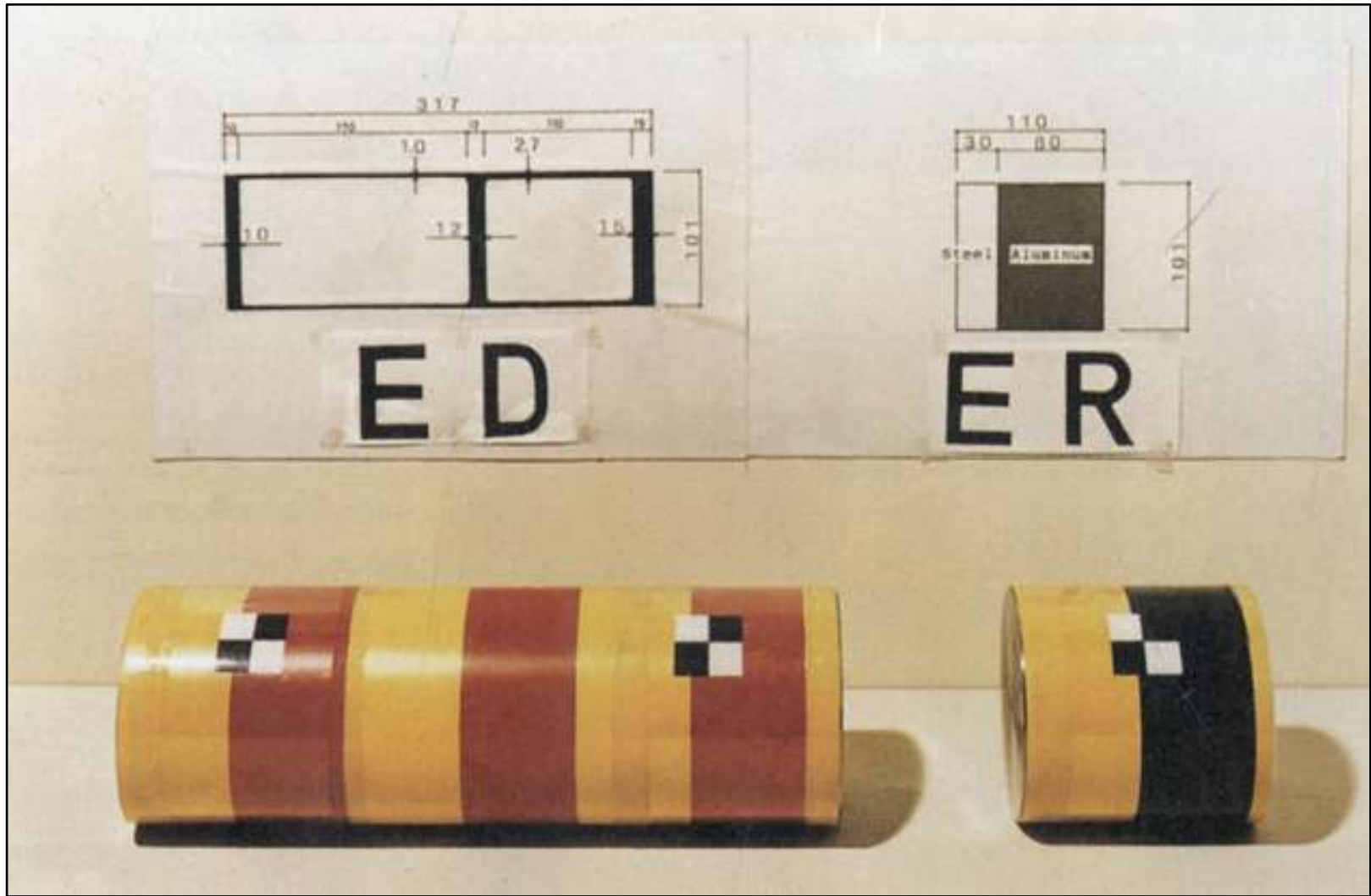
小型衝撃実験（1987年：鹿島技術研究所で実施）

- 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



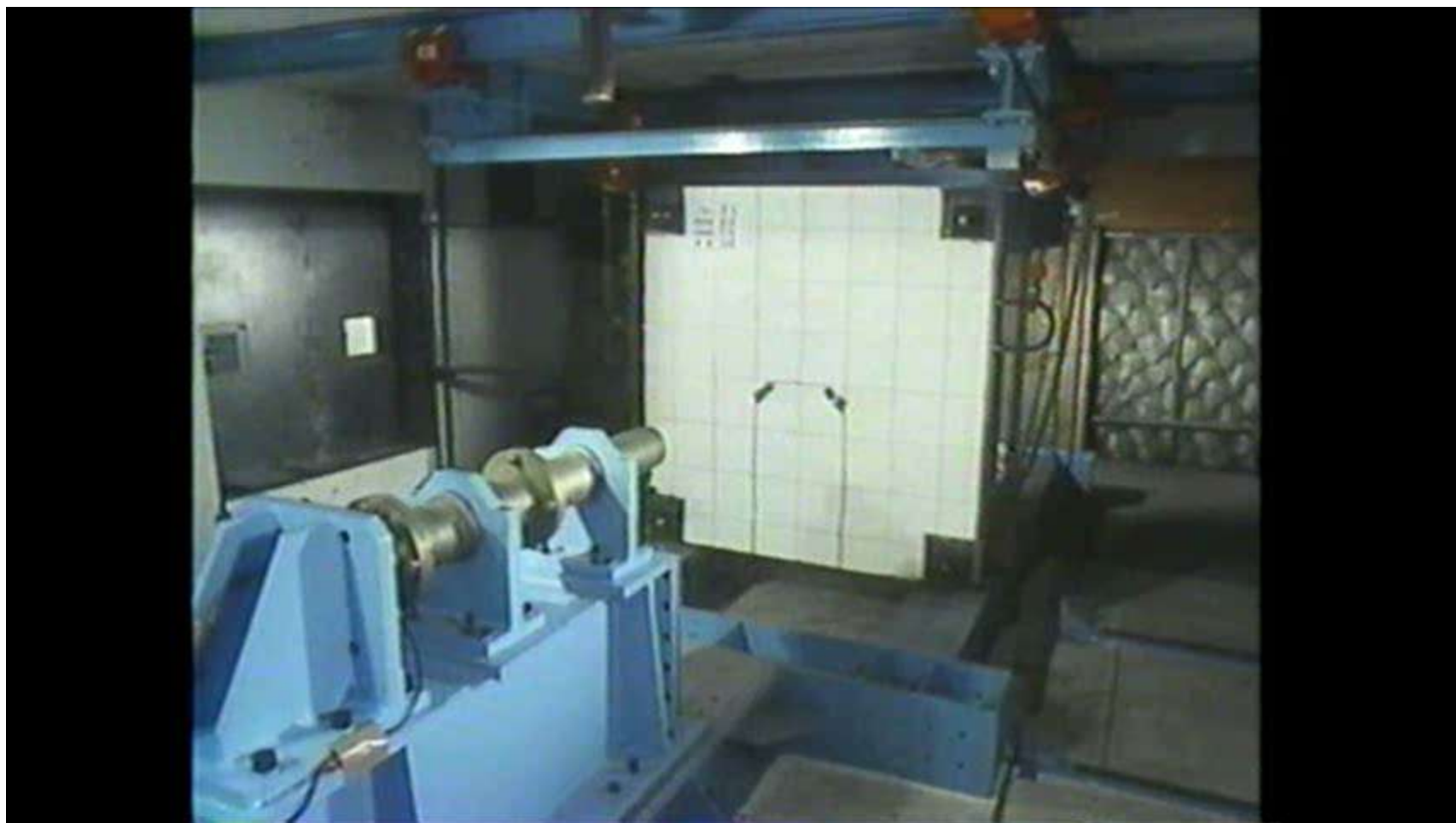
実験装置

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

飛翔体重量: 100kgf

飛翔体直径: 300mm

衝突速度: 100, 150, 215, 250m/s

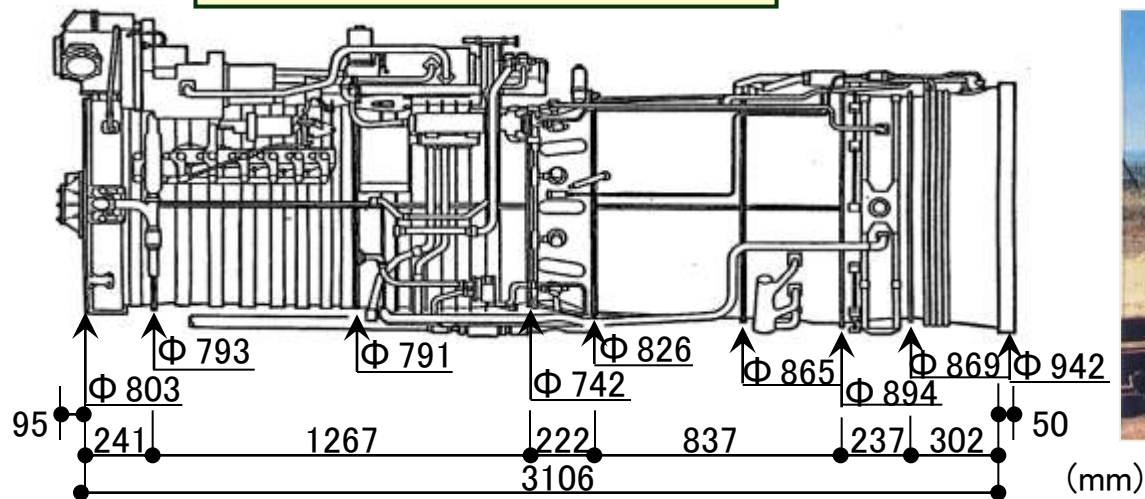
試験体: 4m × 4m

版厚: 40cm ~ 100cm

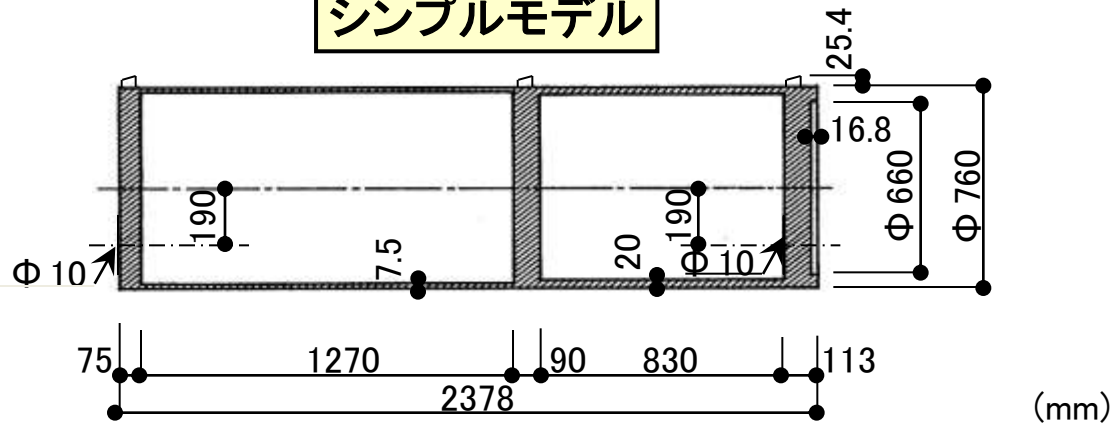


空型実験で用いた
飛翔体モデル

大型実験で用いた飛翔体



シンプルモデル



航空機エンジンの大型実験の衝撃実験方法

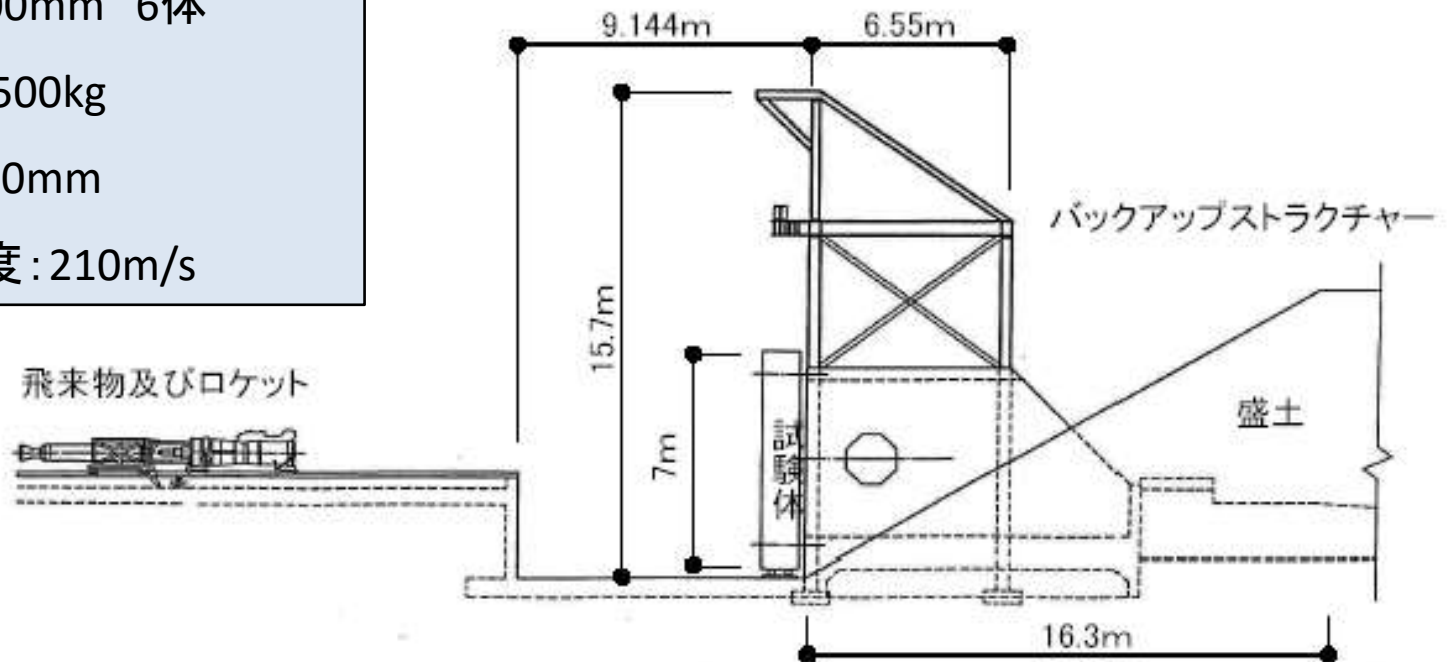
試験体 : 7.0m × 7.0m

厚さ : 900 ~ 1,600mm 6体

飛翔体重量 : 1.500kg

飛翔体直径 : 760mm

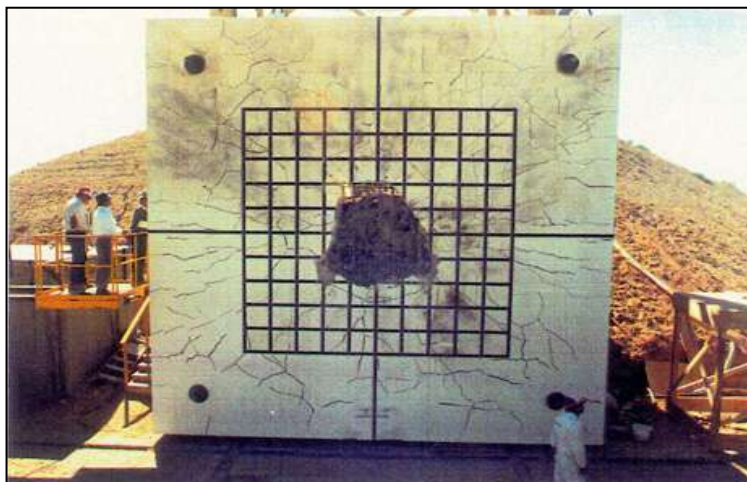
飛翔体衝突速度 : 210m/s





航空機エンジンの大型実験の衝撃実験結果

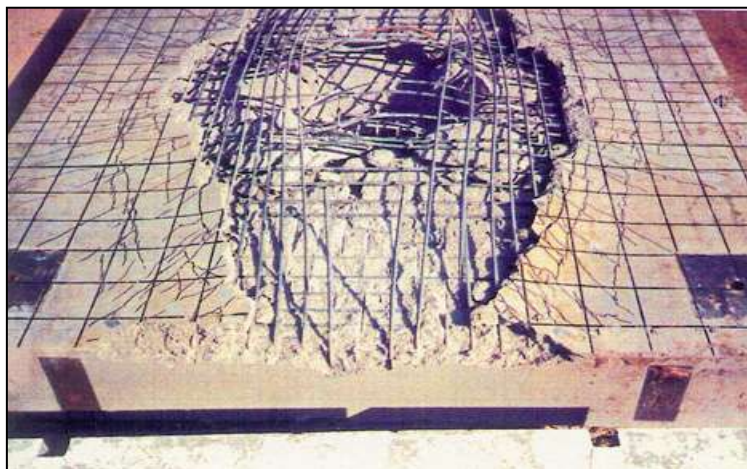
No.1試験体（90cm厚）の衝撃実験結果



前面



上面

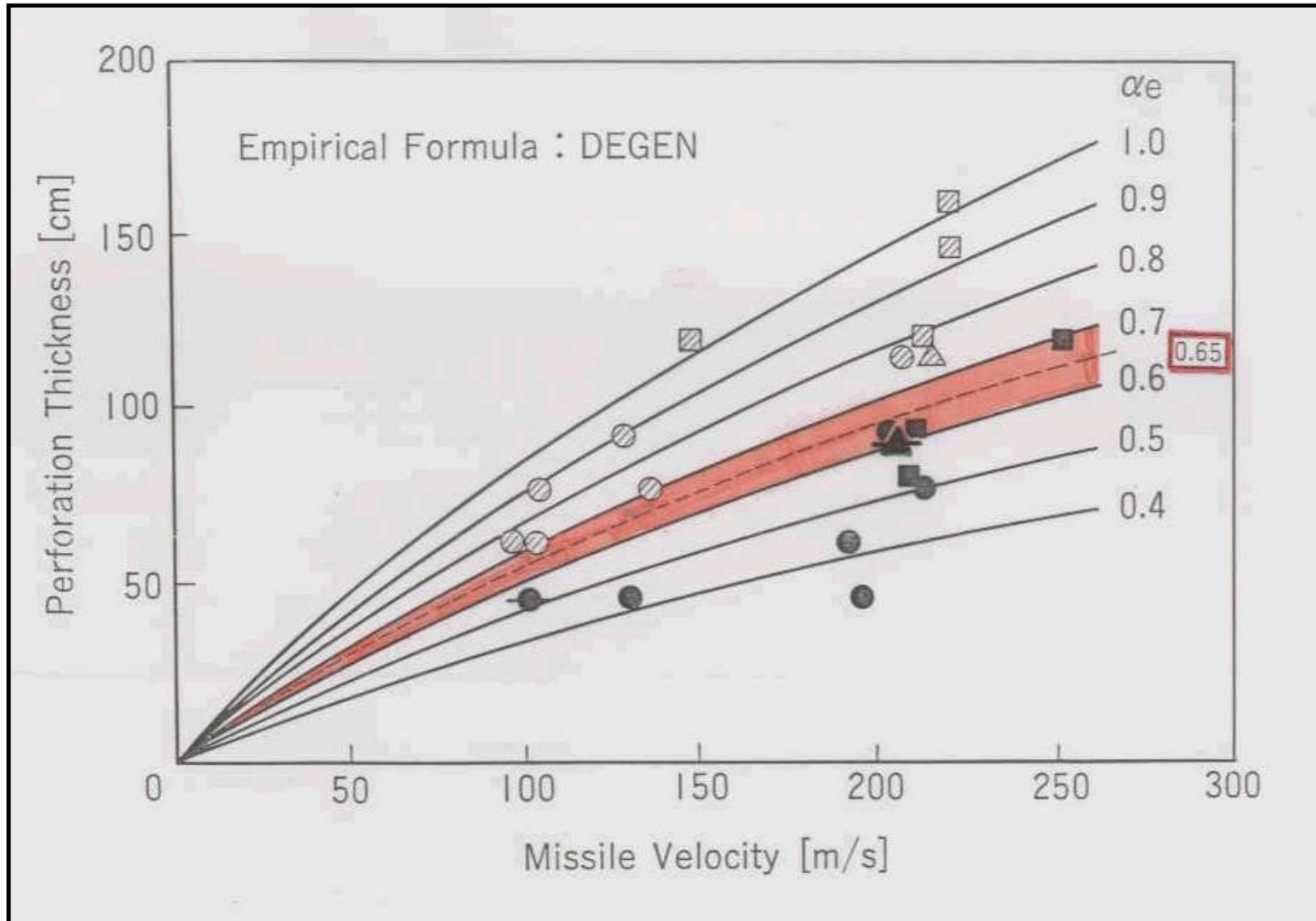


裏面

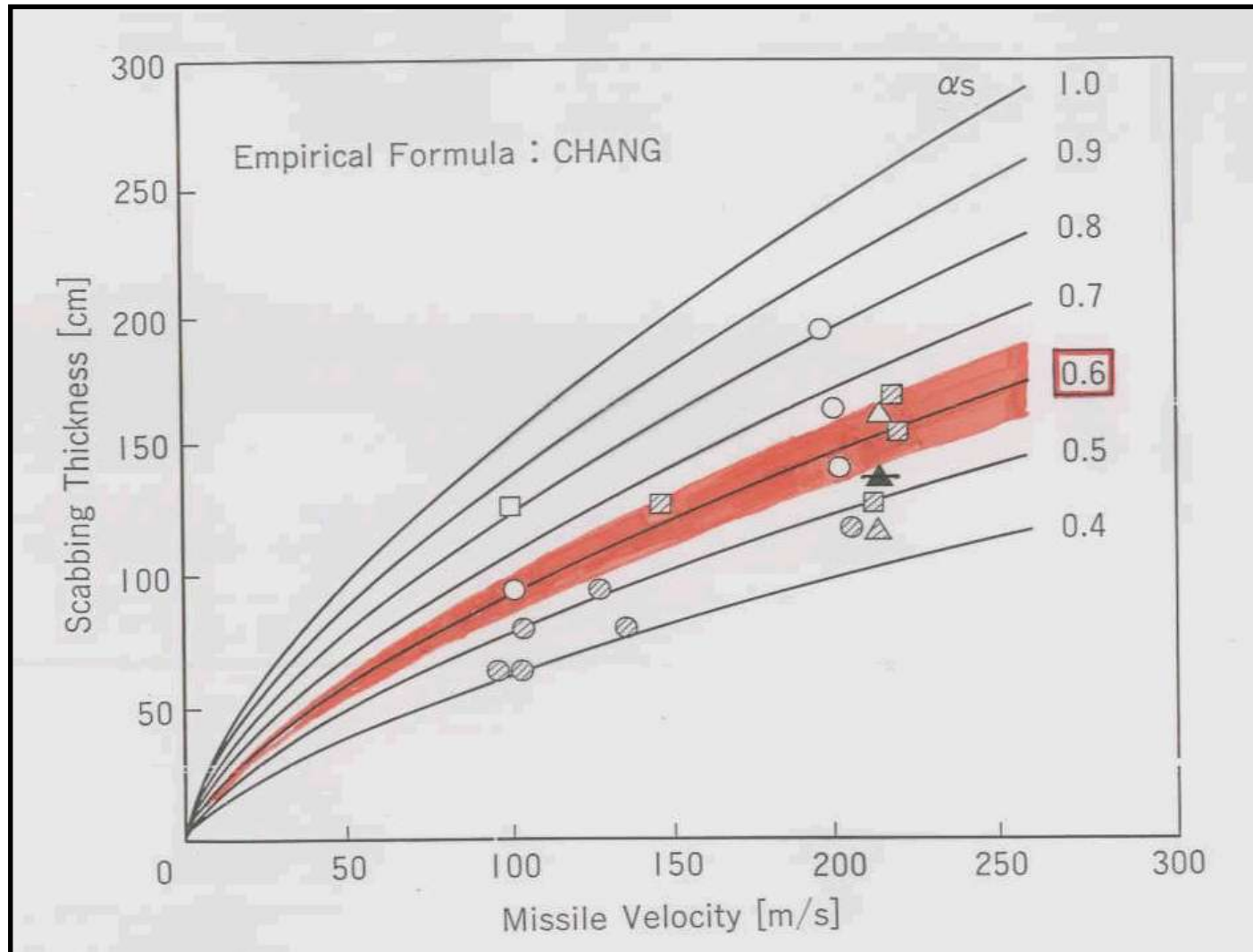


エンジン

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 = $\alpha_p \times (\text{Degen式で算定される限界厚さ})$
ただし、 $\alpha_p = 0.65$
- ◆裏面剥離限界厚さ = $\alpha_s \times (\text{Chang式で算定される限界厚さ})$
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:

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

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

$$P_b[x(t)] : \text{機体をcrushあるいは変形させるに必要な力}$$

$$\mu[x(t)] : \text{単位長さ当たりの機体の質量}$$

$$v(t) : \text{機体のuncrushed 部分の速度}$$

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

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

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

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

ただし

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



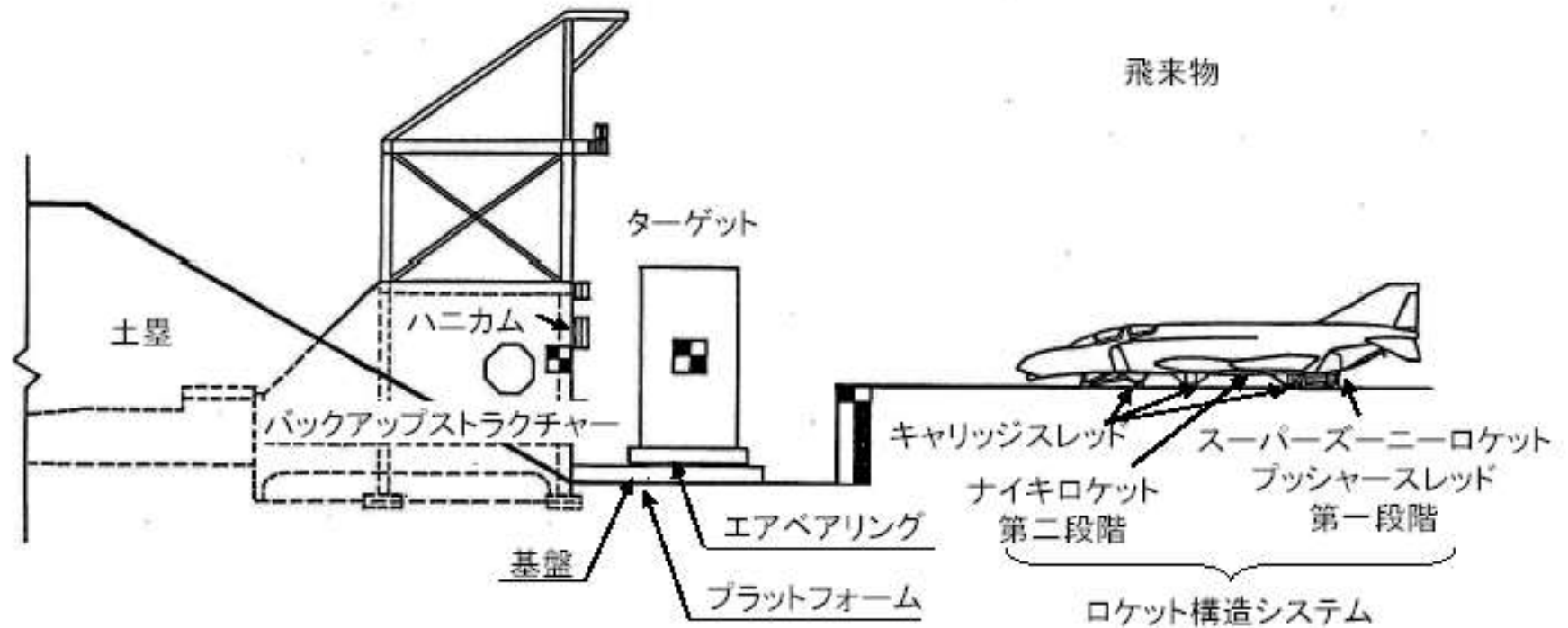
RIERA Model

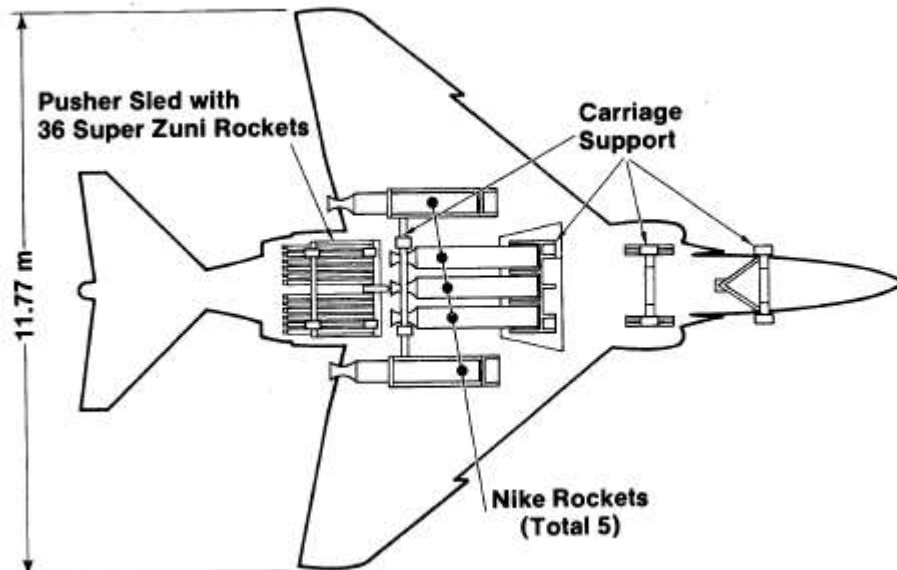
$Pc[x(t)]$: 機体をcrushあるいは変形させるに必要な力

$\mu[x(t)]$: 単位長さ当たりの機体の質量

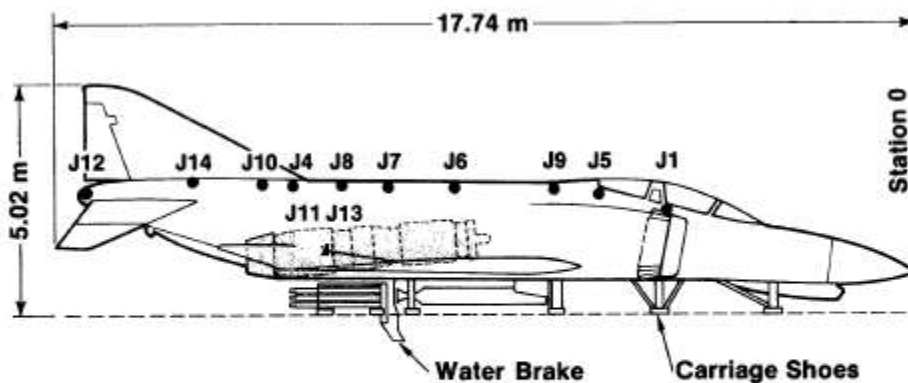
$V(t)$: 機体のuncrushed 部分の速度

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

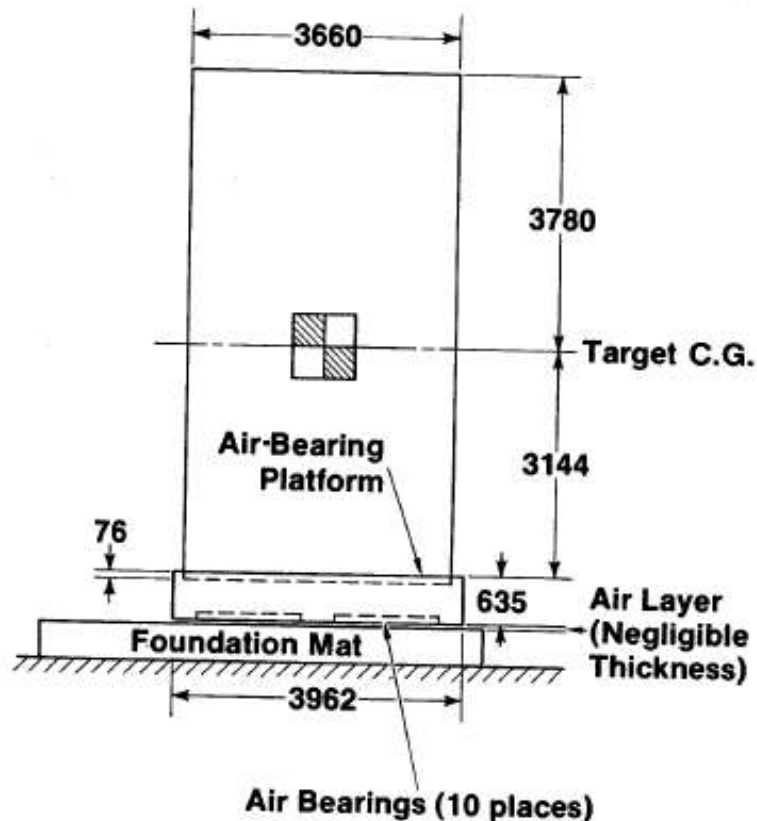
機体重量: 12.7ton

燃料(水): 4.8ton

ロケット等: 1.5ton

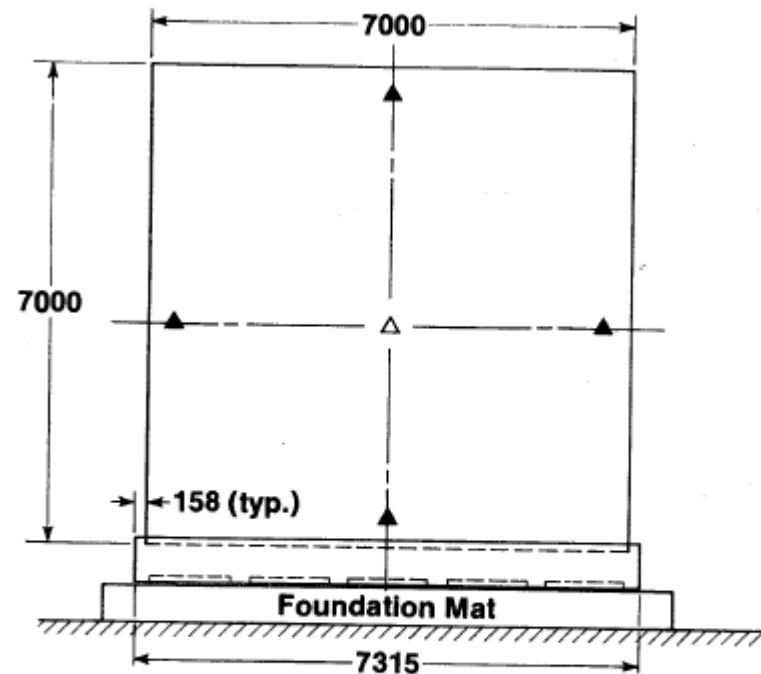
衝突速度: 215m/sec

Target (RC版)の構造と計測器



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

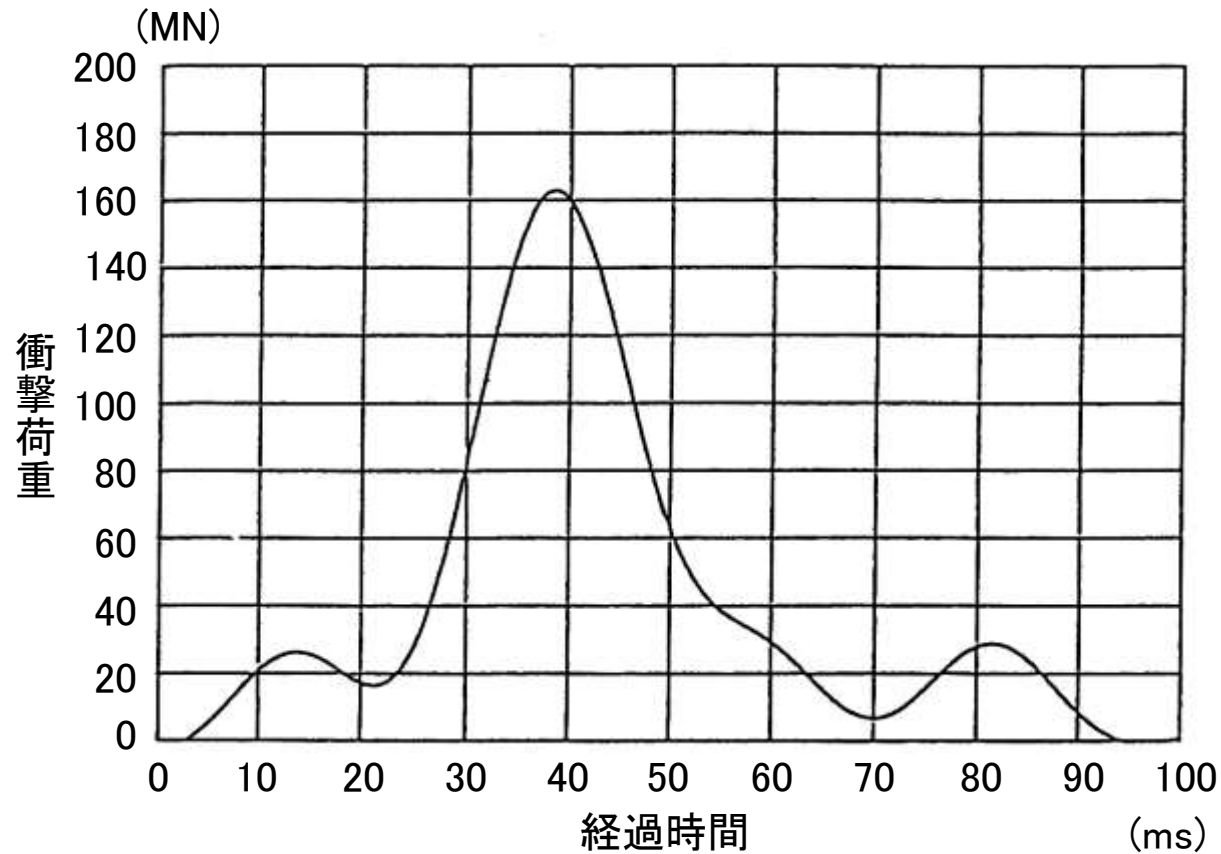
総重量: 469ton

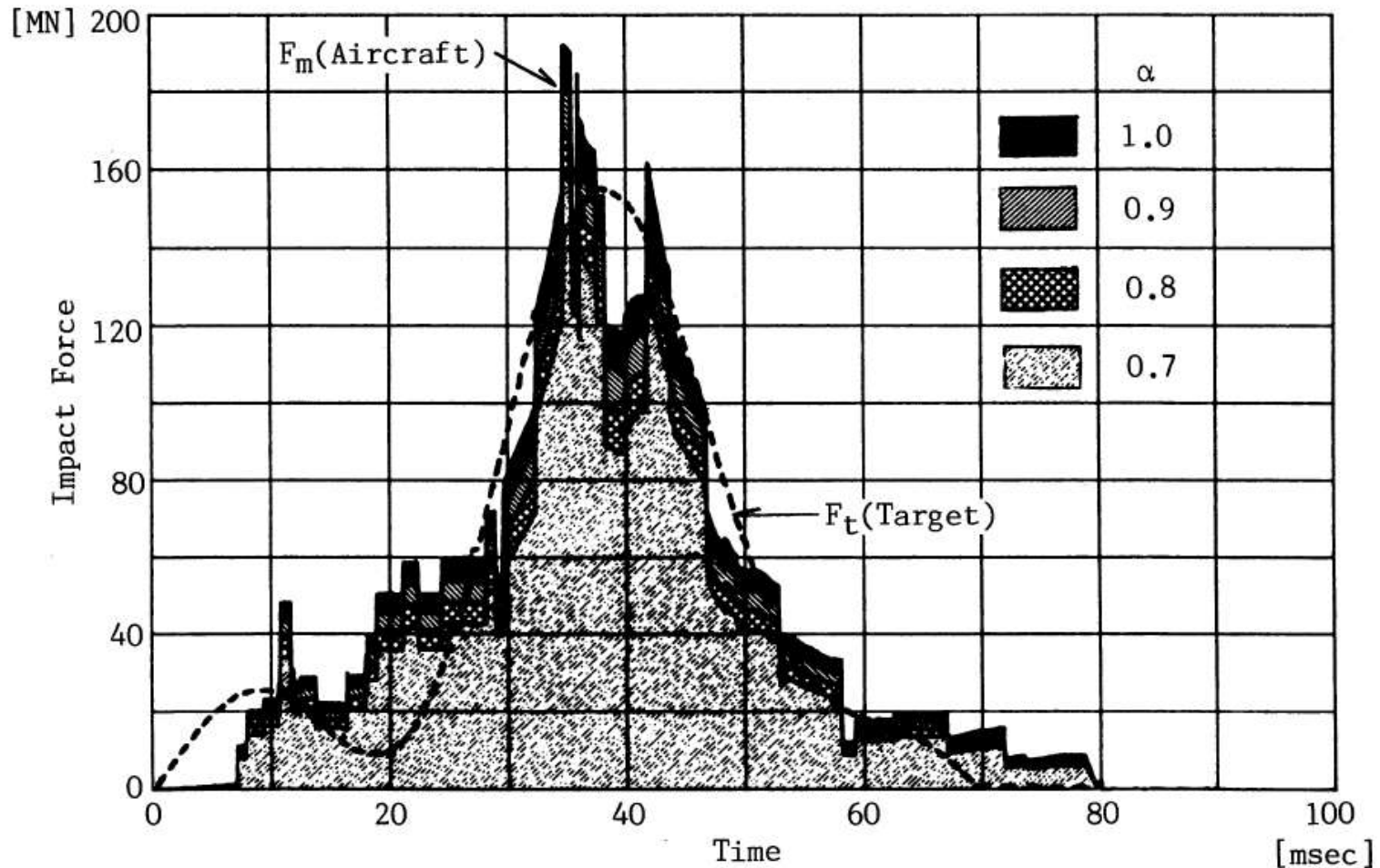


▲ Accelerometers,
Velocity Gages,
Displacement Gages
△ Accelerometer



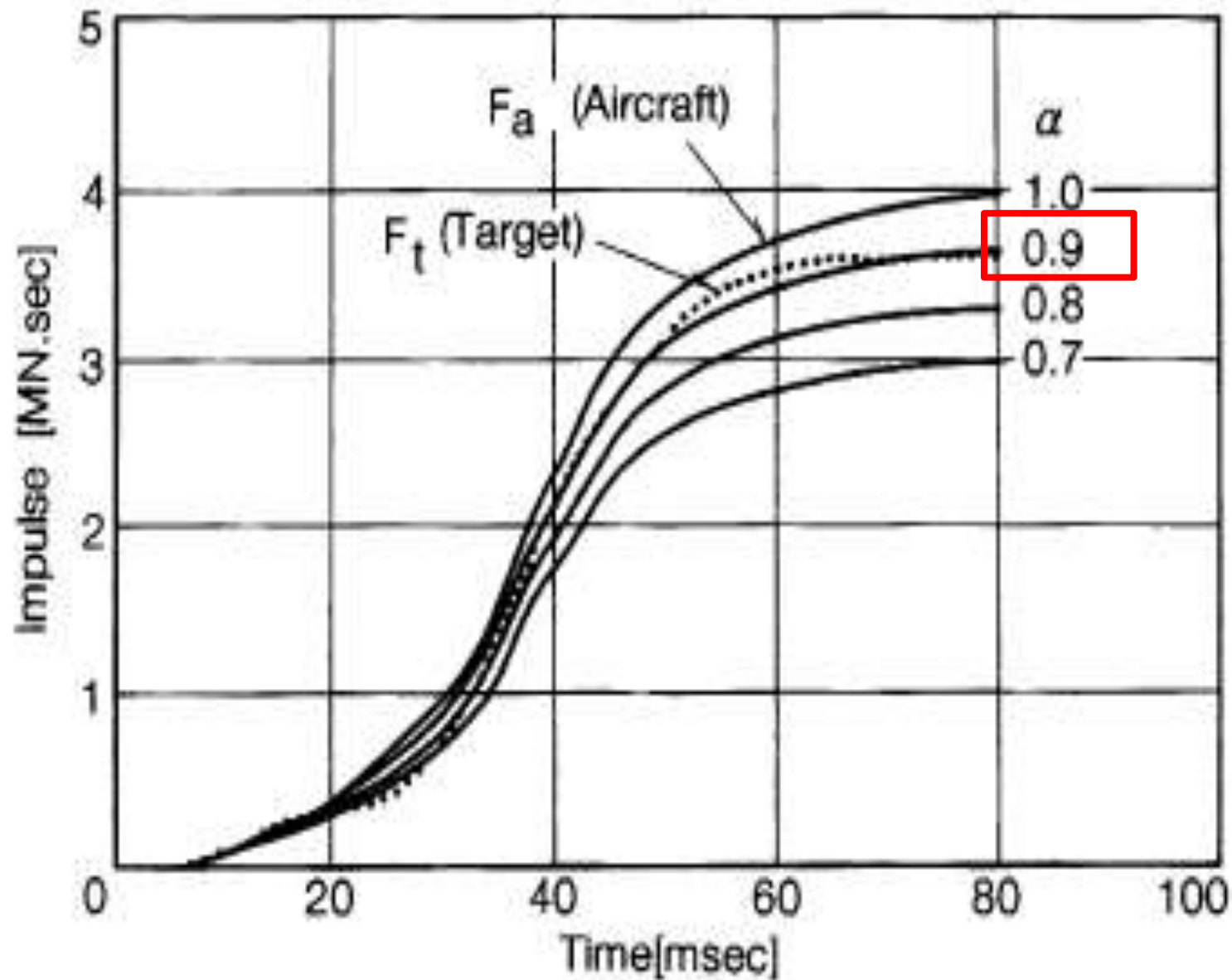
ターゲットの応答計測結果から求めた衝撃荷重: $F_t(\text{Target})$

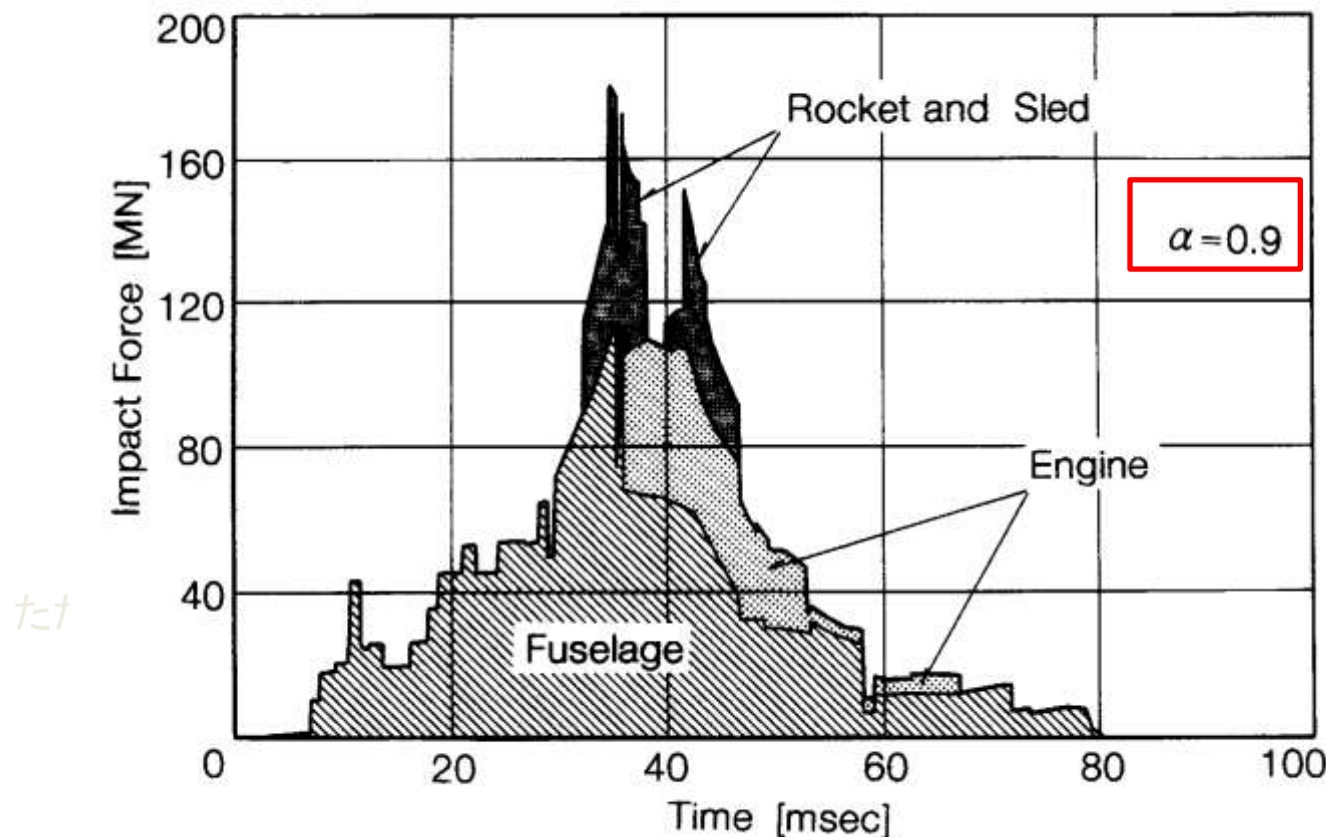




$$F(t) = Pb[x(t)] + \alpha \mu[x(t)] \cdot V(t)^2$$

α : Coefficient of Effective Mass の導入 (修正RIERA式)





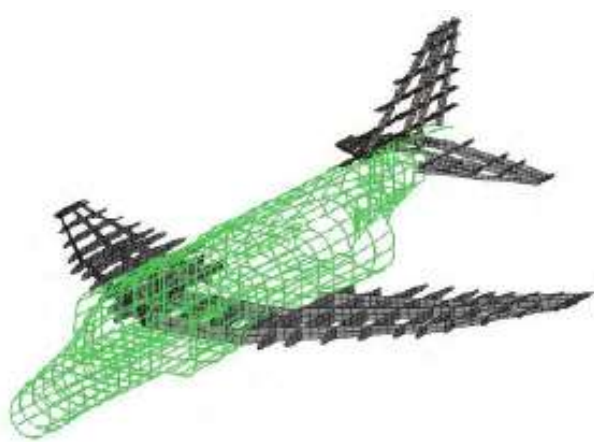
米国 NEI 07-13 Rev.8P

“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. 22th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, Div. IV



Frame

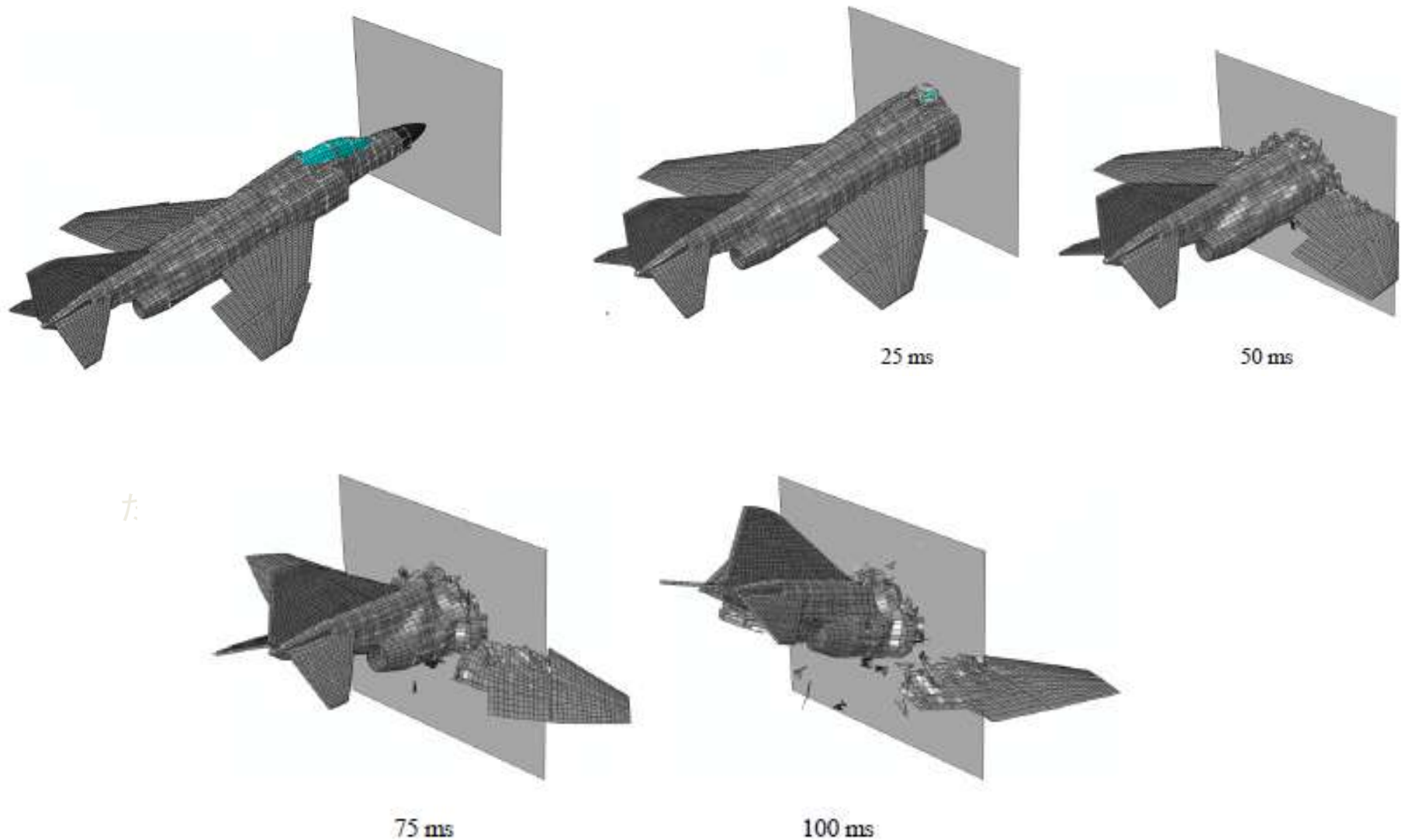


Cross Section

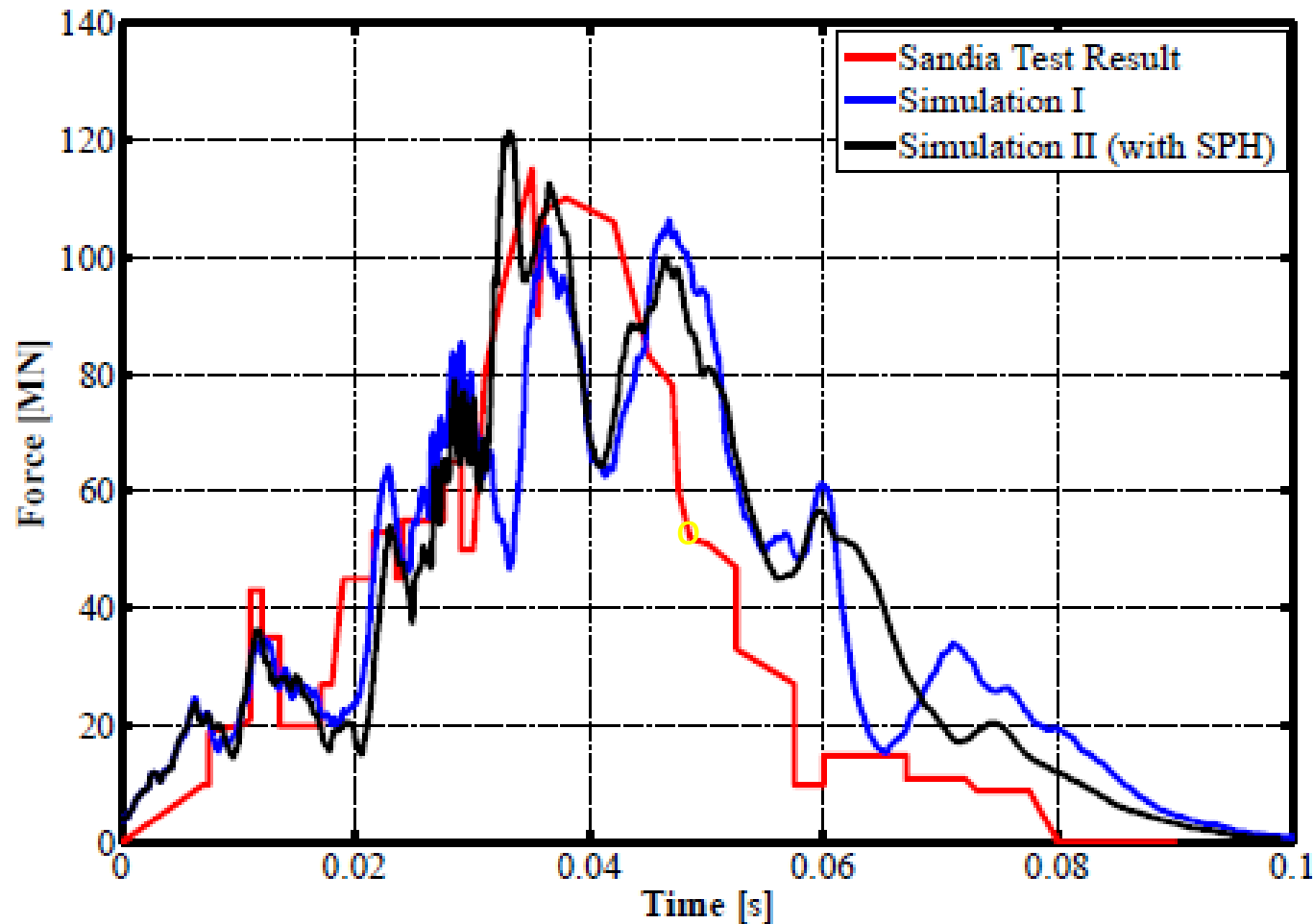


Isomeric View

F4-Phantom のモデル化



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

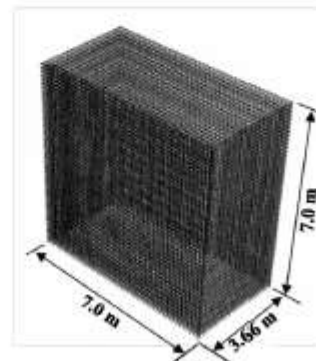
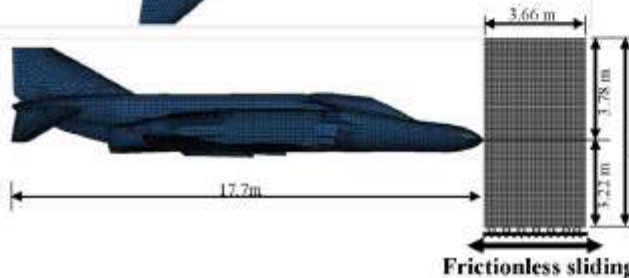
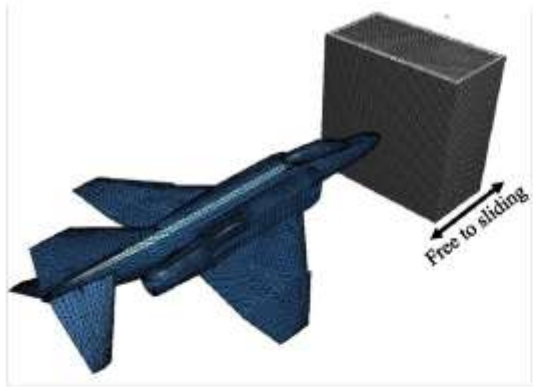


Comparison of load-time-function for measurement and simulation

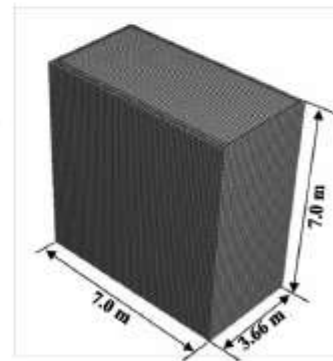
Variant I: Discrete elements

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



Reinforced bar mesh



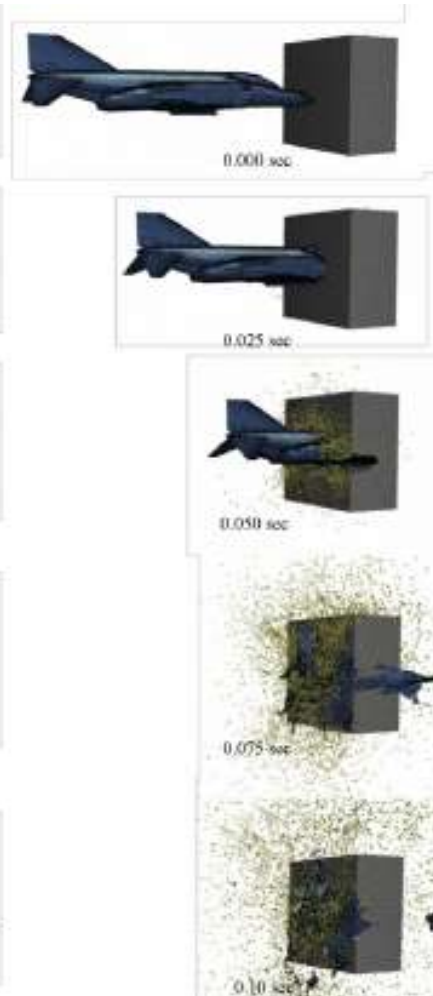
Reinforced bar & concrete mesh



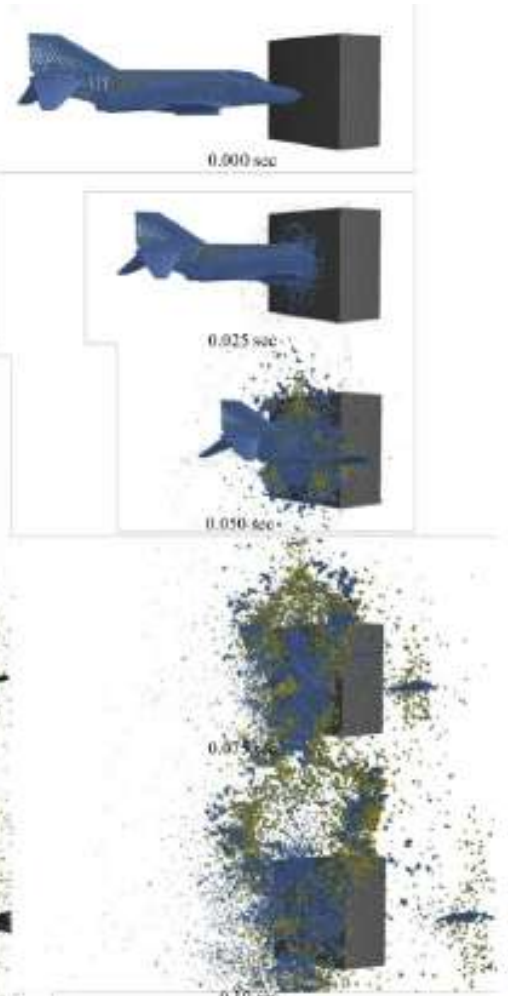
(<https://share.sandia.gov/news/resources/video-gallery/index.html>)



Lagrangian Model



Hybrid Model

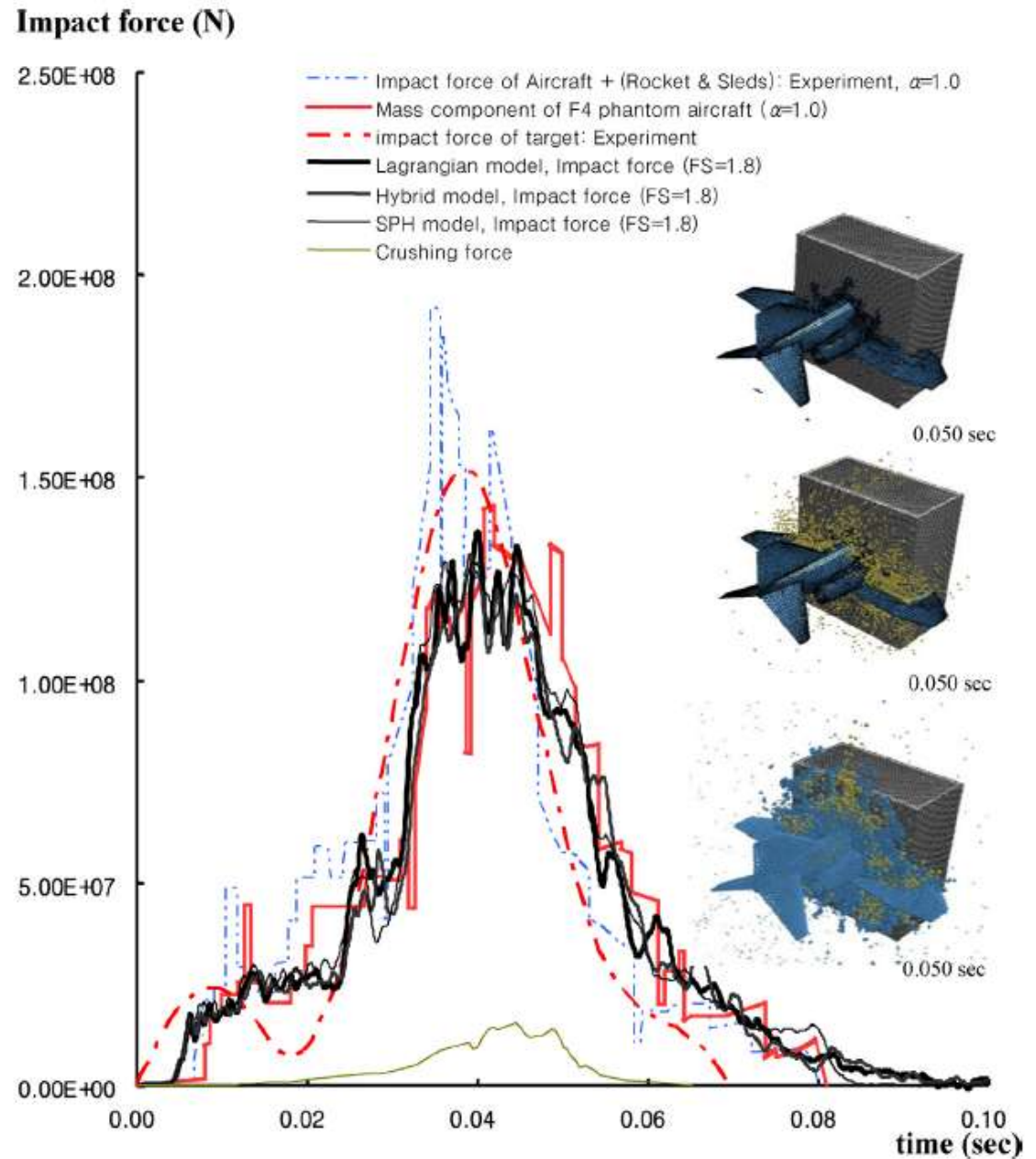


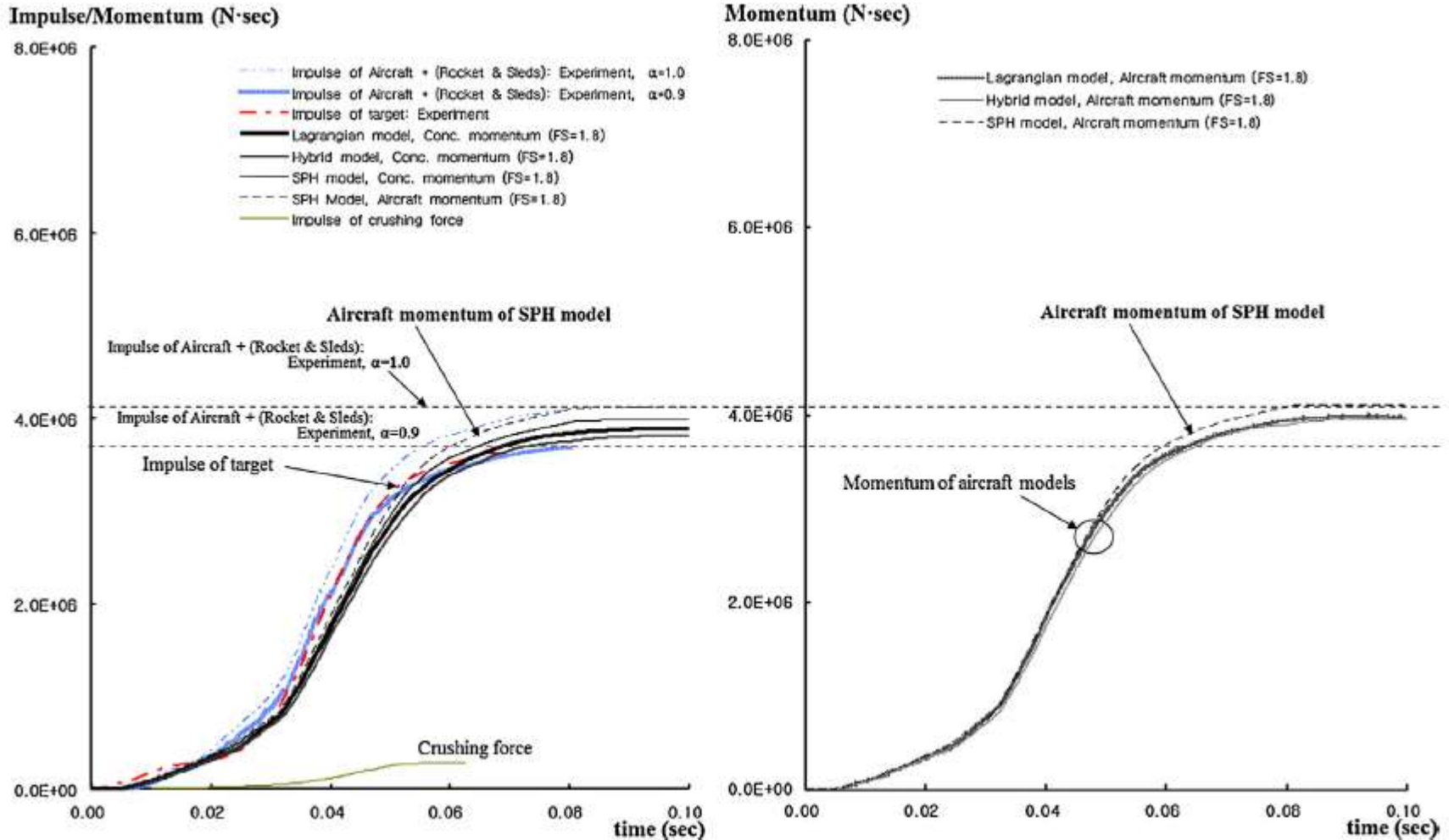
SPH Model

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

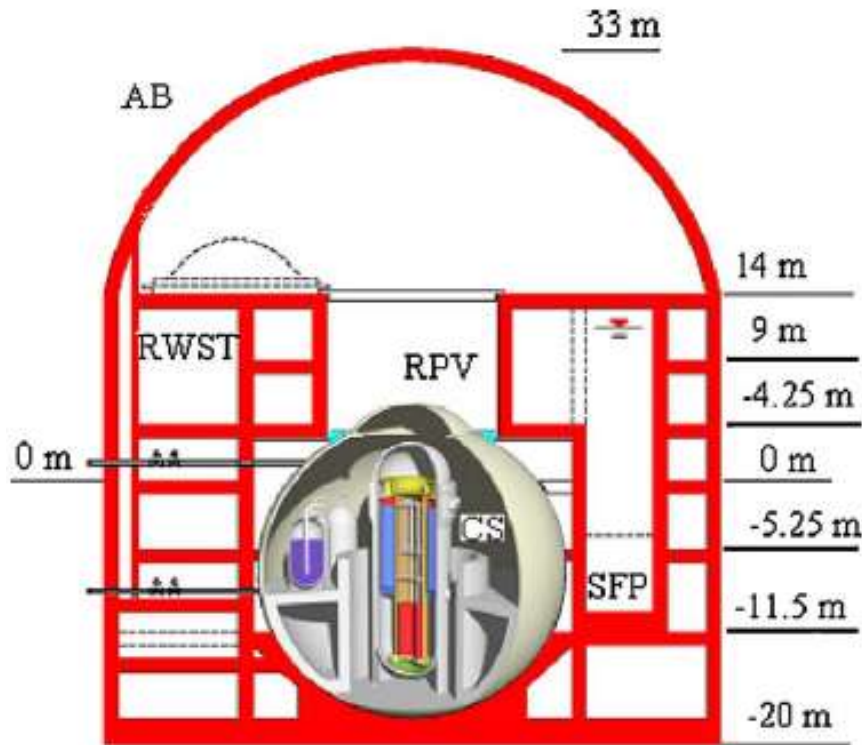




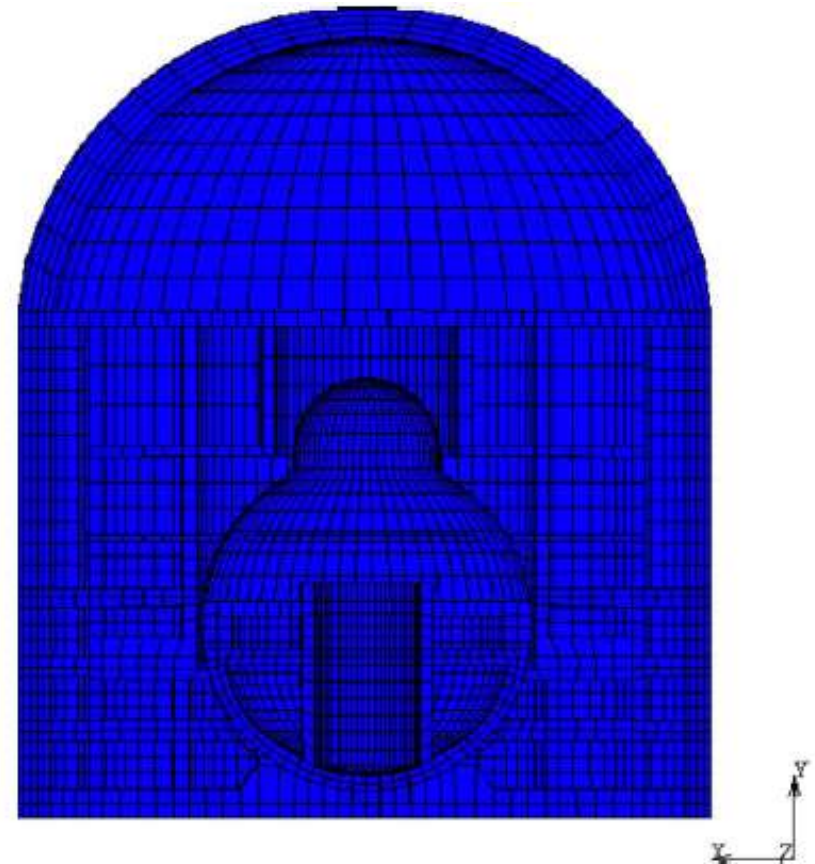
Impulse/momentum of the concrete wall and aircraft models

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

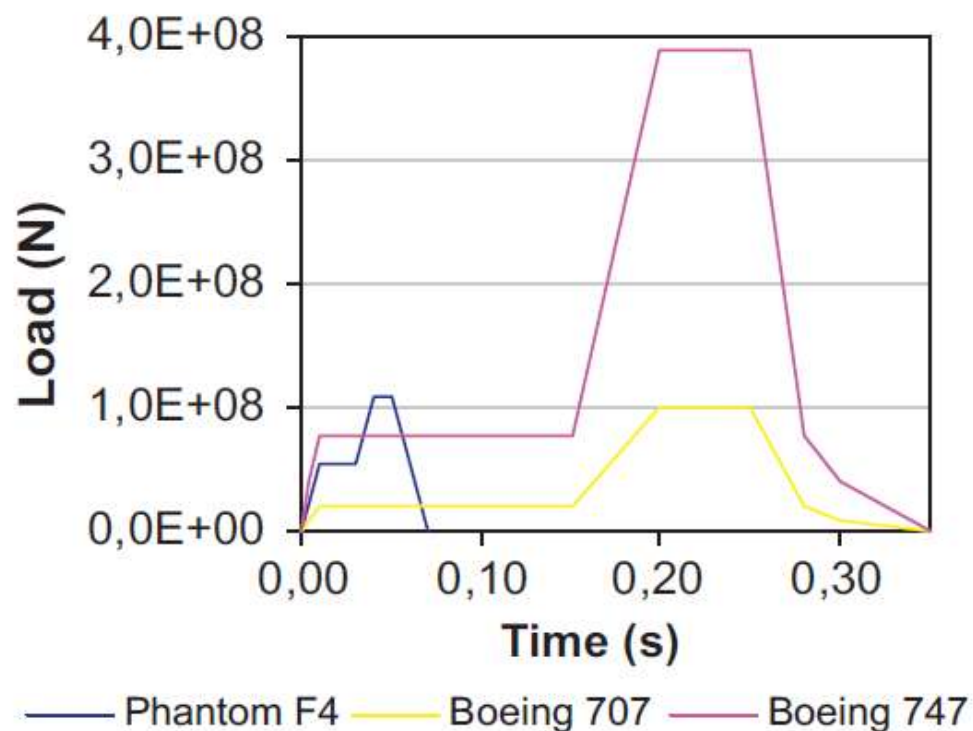


IRIS CB



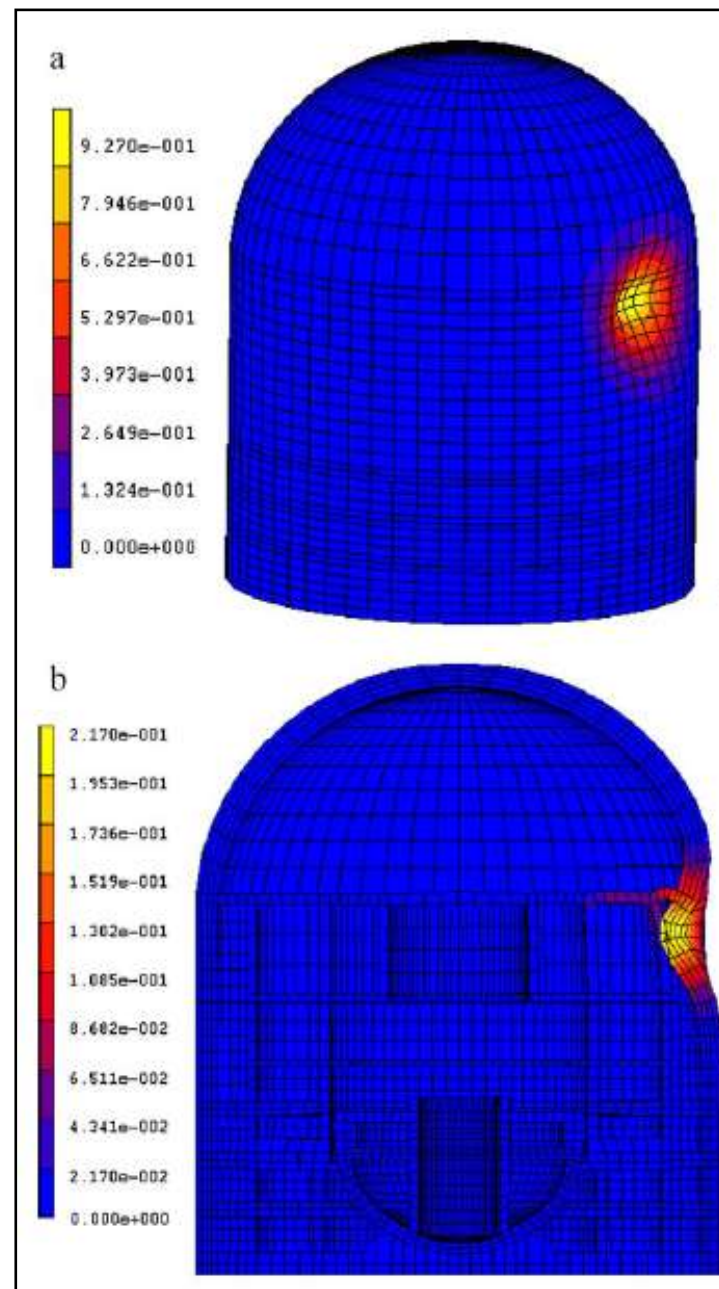
NPP outer containment model

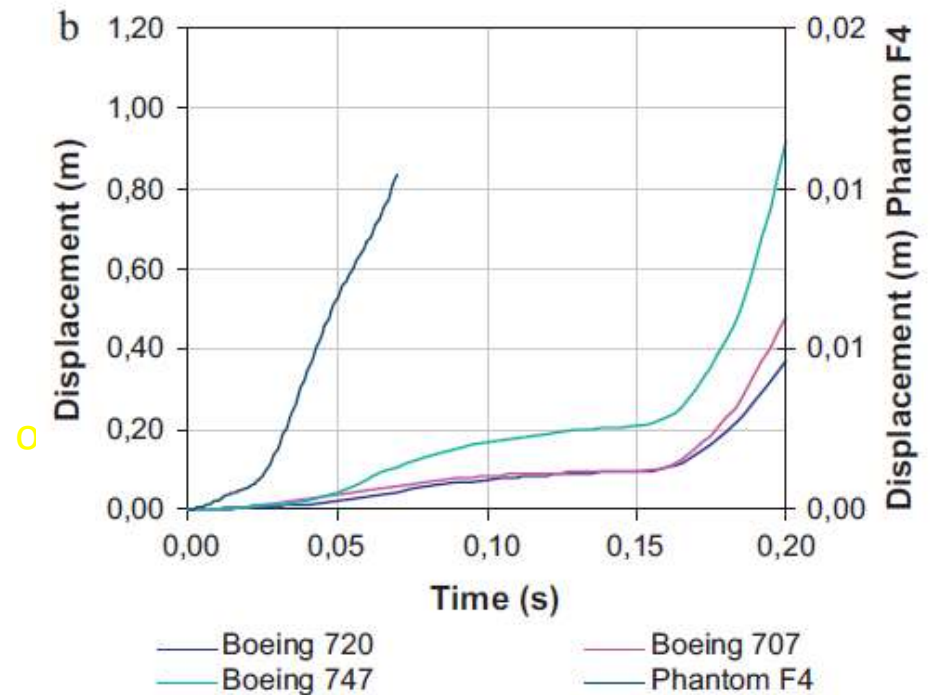
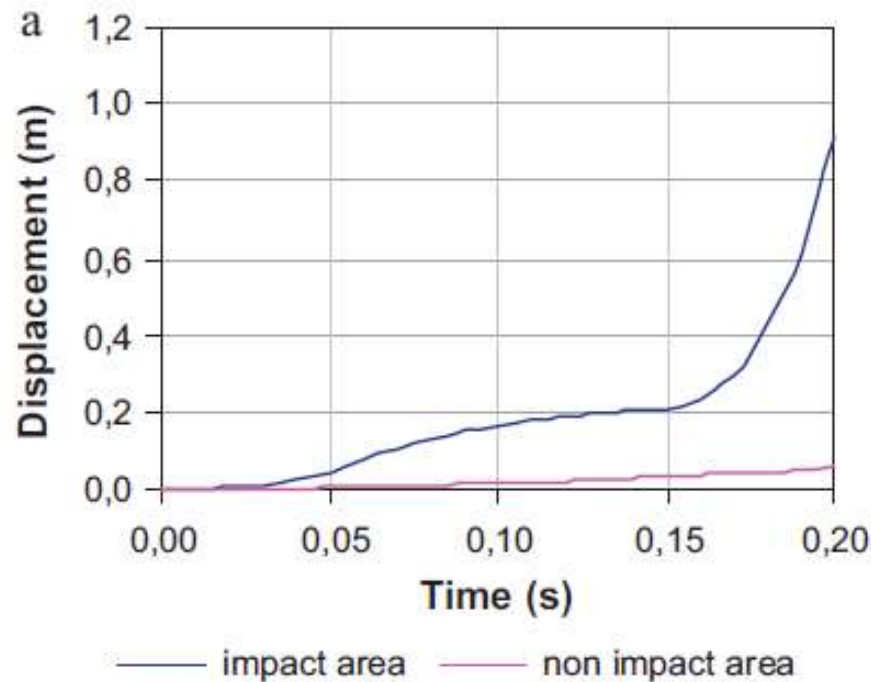
Force-History Methodを用いた解析の研究事例1



Load Time Functions

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

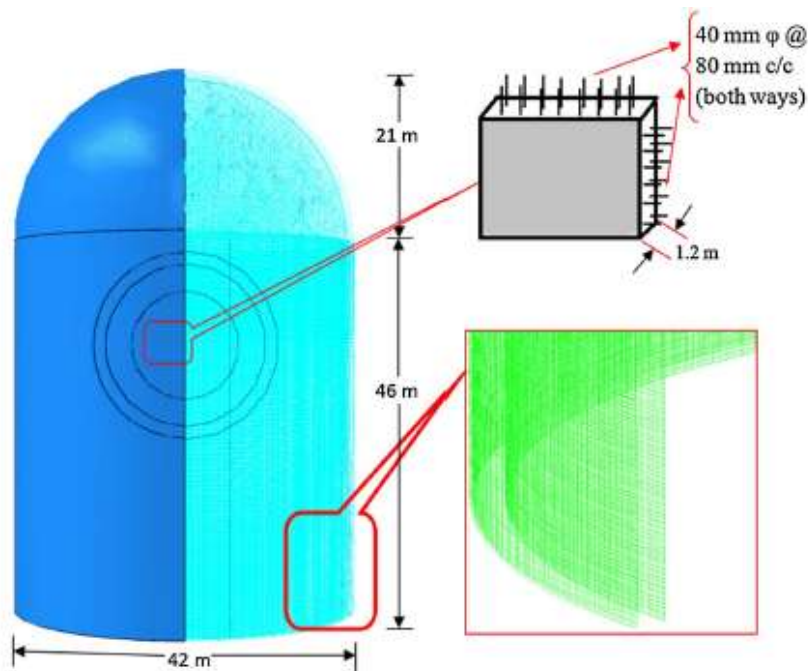




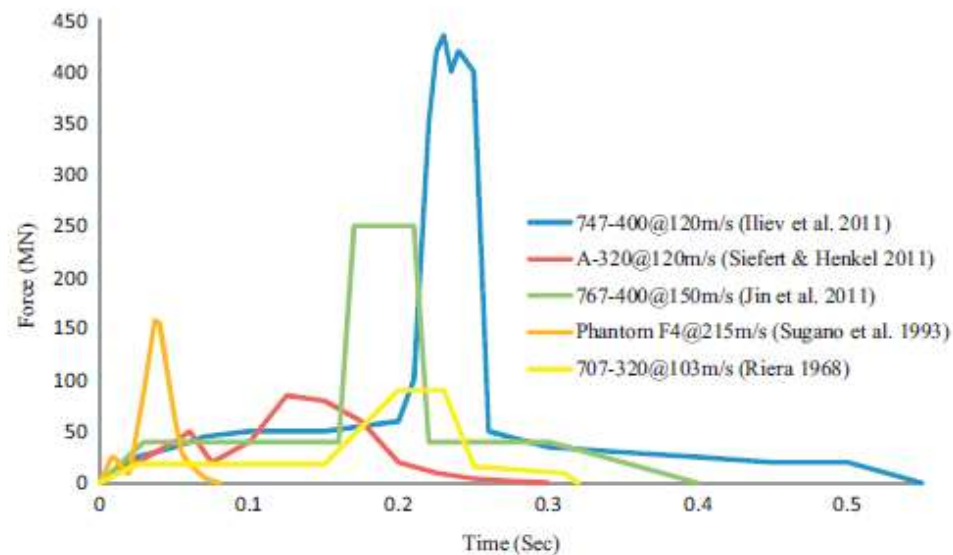
Penetration depth: (a) at the impacted /not impacted walls,
(b) for different aircraft type

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

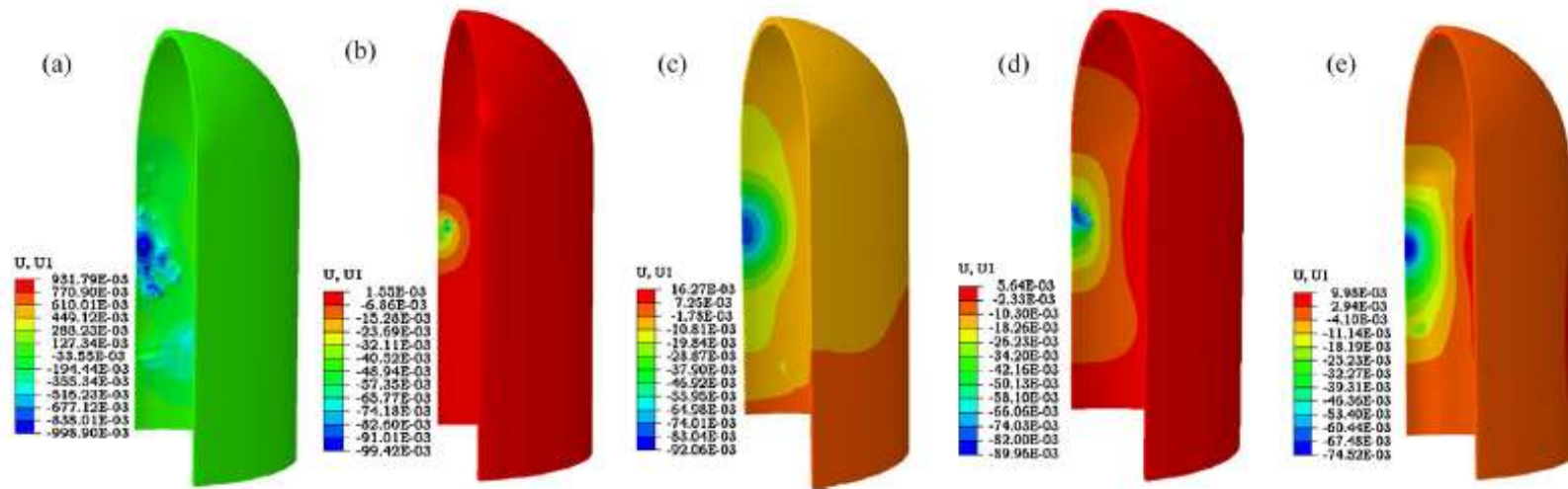
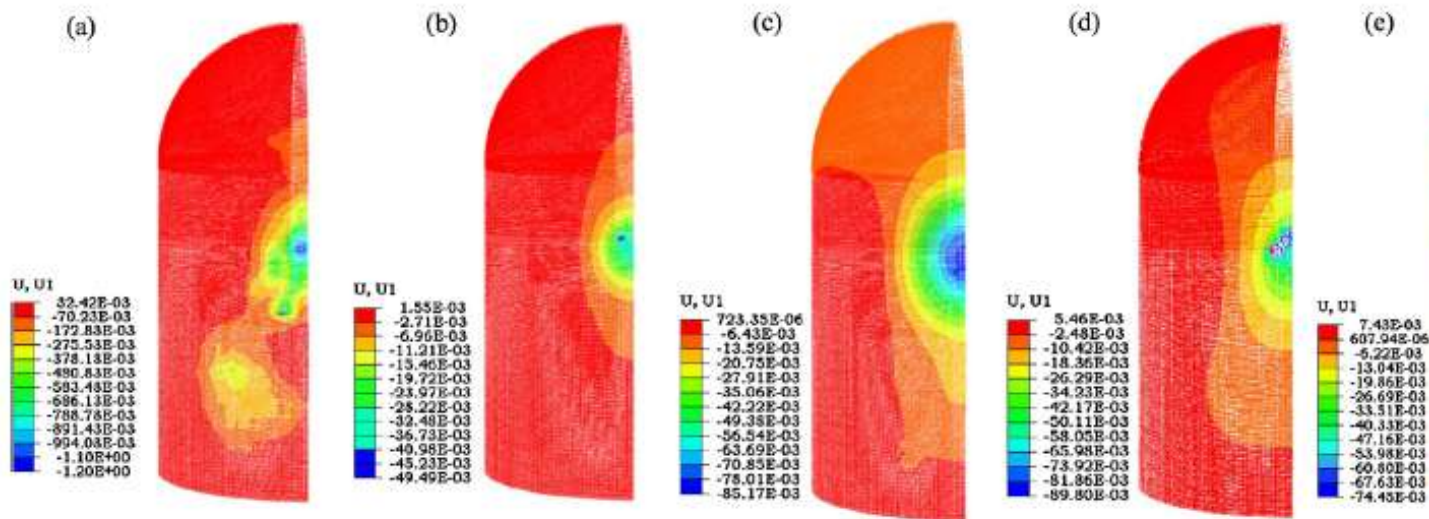
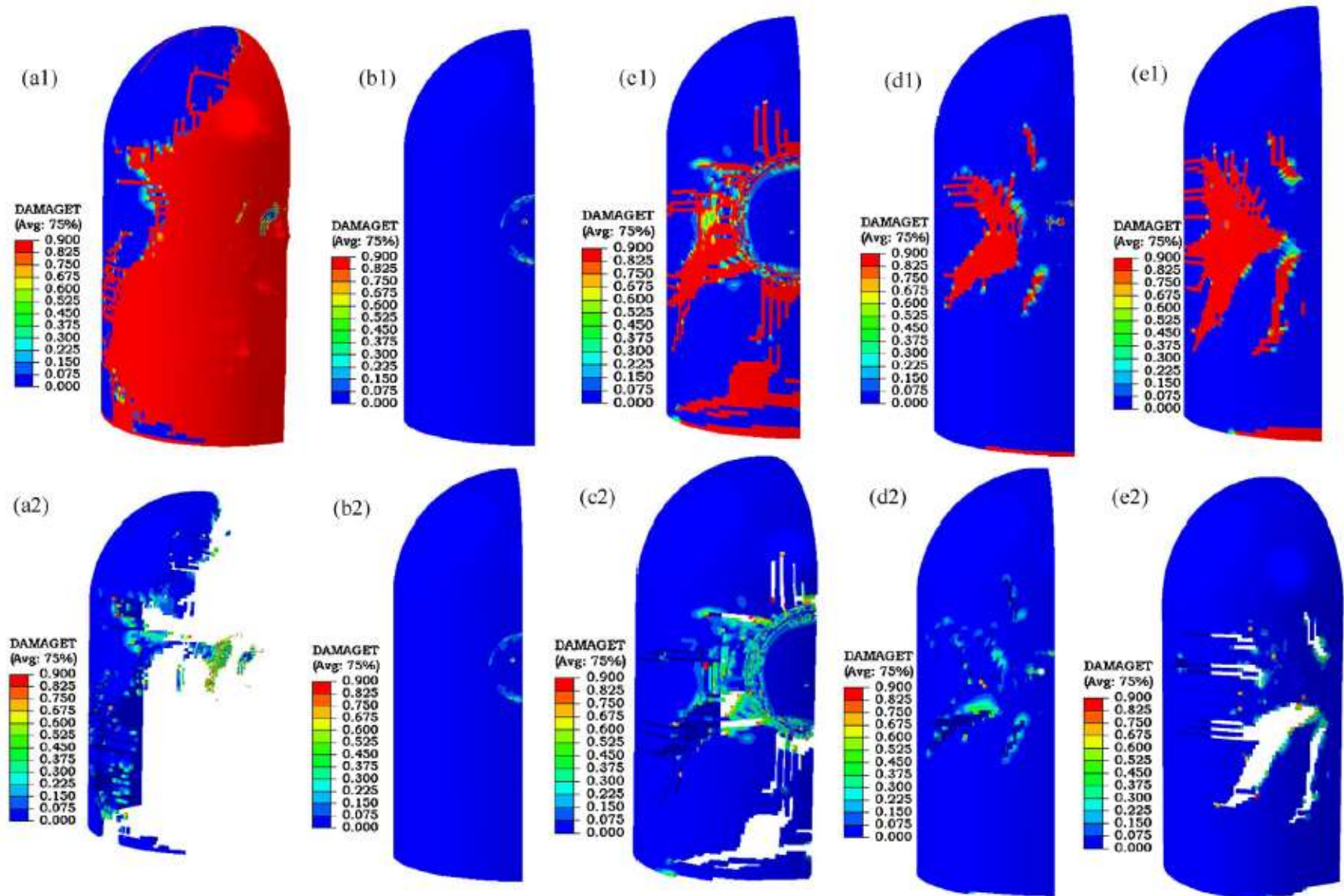


Fig. 7. Maximum displacement (deformation) in concrete in the direction of loading: (a) 747-400 (b) Phantom F4 (c) 767-400 (d) 707-320 (e) A320.



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

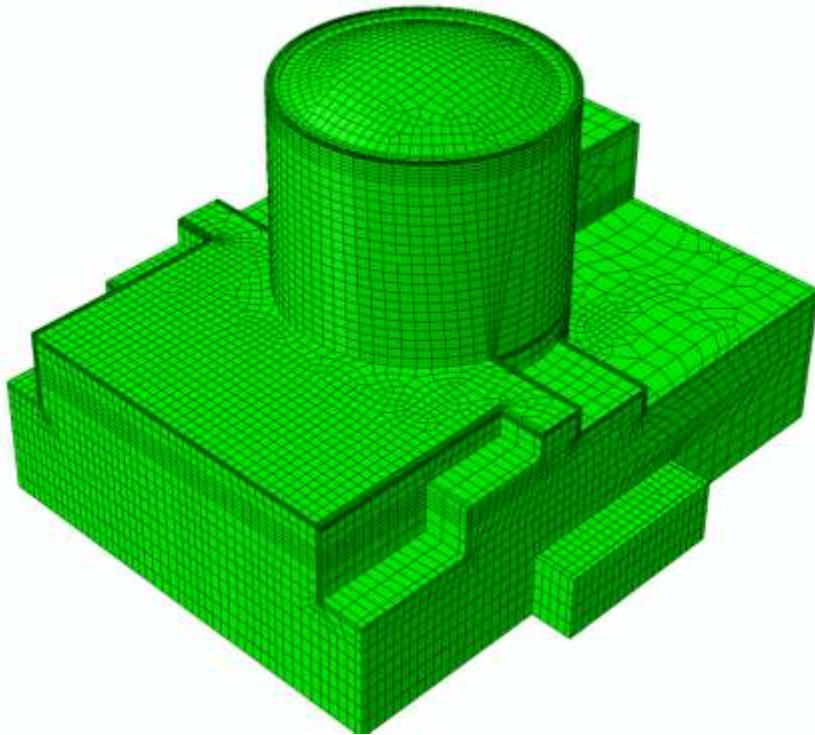


Tension damage contour of concrete:

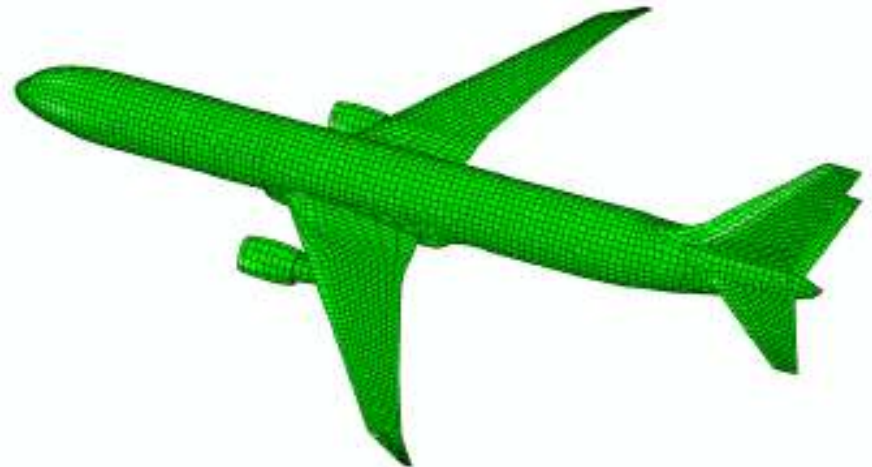
(a) 747-400, (b) Phantom F4, (c) 767-400, (d) 707-320, (e) A320

Interaction Methodを用いた解析の研究事例1

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. 21th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, Div. V, 1-8

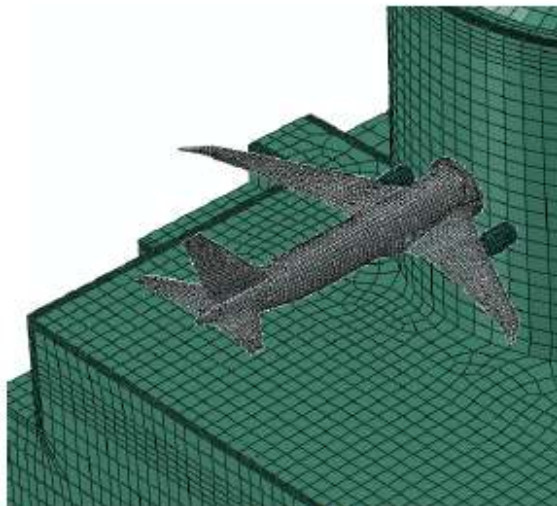


Finite mesh of NPP structures

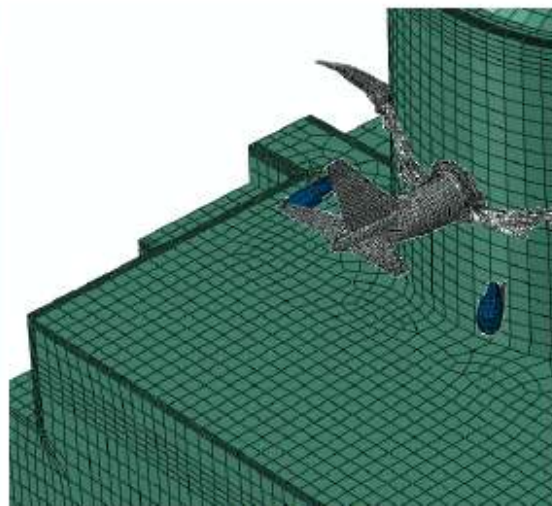


Developed B767-400 model

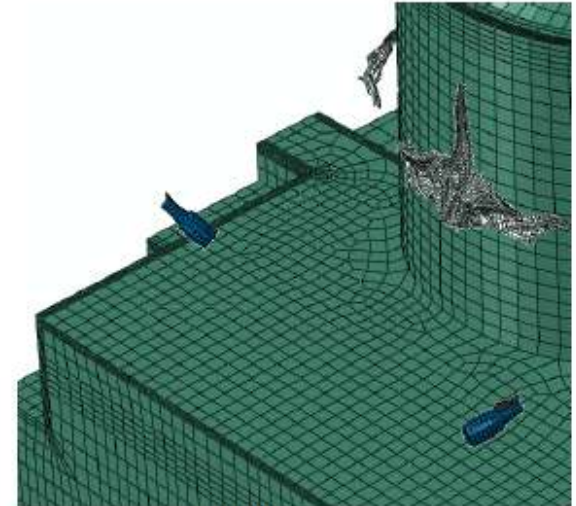
Interaction Methodを用いた解析の研究事例1



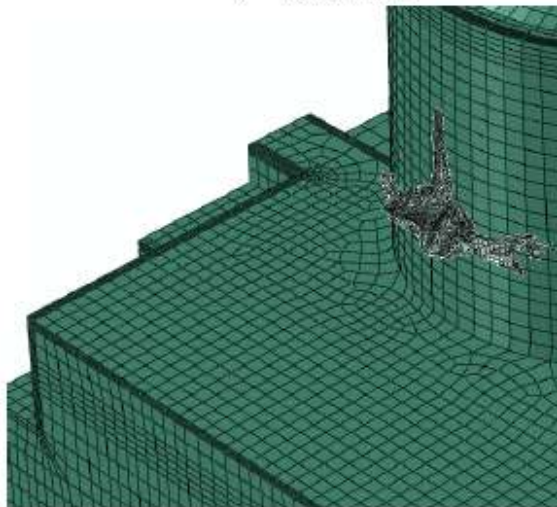
$t = 0.15 \text{ sec}$



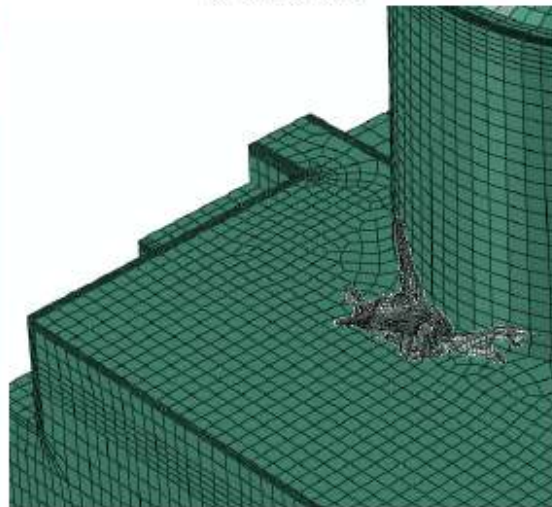
$t = 0.30 \text{ sec}$



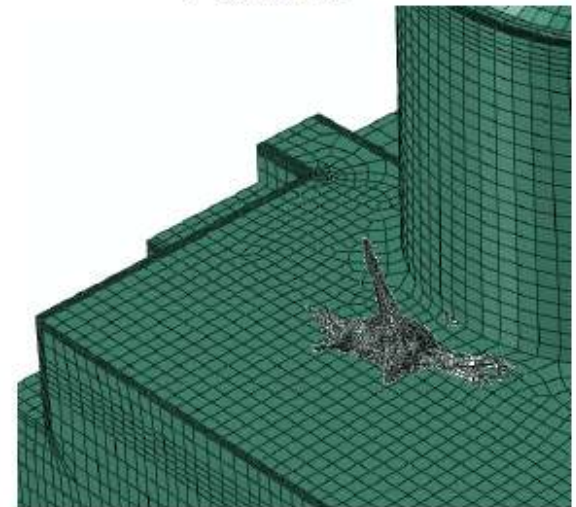
$t = 0.49 \text{ sec}$



$t = 0.99 \text{ sec}$



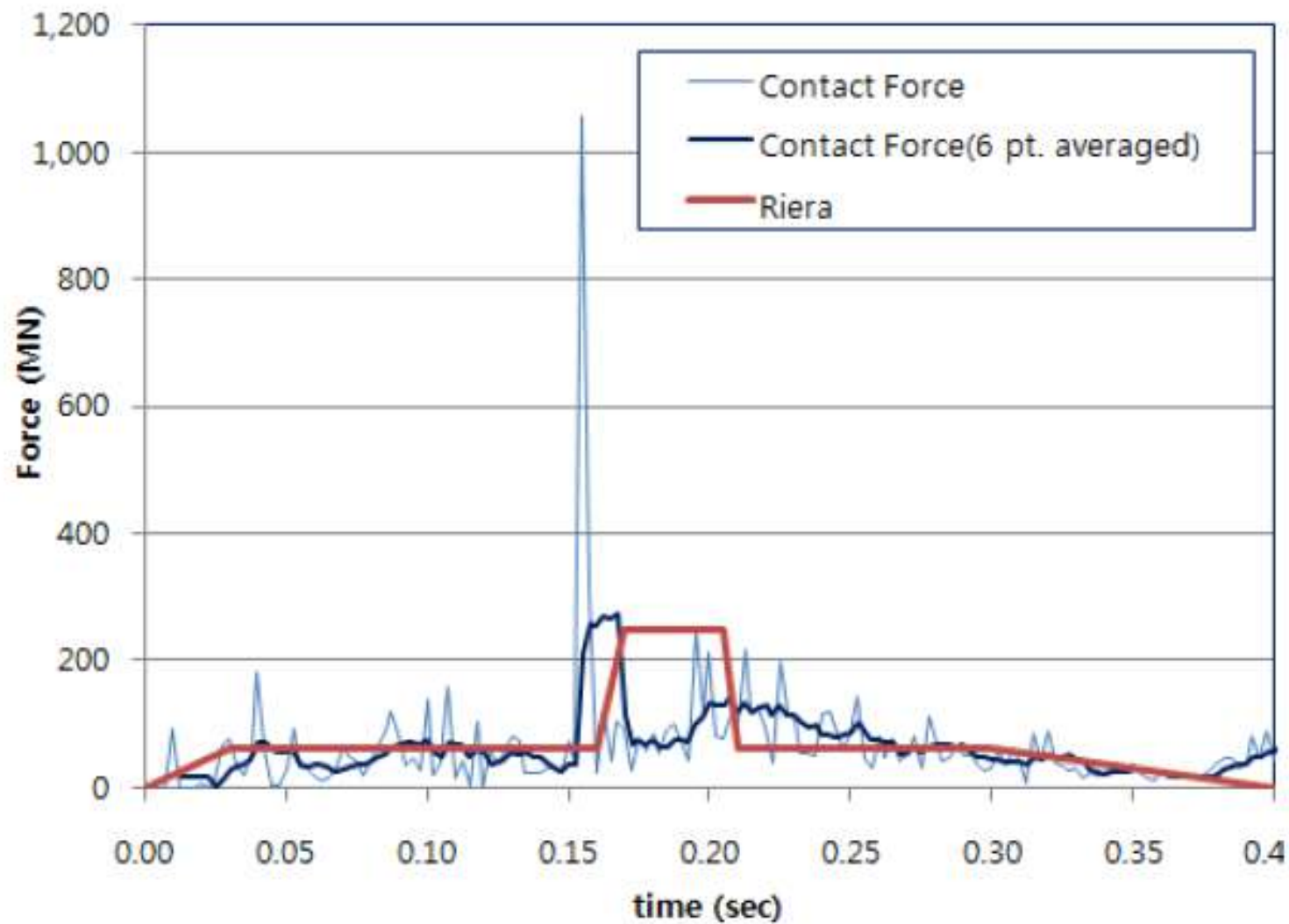
$t = 1.98 \text{ sec}$



$t = 3.00 \text{ sec}$

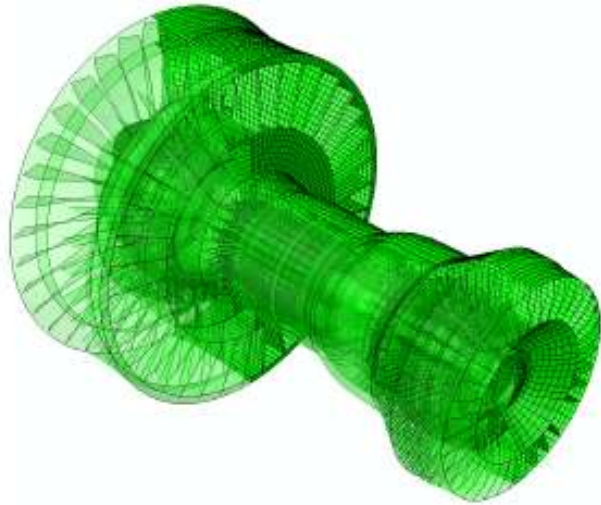
B767-NPP Impact Sequences

Interaction Methodを用いた解析の研究事例1

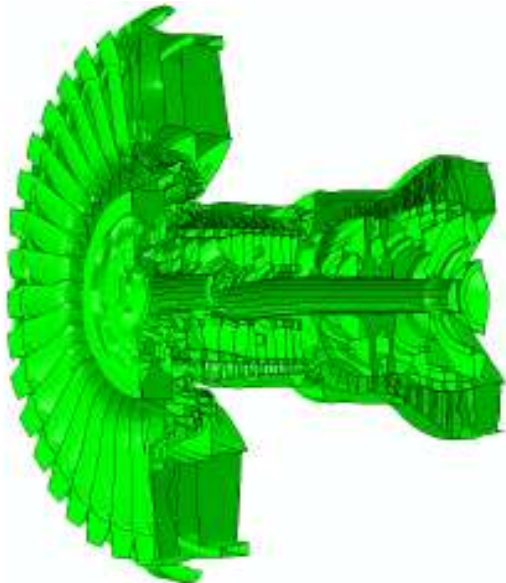


Impact Load-Time History (NPP)

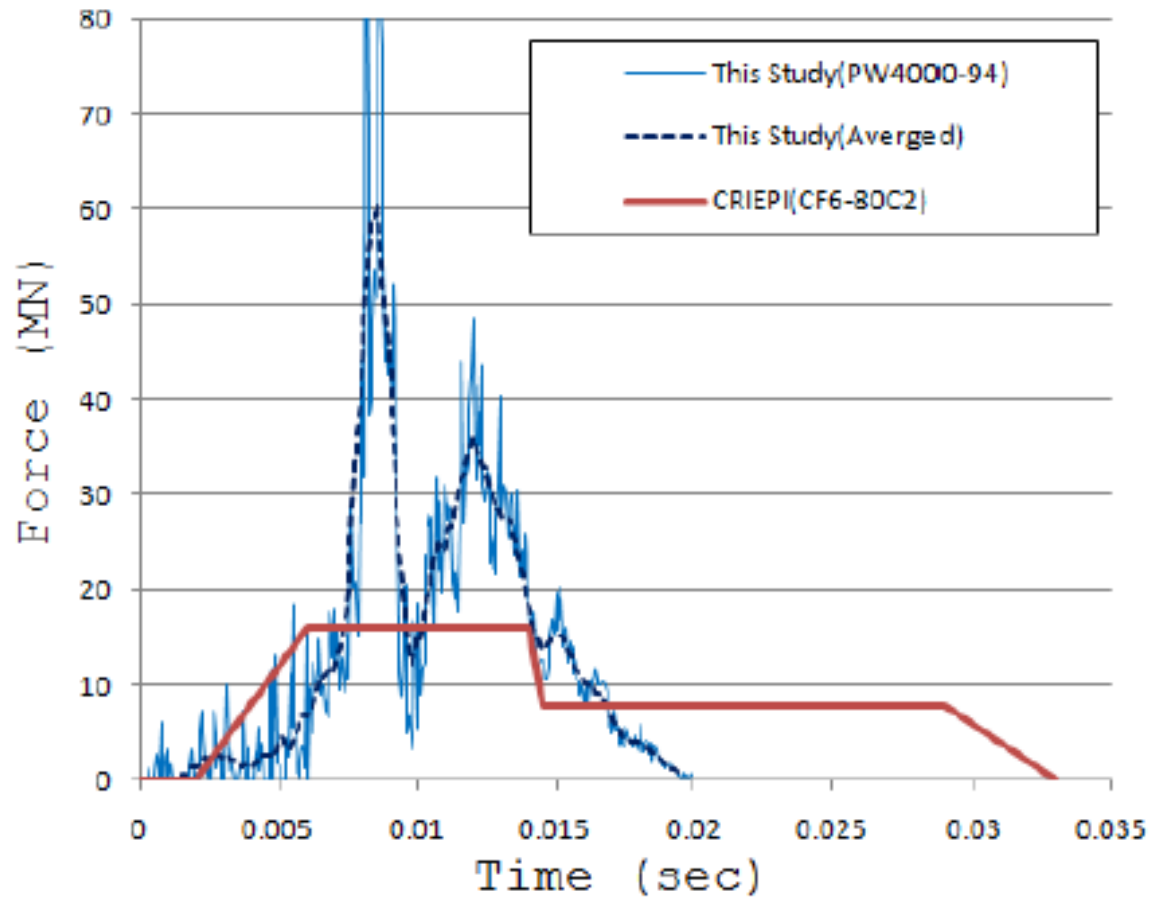
Interaction Methodを用いた解析の研究事例1



FEM Model of PW4000-94



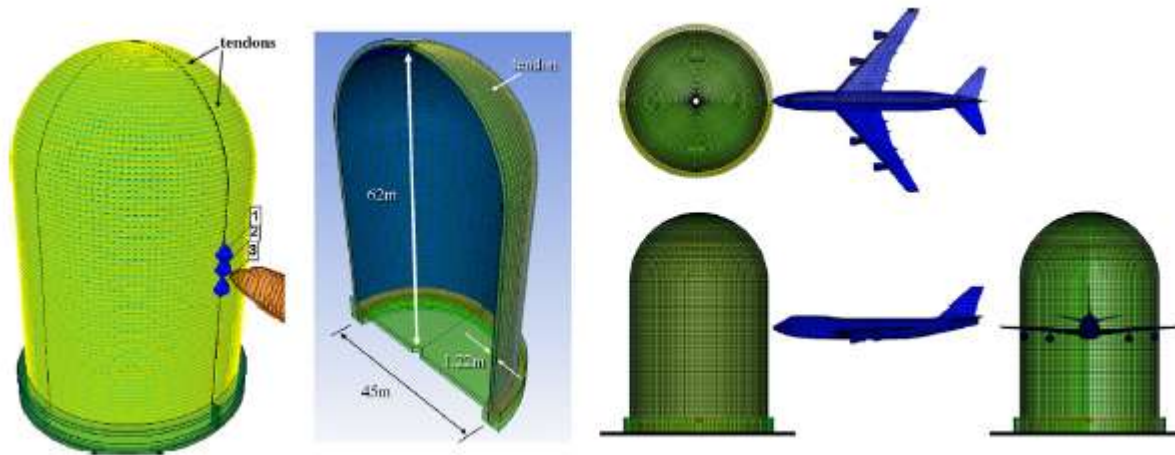
Deformed Configuration



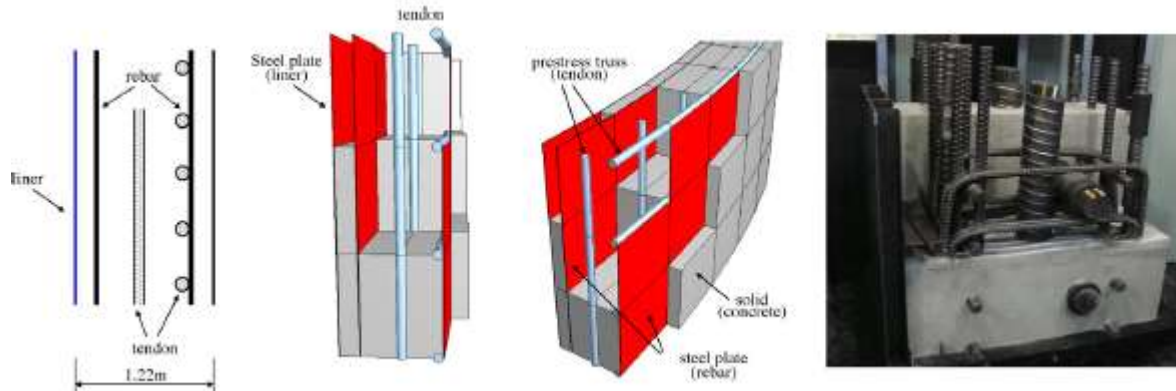
Comparison of Impact Load-Time Histories

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



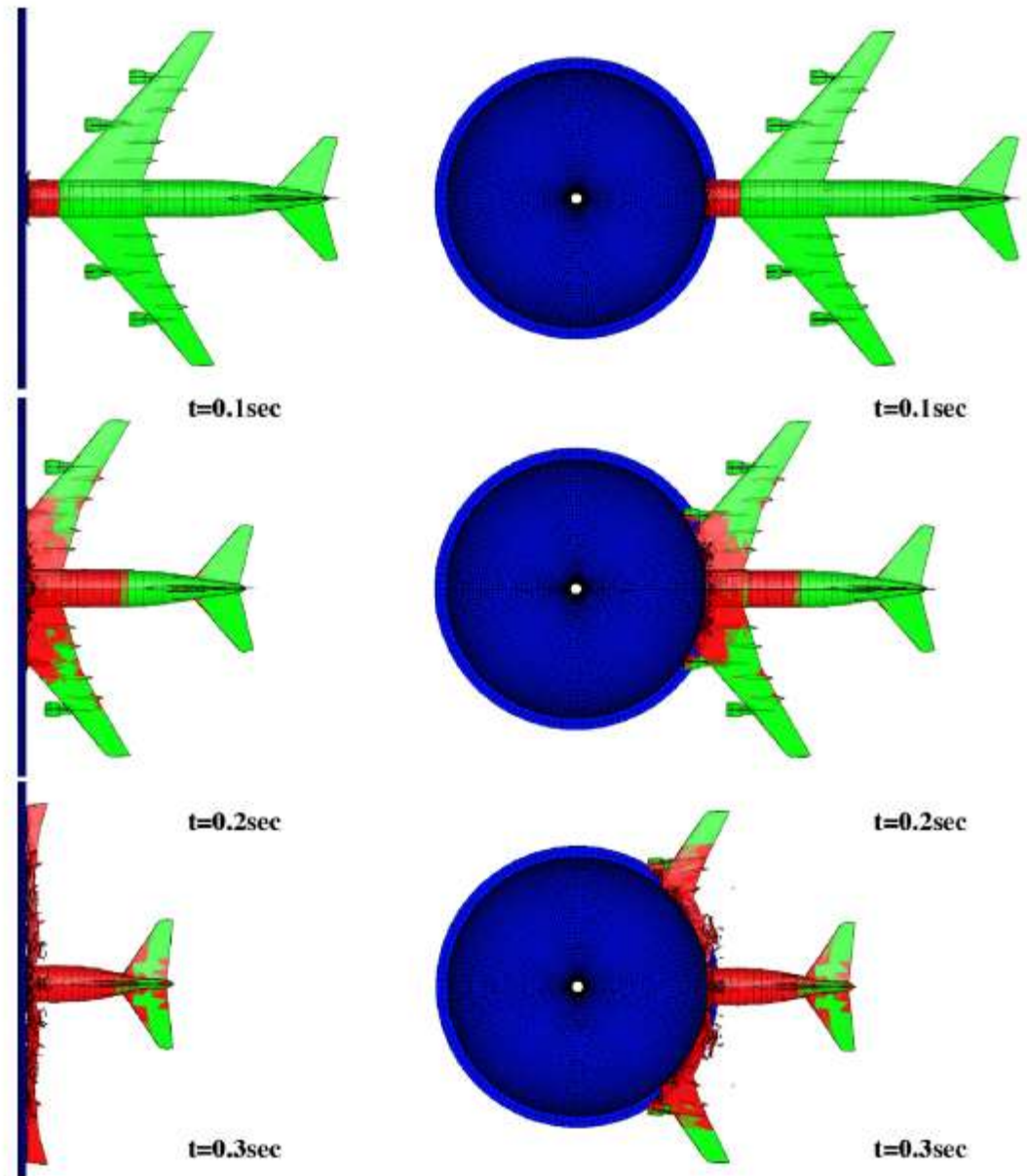
Fictitious Concrete Nuclear Containment Building Used for Aircraft Impact Analysis



Details of the Concrete Wall Section

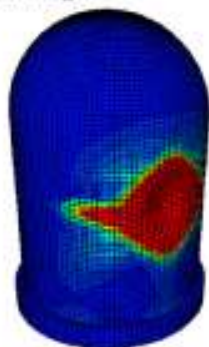
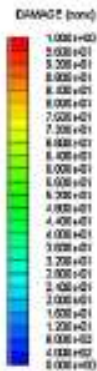
Interaction Methodを用いた解析の研究事例1

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

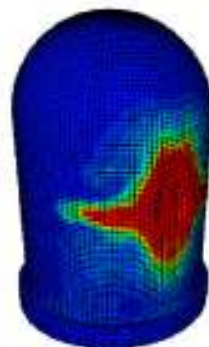


Interaction Methodを用いた解析の研究事例1

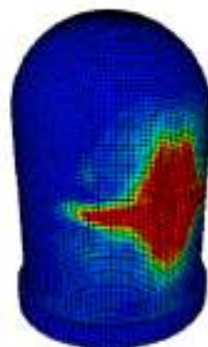
<Conc. Damage>



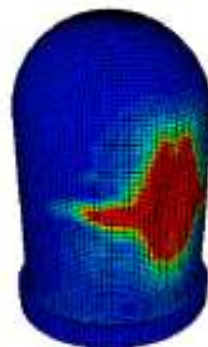
Without tendon



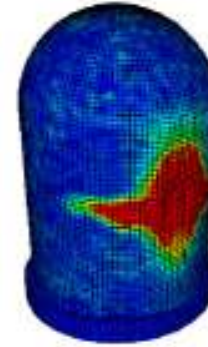
Prestress : 0ton



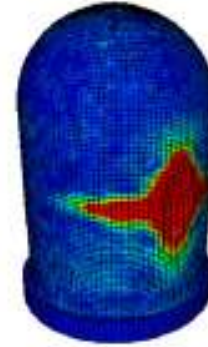
Prestress : 50ton



Prestress : 100ton

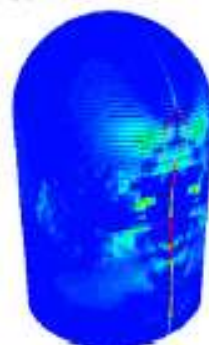
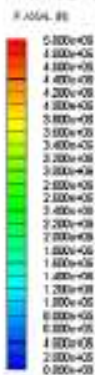


Prestress : 500ton

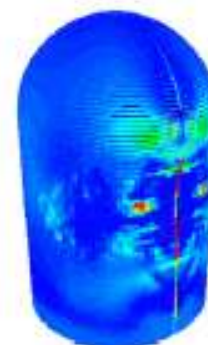


Prestress : 1000ton

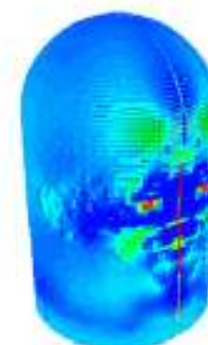
<Tendon force>



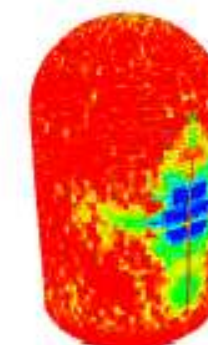
Prestress : 0ton



Prestress : 50ton



Prestress : 100ton



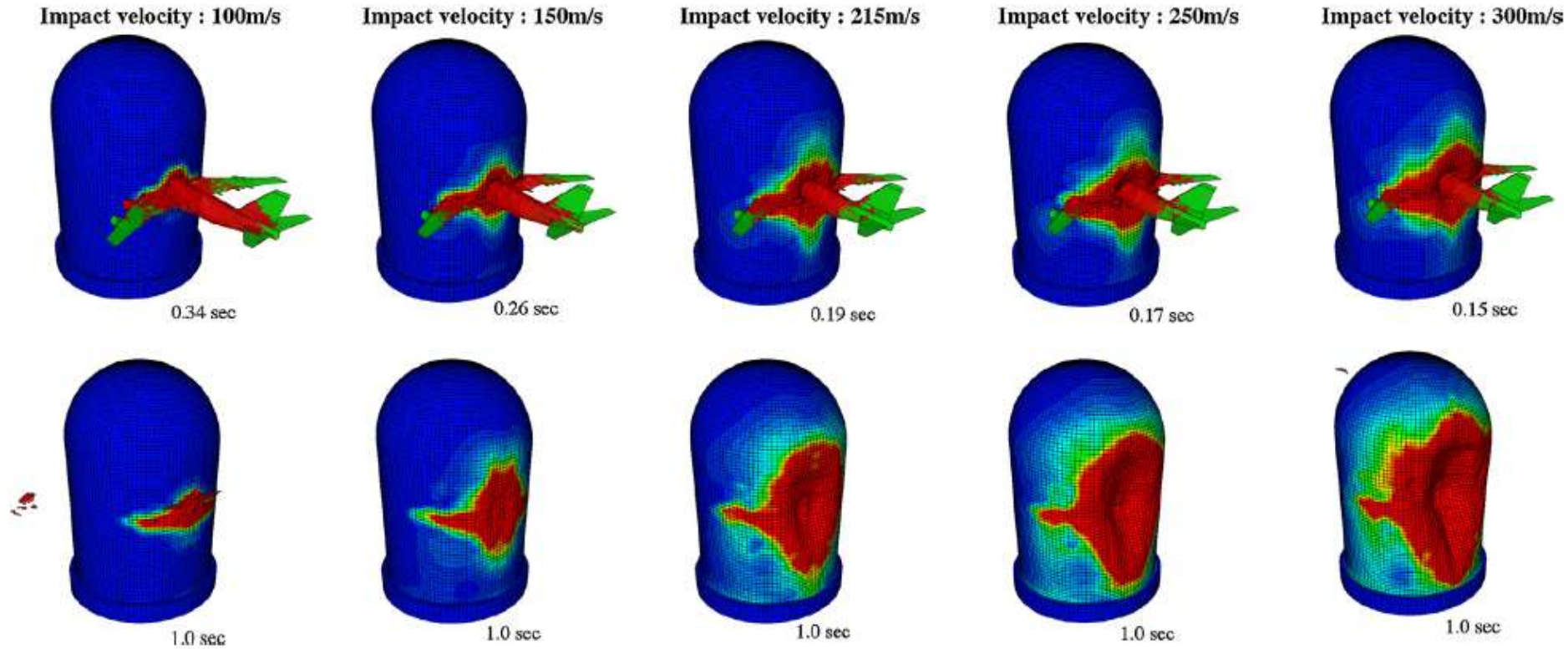
Prestress : 500ton



Prestress : 1000ton

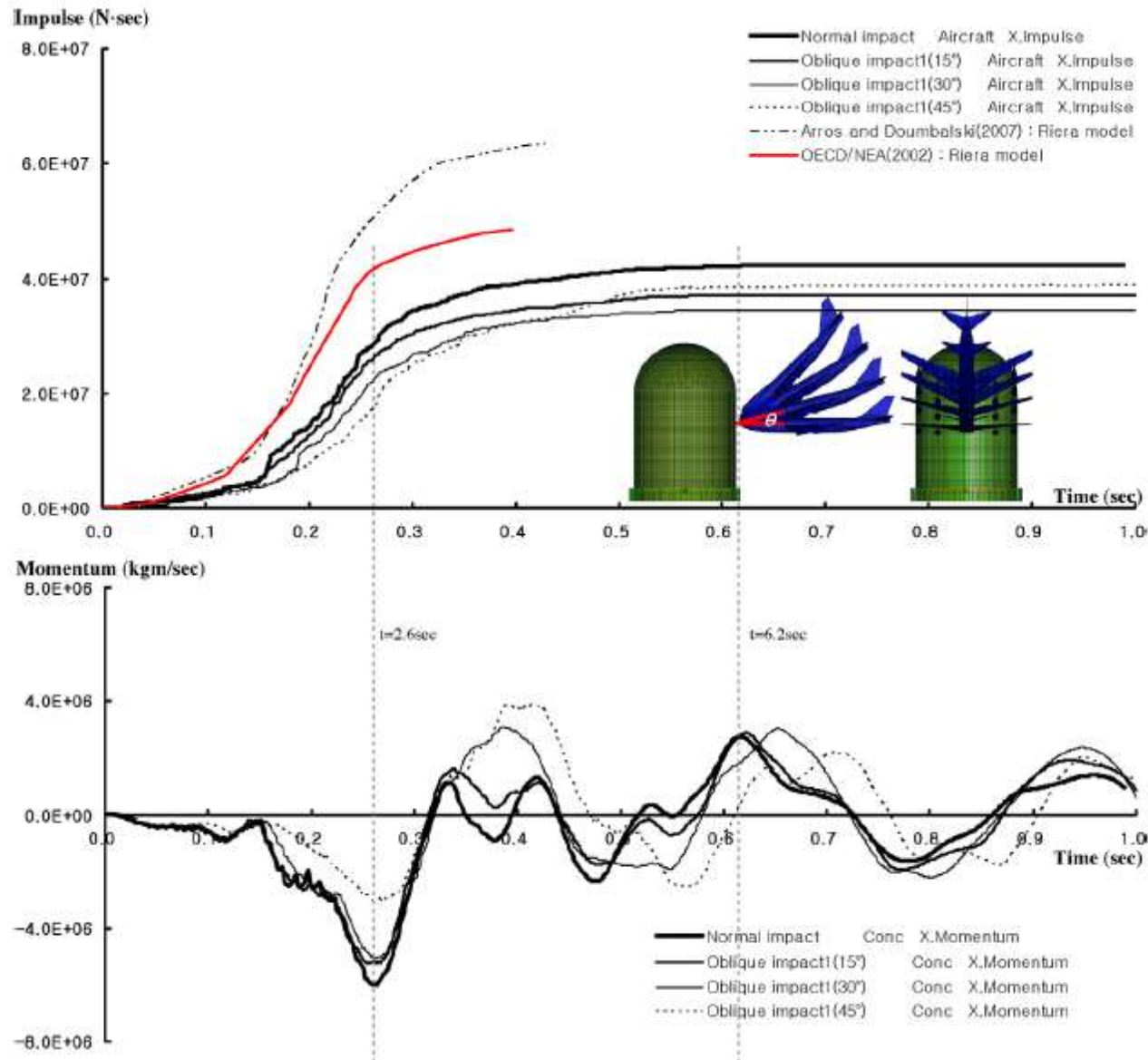
Concrete Damage and Tendon Force of the Concrete Containment Building according to the tendon pre-stress (at 1.0 sec, impact velocity: 150m/sec)

Interaction Methodを用いた解析の研究事例1



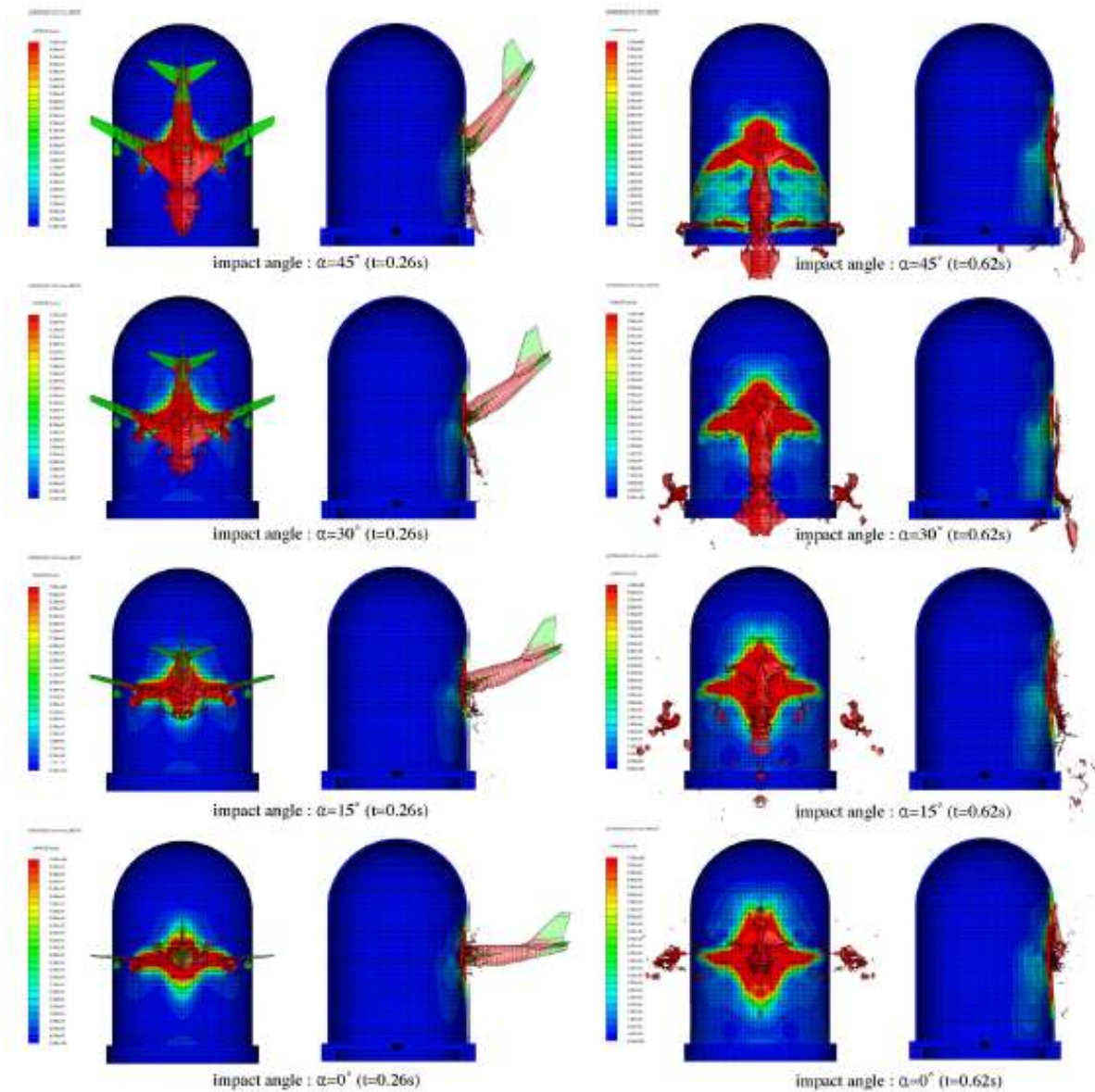
Concrete damage of the containment building according to the impact velocity
(tendon pre-stress : 0 ton)

Interaction Methodを用いた解析の研究事例1



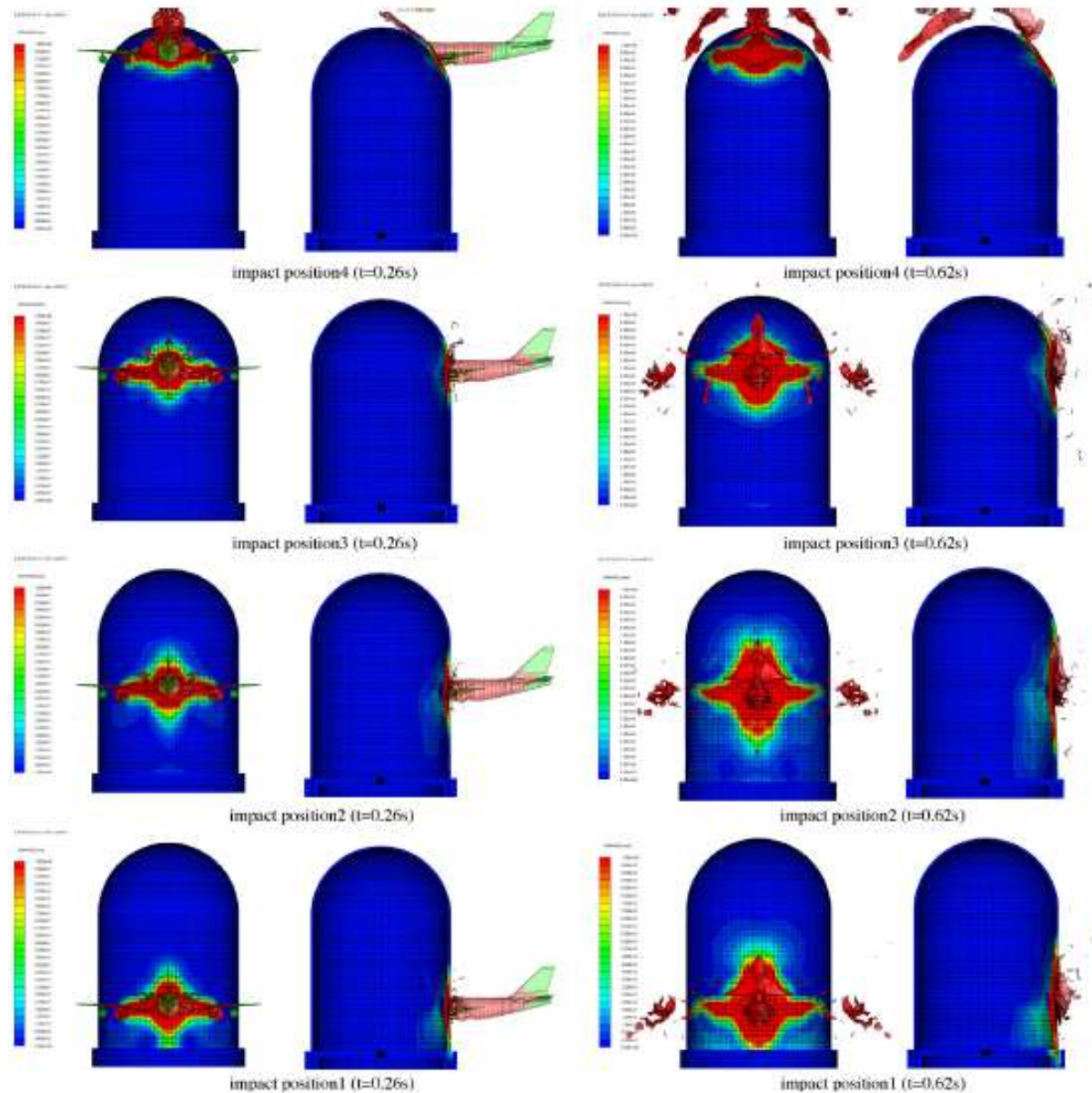
Structural response for different impact angles (tendon pre-stress: 0 ton)

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

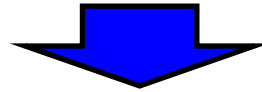


Deformation and concrete damage for different impact positions

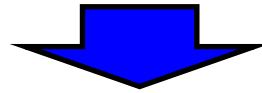
まとめおよび今後の課題

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