

# 非線形動的構造解析法を用いた 衝突後の残余船体縦曲げ最終強度

構造安全評価系  
山田 安平

# 背景

Erika号(1999), Prestige号(2002)事故  
人命の安全・海洋環境保全の観点から船体折損防止は重要  
SOLAS条約により残余強度要件 (Residual Strength) が強制化されることとなった。



損傷船舶の縦曲崩壊メカニズムの解明、残余強度評価手法確立が重要

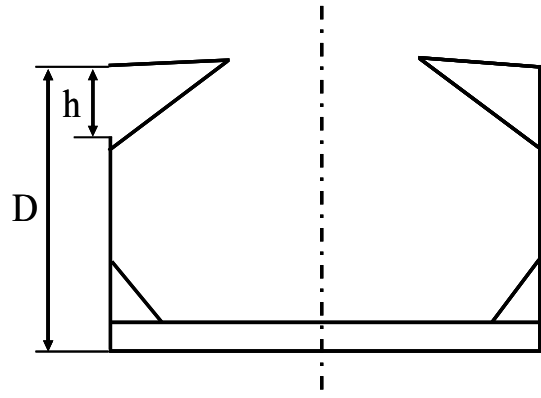
残余強度に関する過去の研究 (e.g. Wang et al, 2002; Das&Chuang, 2007; Hussein&Soares et al, 2009; Alie et al, 2012).

これまでの研究では、簡易的な損傷(外板損傷のみ)を仮定し、簡易推定手法 (Smith法) により、残余強度を評価する例が多い。

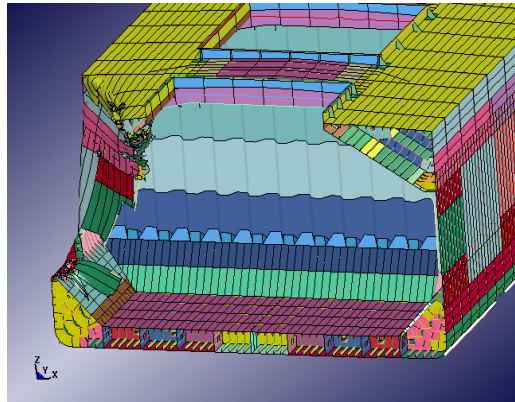
高精度なFE-simulationによる解析例は少なく、損傷時の崩壊メカニズムが十分に明らかにされていない

これまでに無い概念の基準については、一層の知見の集積が重要

# Motivation



Assumed Damage (**AD**)  
(e.g. Hussein&Soares, 2009)



Simulated Damage (**SD**)  
(estimated by  
collision analysis)



Real Damage  
(Baltic carrier, 2001)

簡易的に仮定した**損傷モデルAD (Assumed)** は妥当か？  
 損傷モデル**SD(Simulated)**と同等の結果が得られるか？  
**損傷モデル**が残余最終強度推定に与える影響を明らかにする

# 本報での目的

衝突解析・崩壊解析の **2段階解析** を実施し、

- ①衝突解析により損傷状態SDを推定し、簡易損傷モデルADとの差異を明らかにする
- ②AD, SDで最終強度低下率を比較し、**損傷モデル**が残余強度に与える影響を明らかにする

	Intact	Damaged	
		AD (Assumed)	SD (Simulated)
FEA	○	○	<b>Present</b>
SA (Simplified Analysis)	○	○	—

AD: Assumed Damage (side shell damage only)

SD: Simulated Damage (estimated by collision analysis)

高精度なシミュレーションを実施することにより、崩壊メカニズム確認や現象把握に資する

# 非線形動的構造解析法とは



非線形有限要素法 (Nonlinear FEM)

陽解法 (⇔ 陰解法)

時々刻々の時間領域シミュレーション

主に、衝突・爆破解析等に用いられる。

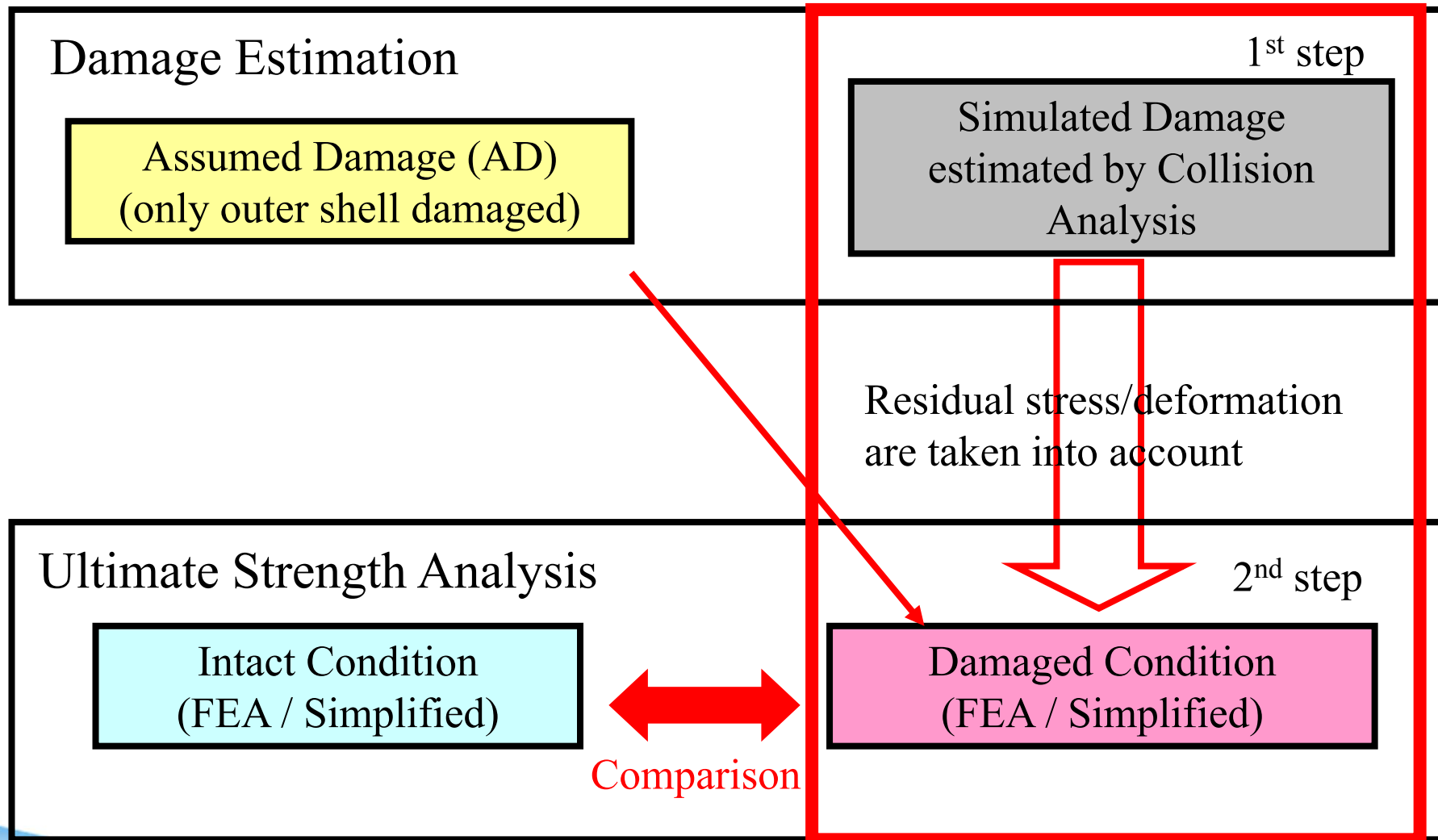
LS-DYNA：自動車業界を含めて陽解法においてはデファクトスタンダード  
陰解法、流体構造連成解析も可能

何が非線形か？ (非線形の3大要素)

- ① 材料非線形 (材料構成則：応力-歪非線形)
- ② 幾何学的非線形 (大変形 → 微小理論不成立：変位-歪非線形)
- ③ 境界非線形 (接触：静止摩擦、動摩擦)

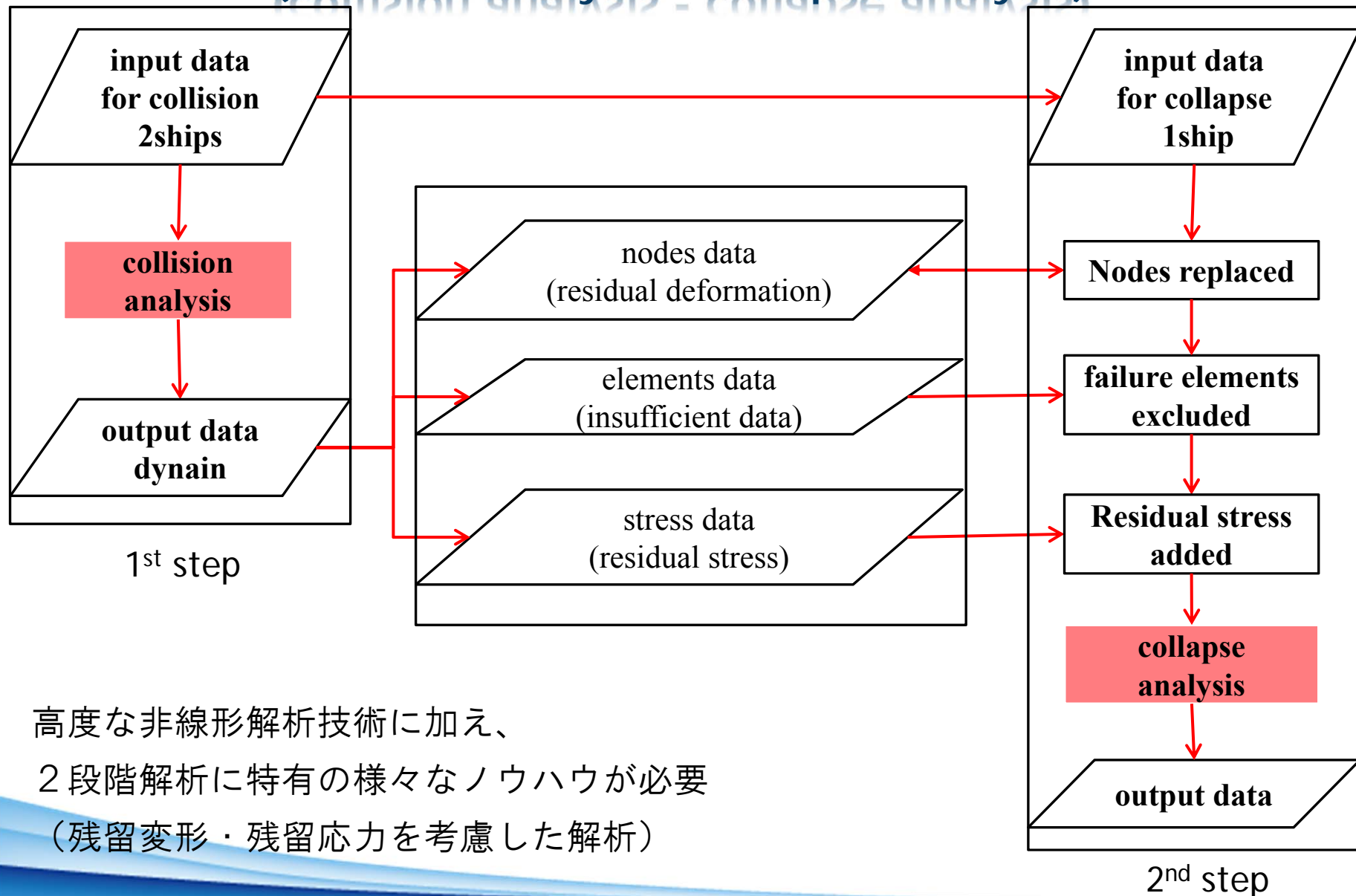
# 2 段階解析（衝突解析→崩壊解析）

Present





# Flow chart of 2-step analysis (collision analysis - collapse analysis)



高度な非線形解析技術に加え、  
2段階解析に特有の様々なノウハウが必要  
(残留変形・残留応力を考慮した解析)

# 縦曲げ崩壊解析 解析条件

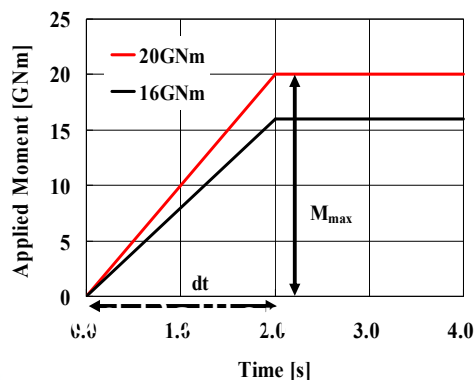
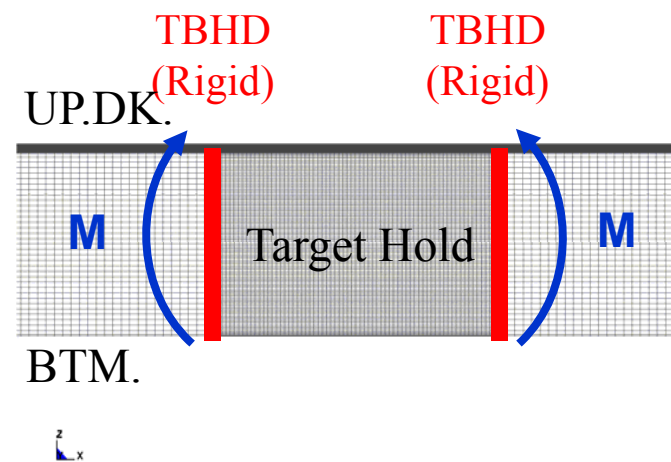
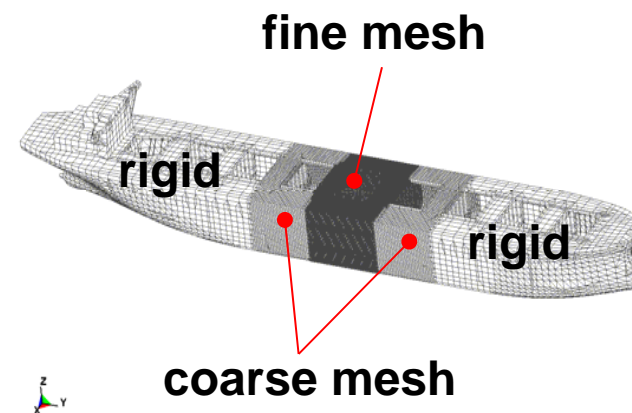
LS-DYNA ver.971-R421, Double, SMP  
FEモデル: ケープサイズBC全船モデル  
中央3ホールド elastic-plastic + fore/aft rigid  
(衝突・崩壊解析で同一モデル)

Net scantling + 50% corrosion addition (CSR)  
船体中央部一様縦曲げモーメント状態を仮定  
対象ホールドの前後TBHDにモーメント負荷  
(**Double Moment 法**)

初期不整、溶接残留応力、貨物、海水の影響は考慮していない。

歪み速度依存性は除外 (準静的崩壊解析)

感度解析 (dt, Mmax)

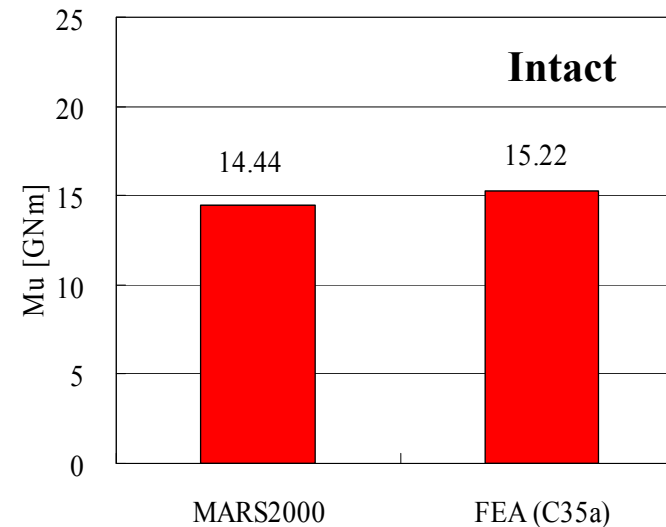
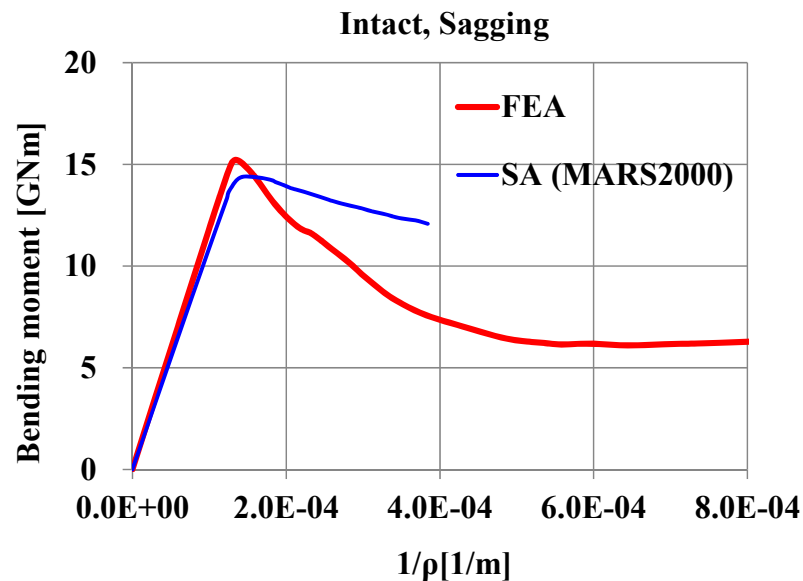




# 解析結果（非損傷時） 簡易解析（Simplified analysis）との比較

簡易解析(SA) : Smith法に基づく簡易推定手法 (MARS2000、BV)

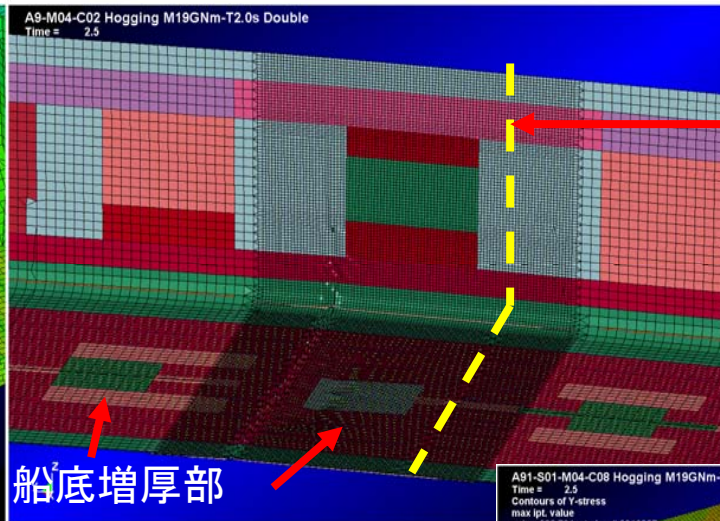
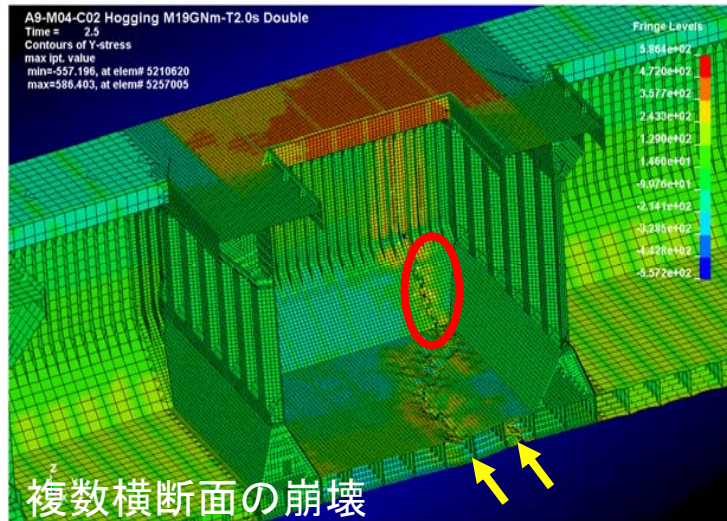
FEA : 非線形動的構造解析法 (LS-DYNA)



最終強度推定値の比較

FEAの方が若干高い値を示すが、FEAによって推定した最終強度値は、簡易推定手法により推定した最終強度値と比較的良好な相関を示す。

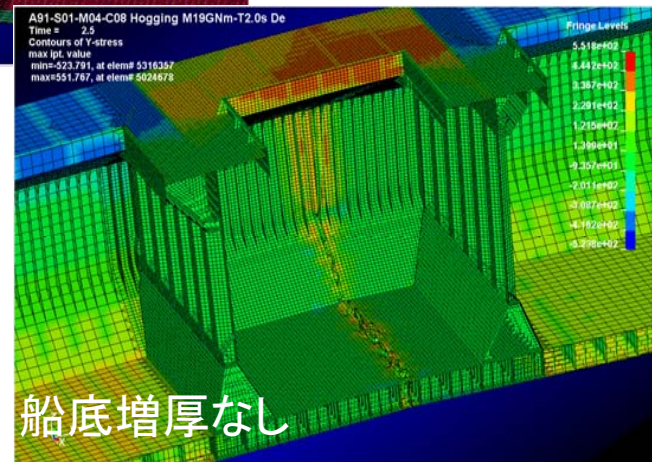
# 3次元的な崩壊モード (Hogging)



Smith法では  
2次元横断面  
を評価

## 3次元的な崩壊モード

ホギング時はホールド中央でなく1/4付近で崩壊  
原因 → ホールド中央部船底増厚による影響  
最も弱い断面はホールド中央であるとは限らない。  
設計時は、必ずしもFEAを実施しない。



2次元断面の解析手法であるSmith法で強度評価する場合は、  
ホールド内で最も弱い断面を探索し、当該断面で評価することが必要  
3次元影響については、SAの更なる改善が必要

# 損傷モデル (Assumed Damage)

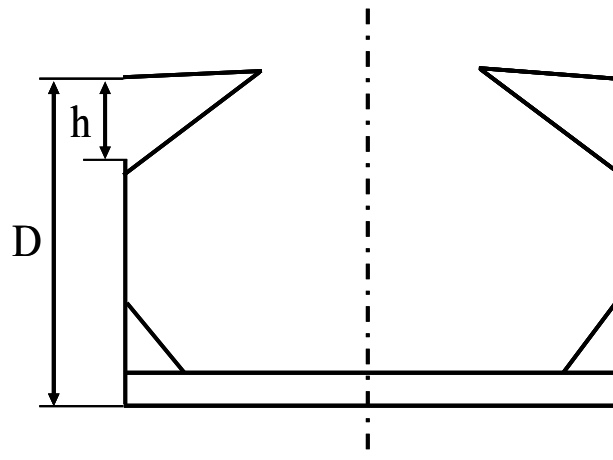
損傷シナリオ:

UPDK損傷(衝突船バラスト想定)

損傷高さ  $h$  [m] from UPDK. 損傷幅:  $n$  elements (FEAのみ)

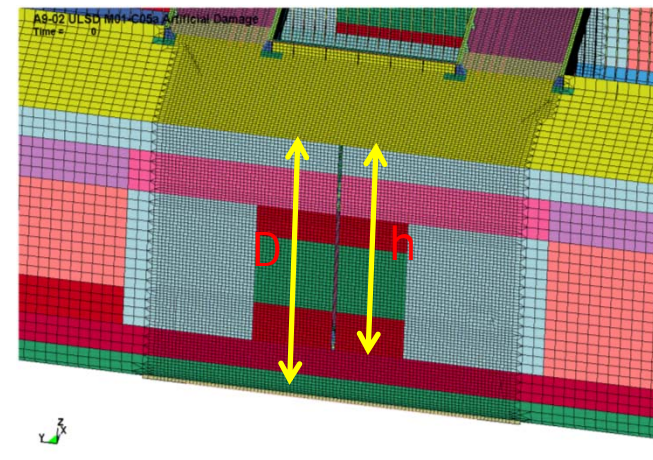
損傷外板+外板付きロンジを除去

主な目的: FEAとSAの比較 → FEAとSAで同一の損傷状態を仮定



Assumed Damage model (AD)

(Hussein&Soares, 2009)



FE-model

with Assumed Damage ( $n=1$ )



# Analysis condition (ship-ship collision)

## ・衝突シナリオ

大型船が船体中央部に90度衝突（2船全船モデル）

被衝突船：中央3ホールド弾塑性体＋剛体

静止状態( $V_A=0$ kt)

衝突船：船首部弾塑性体＋剛体

初速度 ( $V_B=3, 6, 9, 12$ kt)

被衝突船にとって厳しい状態を想定（安全側）

## ・材料構成則

相当応力－相当歪関係を多直線近似(MAT24)

歪速度依存性(Cowper-Symonds則)

要素破壊（Element kill法、要素サイズ依存性考慮）

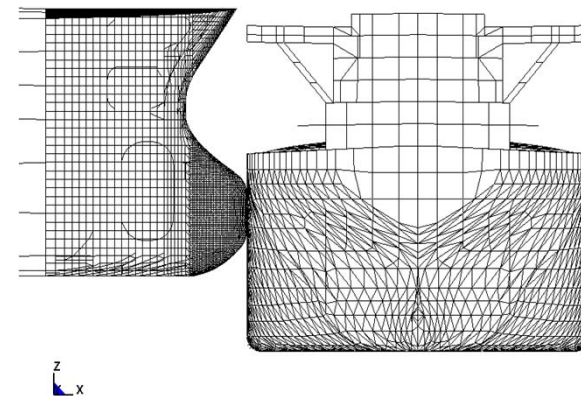
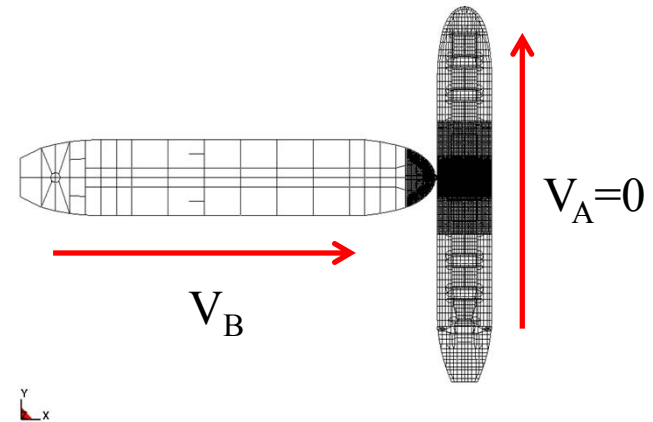
接触摩擦（静止摩擦、動摩擦）

## ・その他

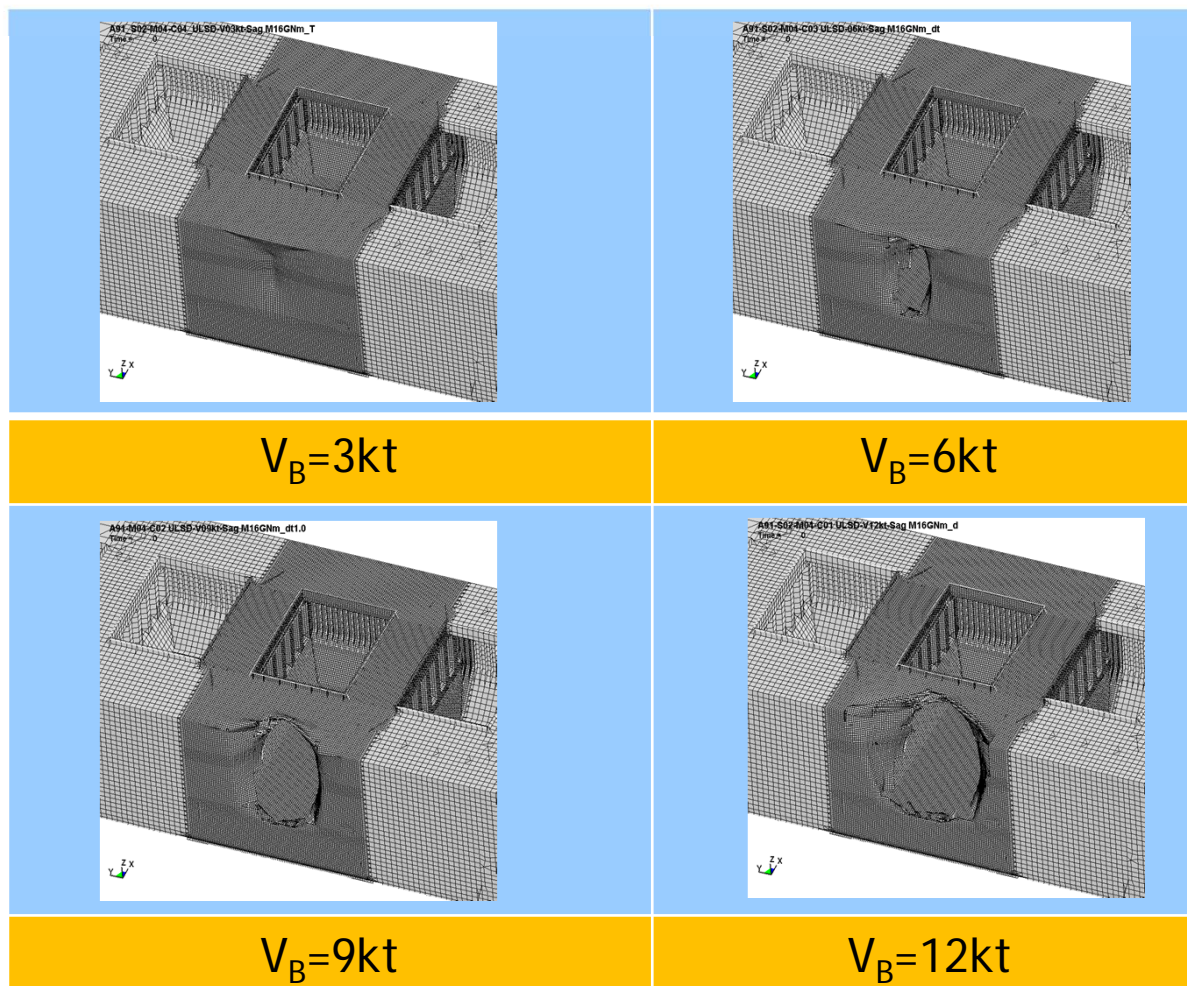
1 質点6自由度の船体運動

流体の付加水質量考慮

静的復元力（ばね要素）



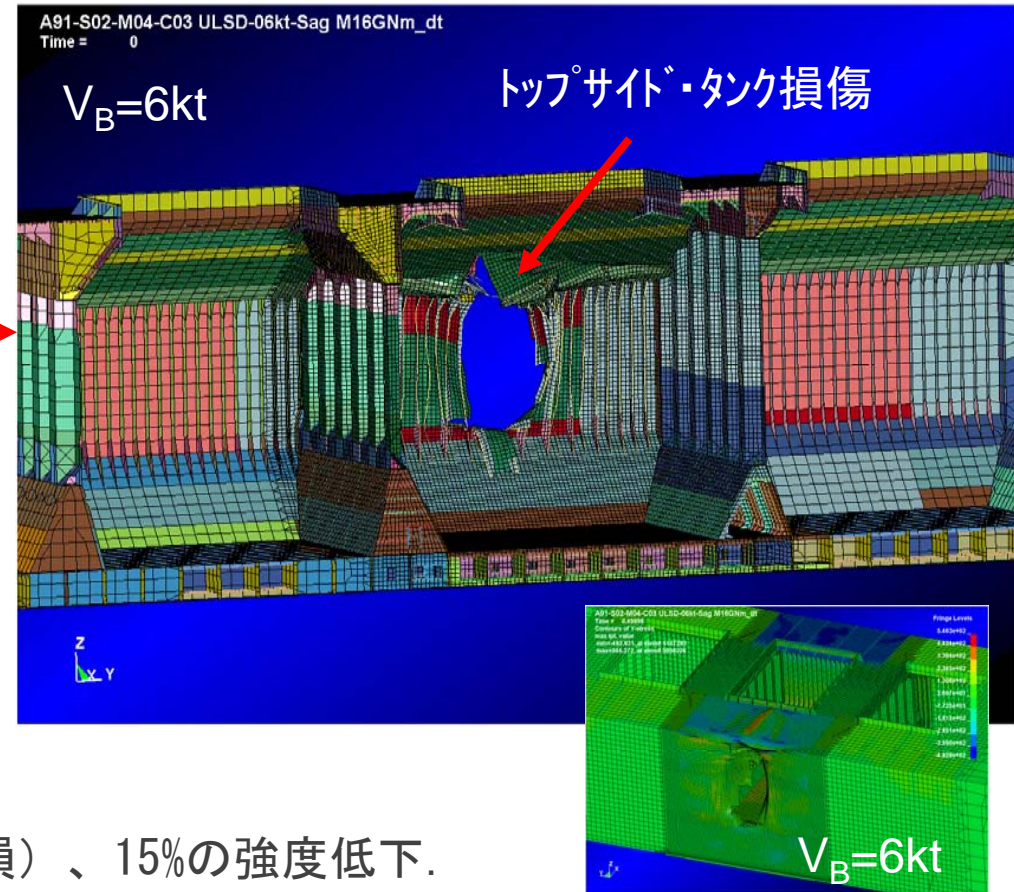
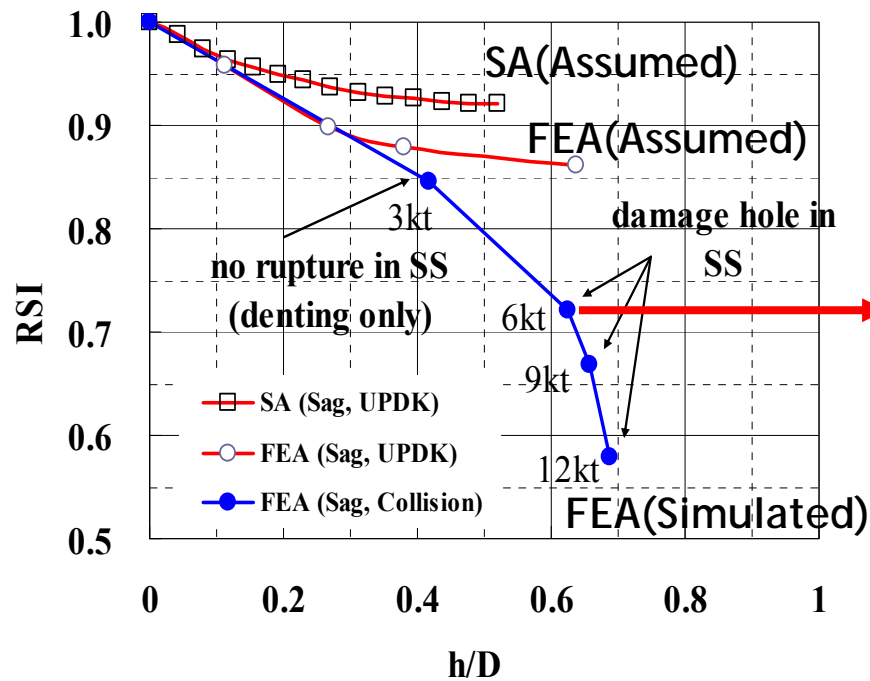
# Damage estimated by ship-ship collision



$V_B=3kt$ では、破口を生じない結果となった。

$V_B=6kt, 9kt, 12kt$ となるにつれて、船側外板に生じた破口が大きくなっていくことが分かる。

# 解析結果 (Sag., Damaged)



3ktの場合、破口がなくても（船側凹損）、15%の強度低下。

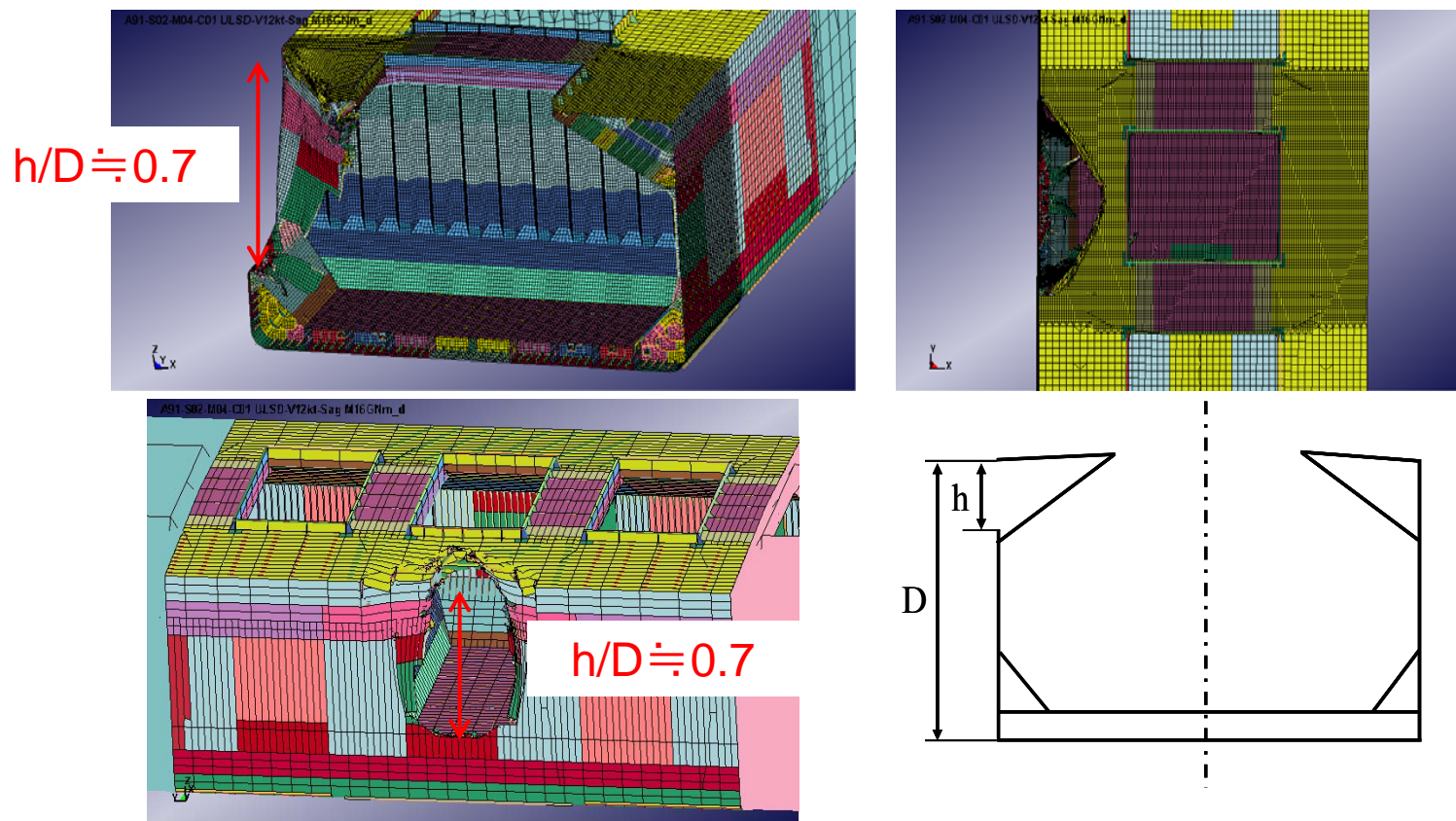
6kt以上の衝突の場合、船側外板だけでなく、UPDK、トップサイドタンクも損傷。

12ktで、40%強の強度低下。

SA: Simplified Analysis



# 衝突による船側損傷 ( $V_B=12kt$ )



$V_B=12kt$ の場合、 $h/D \approx 0.7$ の外板損傷を生じ、上甲板及びトップサイドタンクも大きく損傷  
衝突によって $h/D \geq 0.6 \sim 0.7$ 程の大開口を生ずる場合には、外板のみの損傷（**2次元  
的損傷**）でなく、外板の内側まで損傷が生ずる（**3次元的損傷**）可能性が高い

# まとめ



サギングモーメントを受けるBCに対し、非線形FEMシミュレーションを用いて、損傷船舶の最終強度低下率を推定した。得られた結果は次のとおり。

- ・ 衝突による損傷船舶の崩壊メカニズム・残余強度低下率が定量的に明らかになった。
- ・ 衝突開口部小 → 簡易損傷モデル(AD)は、実現象を模擬した損傷 (SD) と同等の強度低下率
- ・ 衝突開口部大 → 簡易損傷モデル(AD)は、最大で強度低下率約15%. 実現象を模擬した損傷 (SD) では、最大で約42%低下。

理由：h/Dが型深さの半分以上となるような衝突（**大規模衝突**）では、損傷が2次元的な損傷（船側外板のみ）に限定されず、**3次元的な損傷**（上甲板及び船側外板の内側の部材まで損傷）となることが原因であると考えられる。

- ・ トップサイドタンク斜板の縦曲げ強度への寄与大。
- ・ 船側損傷高さが型深さの50%以上の場合には3次元的損傷仮定が合理的（具体的には、トップサイドタンク斜板及び上甲板の損傷を考慮する）
- ・ 非線形動的構造解析法を用いて、衝突解析－縦曲げ崩壊解析の**2段階解析手法**を確立した。
- ・ 残留変形及び残留応力を考慮した高度数値計算技術・ノウハウ蓄積
- ・ **2段階解析手法の更なる応用**（溶接残留変形・残留応力等を考慮した解析へ）

本研究の一部は、日本学術振興会 (JSPS) 科学研究費補助金 (基盤C: 24560997) により実施されたことを付記すると共に関係各位に謝意を表します。