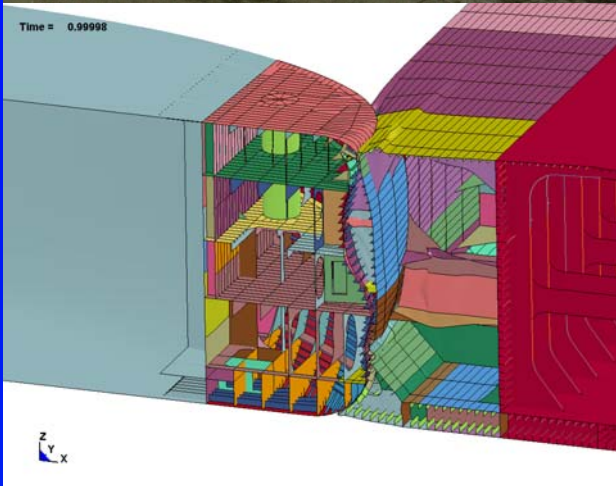
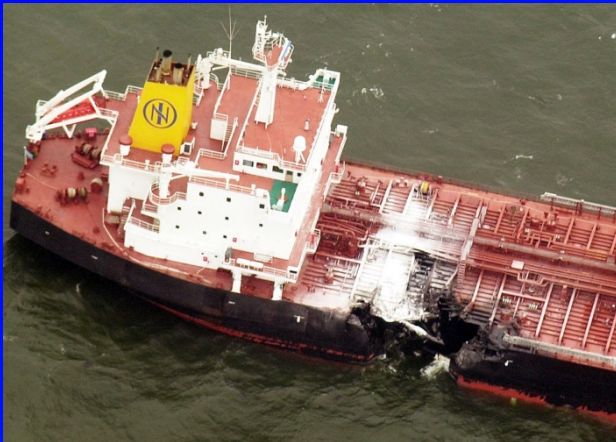


# タンカーからの大規模油流出リスク低減のための 新材料による耐衝突性能向上技術、船級Notation及び実船適用

1



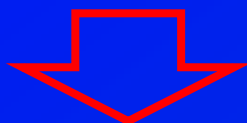
国立研究開発法人  
海上・港湾・航空技術研究所  
海上技術安全研究所  
構造安全評価系

\* 山田 安平、戸澤 秀

1. 背景
2. 高延性鋼（**Highly Ductile Steel**）のコンセプト
3. 実船適用例
4. 船級Notation
5. 高延性鋼の耐衝突性能向上効果
  - 5.1 非線形シミュレーション（解析条件）
  - 5.2 90度衝突
  - 5.3 E吸収メカニズム
  - 5.4 HDS適用部材検討
  - 5.5 斜め衝突
6. まとめ

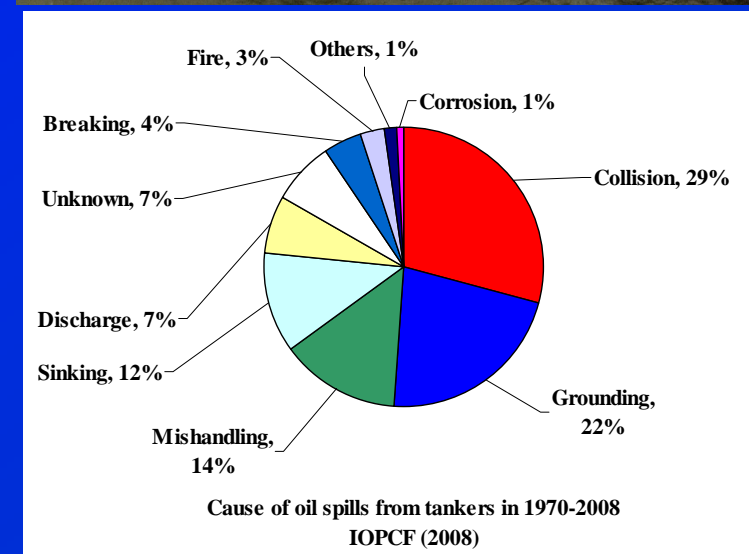
# 1. 背景

- 海洋環境保護
- 油タンカーからの大規模油流出事故
- 油流出による企業イメージダウン
- タンカー油流出事故原因: 衝突・座礁
- D/H は有効。Baltic carrier (2001).
- IMO/MEPCでのタンカーに対する更なる規制強化議論(2008-2012)
- 油流出リスクの更なる低減重要
- 既存研究(船側強化(基盤協7年)→緩衝型船首、X/Y型ロンジ、SPSサンドイッチ)



- 新材料開発(技術進歩)

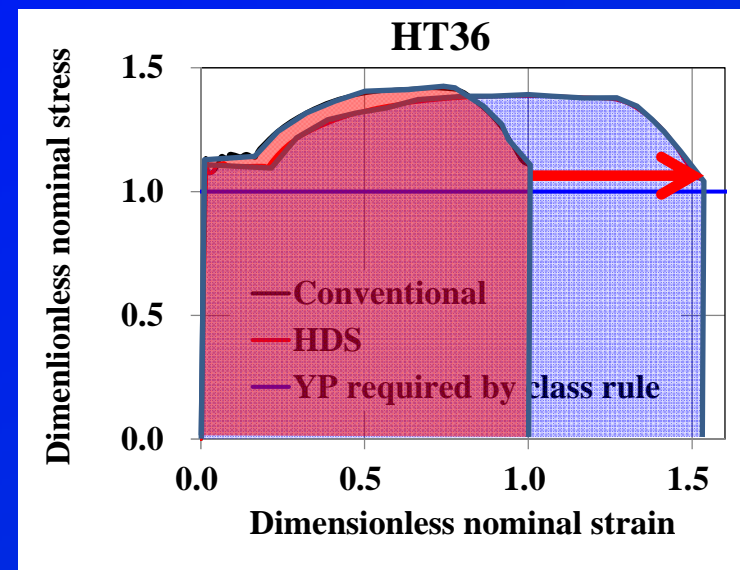
**高延性鋼**  
(HDS: Highly Ductile Steel)



船舶からの油流出事故原因(国際油濁基金、IOPCF)

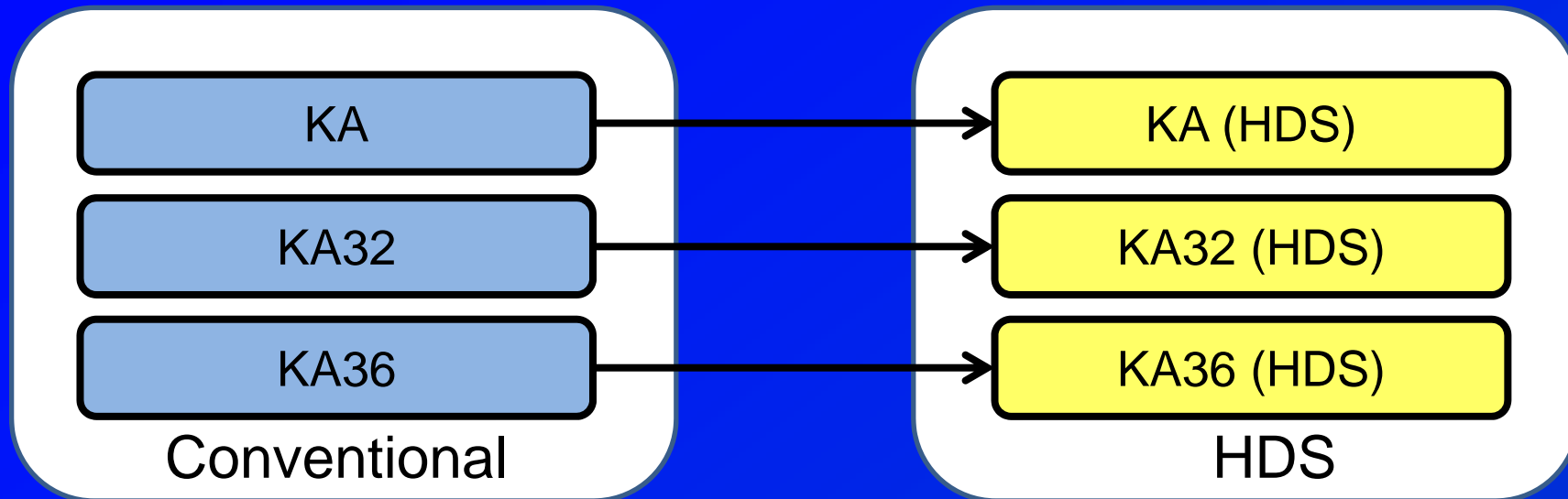
## 2. 高延性鋼 (HDS : Highly Ductile Steel) のコンセプト <sup>5</sup>

- (1) 伸びが従来鋼 (規格要求値) の1.5倍以上
- (2) 降伏、引張強さ、疲労強度、溶接性は従来鋼と同等
- (3) 船級ルールに適合  
(既にNKより承認され、Notation付与)
- (4) 従来の構造設計を変更せずに適用可能

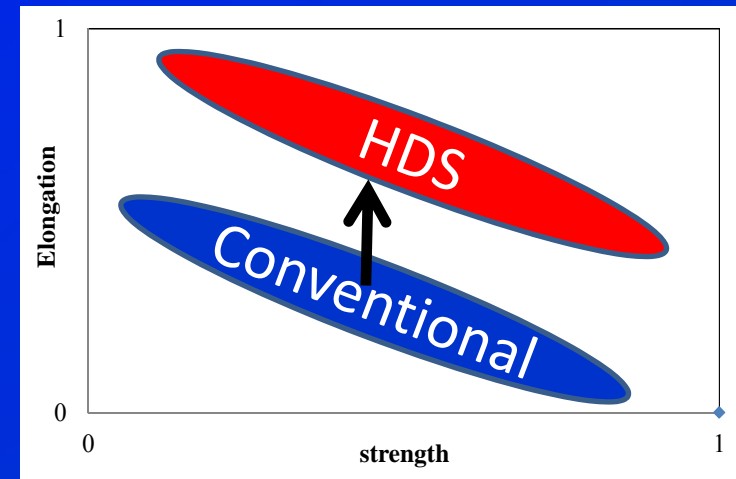


**HDSは、従来の設計を変更せずに、鋼板を変更するのみで  
適用可能であることが最大の利点**  
(既存研究は大幅な設計変更やコスト・検査面の問題等で普及難しかった)

# これまでに開発されたHDSの種類

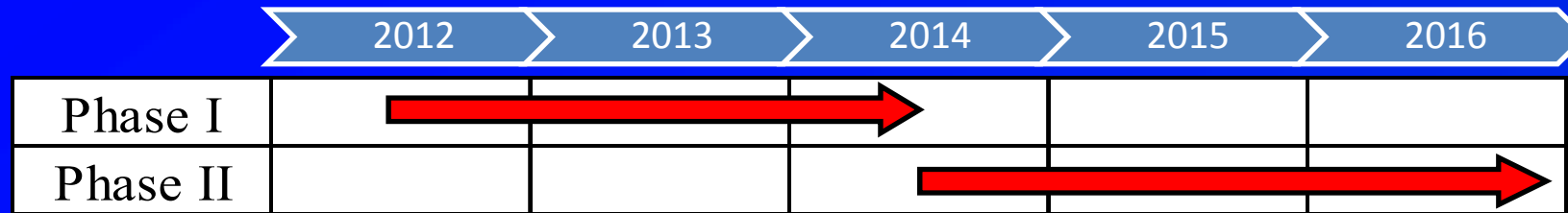


- 一般的に、伸びは強度と反比例
- 高張力鋼に対して、HDSを製造することは技術的に難易度が高い。
- 「伸び」の開発目標設定がキーポイント
- 当所の最先端シミュレーションを活用しつつ、開発目標を設定
- 新日鐵住金が開発成功→我が国の国際競争力強化



# HDS プロジェクト

7



## <HDSプロジェクト>

- 2012年より、HDS プロジェクト開始
- Phase I + Phase II 構成
- 当研究所は、材料開発段階から、材料メーカーと共に研究に貢献。
- Phase II: NK「業界要望による4社共同研究」として実施
- 「衝突時の被害低減のための船体構造への高延性鋼(HDS)適用に関する研究」



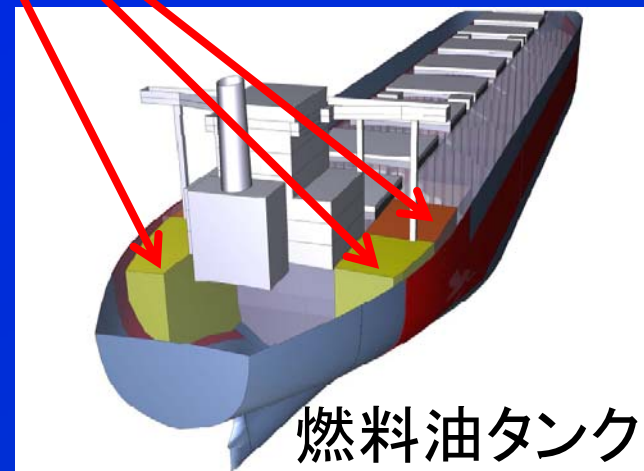
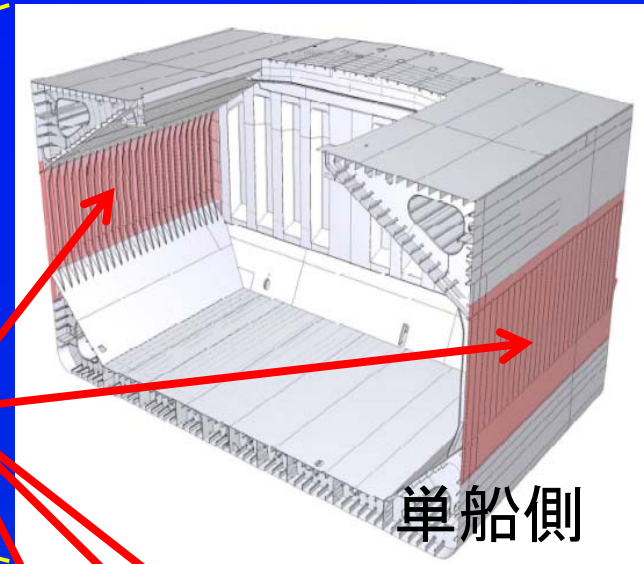
## <研究目的>

- 衝突時の油タンカー荷油タンク破壊に係るHDSの効果を検証
- 新鋼材の適用部材検討

### 3. 実船適用例



高延性鋼  
(HDS)



- 実船適用 大型船10隻(2017年7月現在)
- 単船側及び燃料油タンク
- 使用量 約3000トン/隻
- 適用船舶数増加中

- 高延性鋼は、NKにより承認
- 高延性鋼を使用した船舶にNotation付与
- 他船級も検討中
- DNV-GL 類似のノーテーション「COLL」

### ClassNK Notation

“Hull Protection by Highly Ductile Steel” (HP-HDS)

#### Descriptive Note:

高延性鋼使用箇所記載

#### Material grade of HDS

HDS を個別に承認する “HD XX” “XX” は規則要求値に対する伸び率を記載する

### Notation効果

衝突や座礁に対するエネルギー吸収に効果のあるHDSを適用した船舶



安全・環境に配慮した船舶であることをアピール可能  
今後は、保険料軽減や入港税減免などへの反映も期待



# 5.1 非線形シミュレーション(解析条件)

## <衝突シナリオ>

満載VLCCが満載VLCC船体中央部に衝突

LxBxD = 330x60x30 [m]

衝突速度: 1~12kt → 限界衝突速度推定

衝突角度: 30, 45, 60, 75, 90, 105, 120, 135, 150

## <解析条件>

解析コード: LS-DYNA ver.971 陽解法(⇔陰解法)

衝突船・被衝突船共に弾塑性体モデル(計約100万要素)

両舷変形 → ハルガーダー水平曲考慮

材料構成則: 相当応力-相当塑性歪多直線近似(MAT24)

破壊(Barba's則+ stress-tri-axiality考慮)

歪速度依存性考慮(Cowper-Symonds Model)

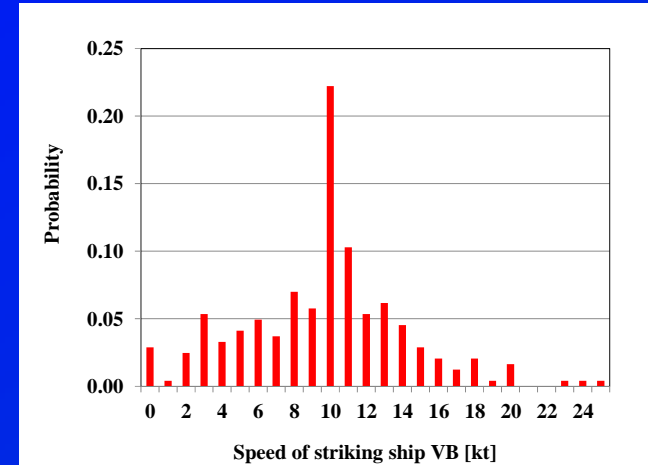
接触判定: ペナルティ法(自己接触含む)

荷油タンク質量モデル化(船体中央部9タンク)

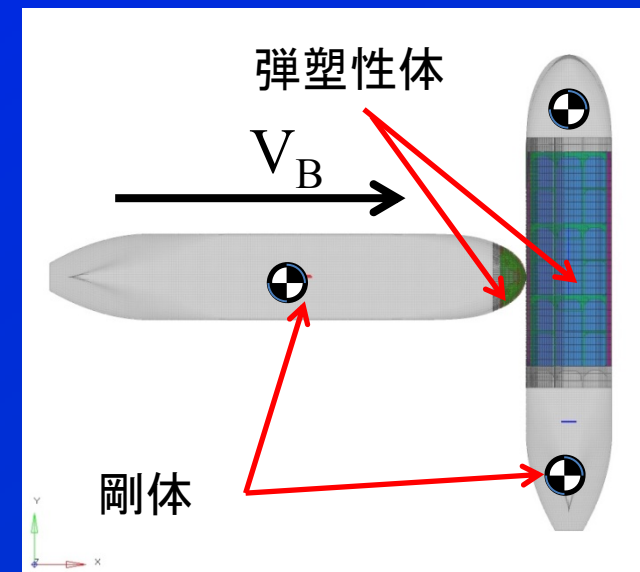
船体6自由度運動考慮(質量マトリクス定義)

海水影響: 付加水質量により考慮(Sway, Surge)

静的復元力: Spring要素(Roll, Pitch, Heave)

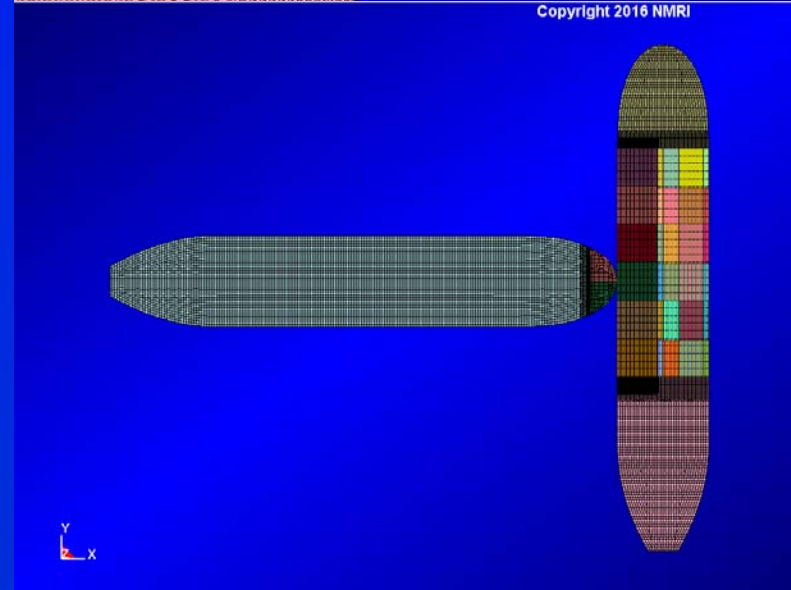
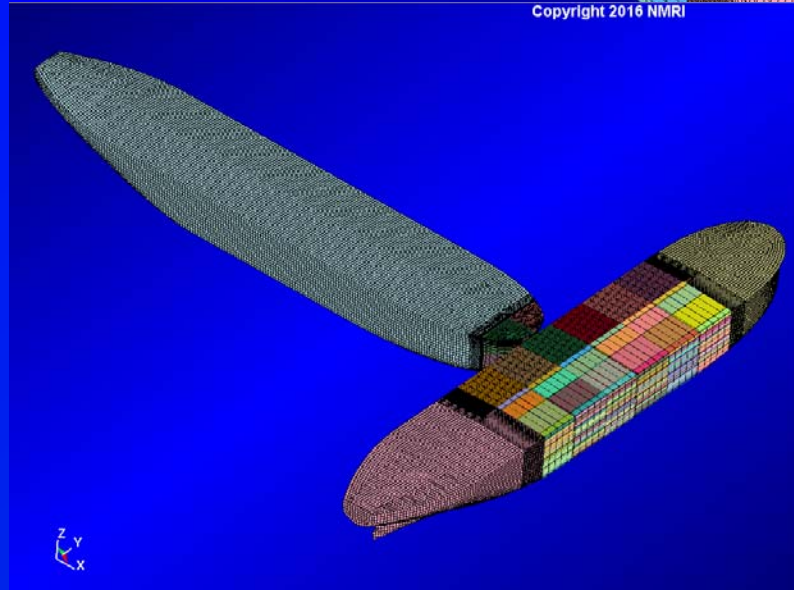
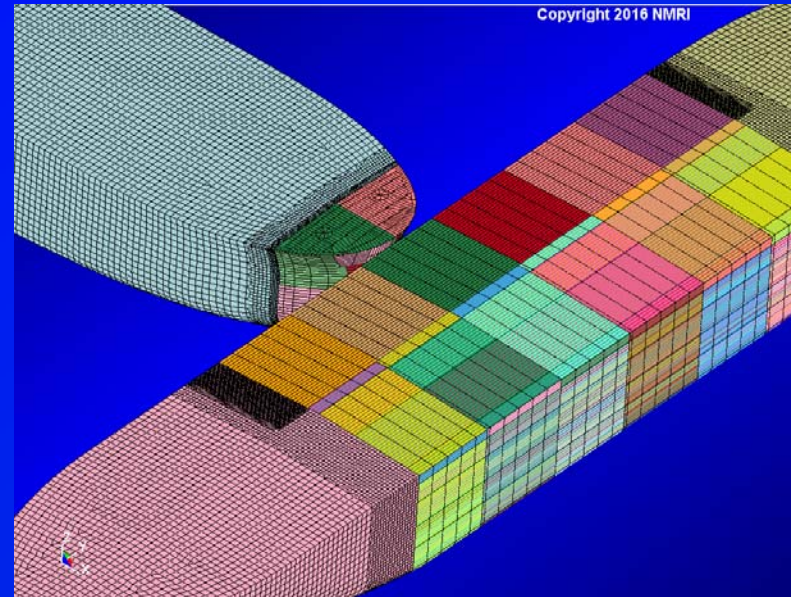
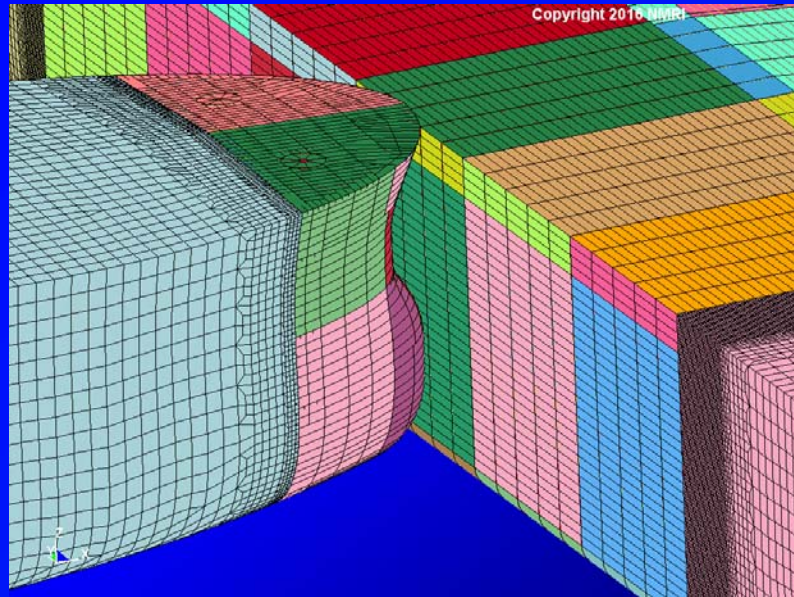


衝突船速度の確率密度分布  
(山田&金湖、2014)



# 3次元非線形シミュレーション解析モデル

12



# シミュレーション解析一覧

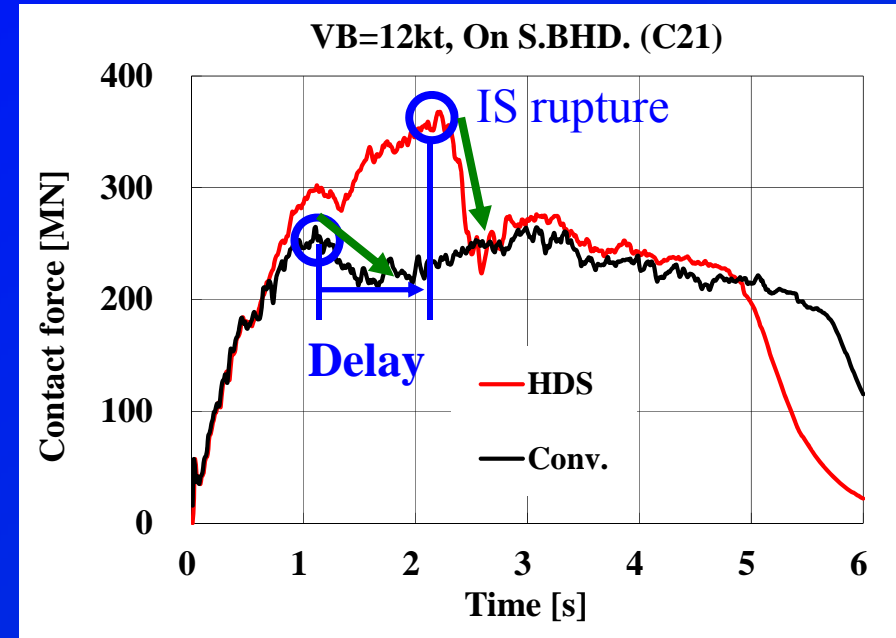
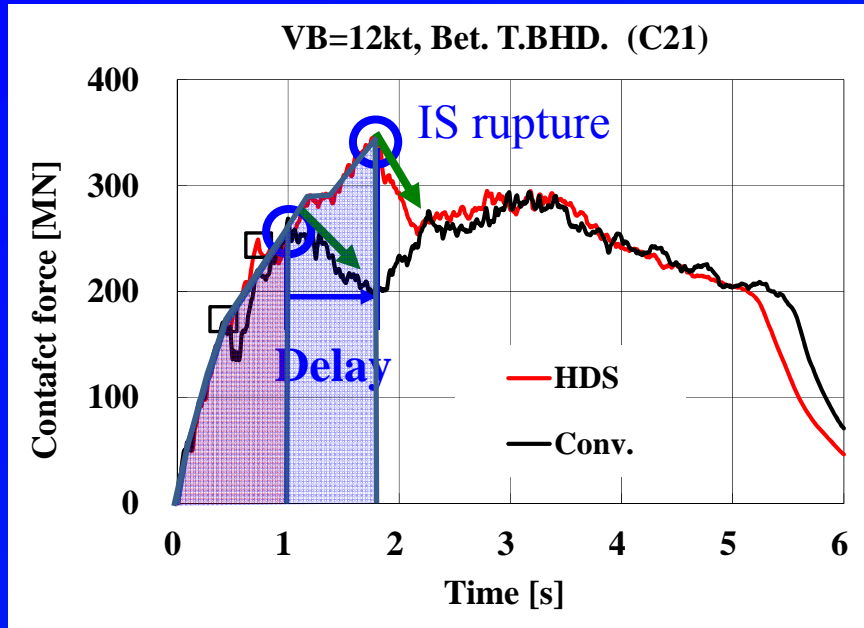
## 3種類のシリーズ解析

Simulation No.	Phase	Struck ship model	Struck ship motion	Collision Angle	HDS Application Pattern	Outer shell	Outer shell longi.	Inner shell	Inner shell longi.	Outer shell bilge	Other members	Number of cases
Simulation 1	I	Model 1 (1 tank)		90	Conventional							44
					Partial Application I	○		○				
Simulation 2	II	Model 2 (9 tanks)	Considered	30-150 (oblique)	Conventional							53
					Partial Application I	○		○				
					Partial Application II	○	○	○				
					Full Application	○	○	○	○	○	○	
Simulation 3	II		Fixed (Conservative)	90	Conventional							45
					Partial Application OS	○	○					
					Partial Application IS			○	○			
					Partial Application OS+IS+B	○	○	○	○	○		
						Total						142

- Simulation 1: 真横90度衝突, 44ケース
- Simulation 2: 斜め衝突、53ケース
- Simulation 3: 変形量影響、45ケース

## 5.2 90度衝突 反力履歴の比較

高延性鋼適用部材：外板及び内板(ロンジ適用なし)



横隔壁間

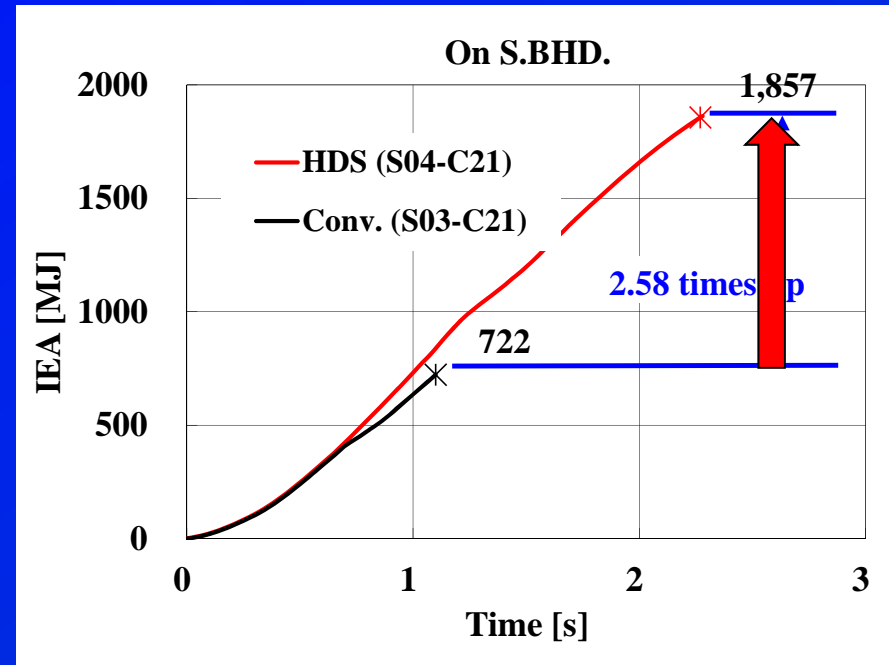
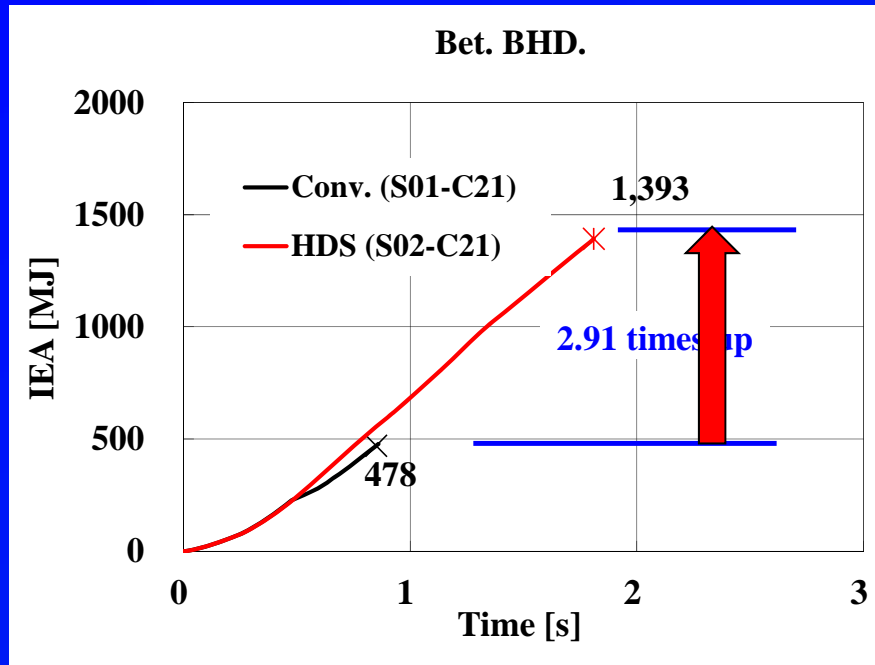
横隔壁直上

黒：従来鋼、赤：HDS

- 荷油タンク破断後に接触反力は急激に低下.
- HDS適用により、荷油タンク破壊タイミングの遅延確認
- ( $T_{rupture}$ ; 0.87s  $\rightarrow$  1.81s, 1.11s  $\rightarrow$  2.28s, 2 times later).

## 5.2 90度衝突 エネルギー吸収量の比較

17

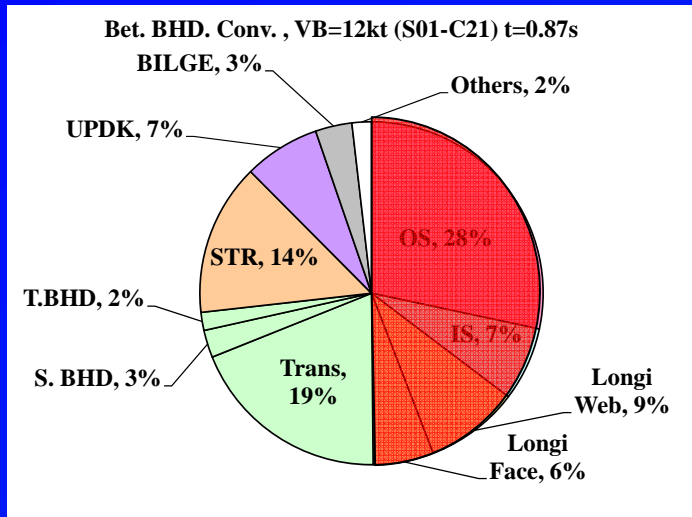


IEA (Internal Energy for ship A): 被衝突船のエネルギー吸収量

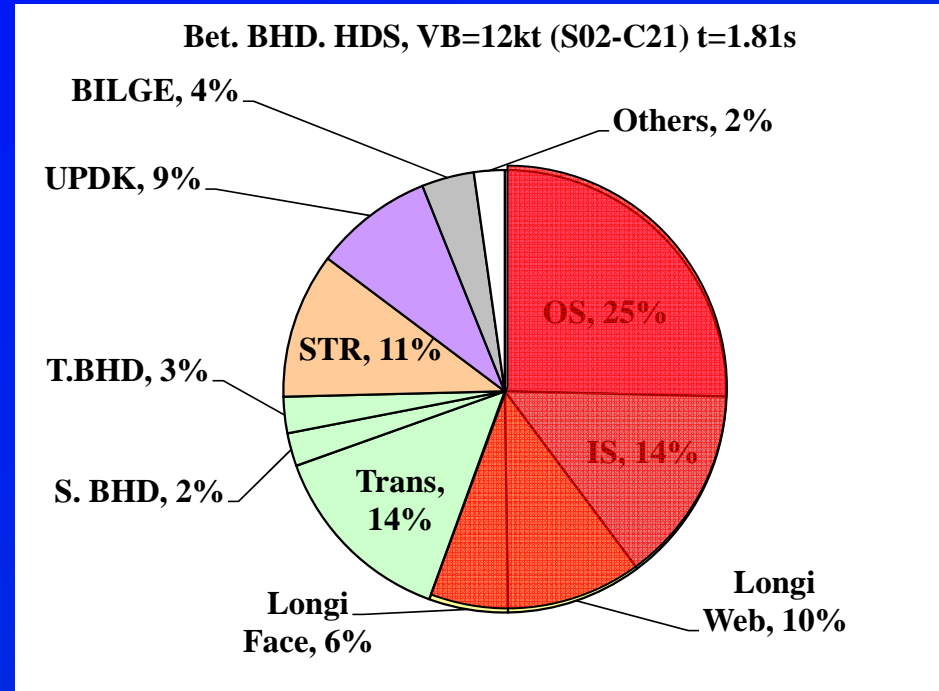
被衝突船の荷油タンク破壊までのE吸収量は、従来鋼に比べ約2.6-2.9倍に増加。

## 5.2 90度衝突 構造部材毎のエネルギー吸収比率

T.BHD間衝突 (被衝突船756 部材グループの解析より)



Conventional **478**[MJ]



HDS **1393**[MJ]

- HDS適用の場合の吸収Eの絶対値は、従来鋼の約3倍
- 外板によるエネルギー吸収量が最大(主に、外板の膜力効果)
- 外板(OS)+内板(IS)+ロンジ(Longitudinal)で全体の50%以上のE吸収

## 5.2 90度衝突 (Simulation I) ~限界衝突速度~

**限界衝突速度( $V_{B,cr}$ ):** 衝突時に相手船の荷油タンクに破孔を生じさせる最小速度。  
当該速度未満では破孔を生じさせない。→ 運行上の指針となる。

### 44ケースの解析

	VB [kt]														
	2	4	5	6	7	8	9	10	11	12	15	16	18	20	
Case	C34	C31	C29	C23	C33	C25	C27	C26	C28	C21	C30	C36	C35	C32	
S01	○ No rupture ○			×	×	×	Rupture			×	×	×	-	×	×
S02	×	×	×	○	×	○	×	×	×	×	×	×	×	×	
S03	×	×	×	○	×	×	×	×	×	×	×	-	×	×	
S04	○	×	×	○	×	○	○	○	○	×	×	×	×	×	

限界衝突速度  
( $V_{B,cr} = 5.5\text{kt}$ )

- 1セル1ケース (1週間)
- 簡易推定法妥当性検証
- 簡易推定法とFEA良好な相関

### 限界衝突速度の簡易推定法

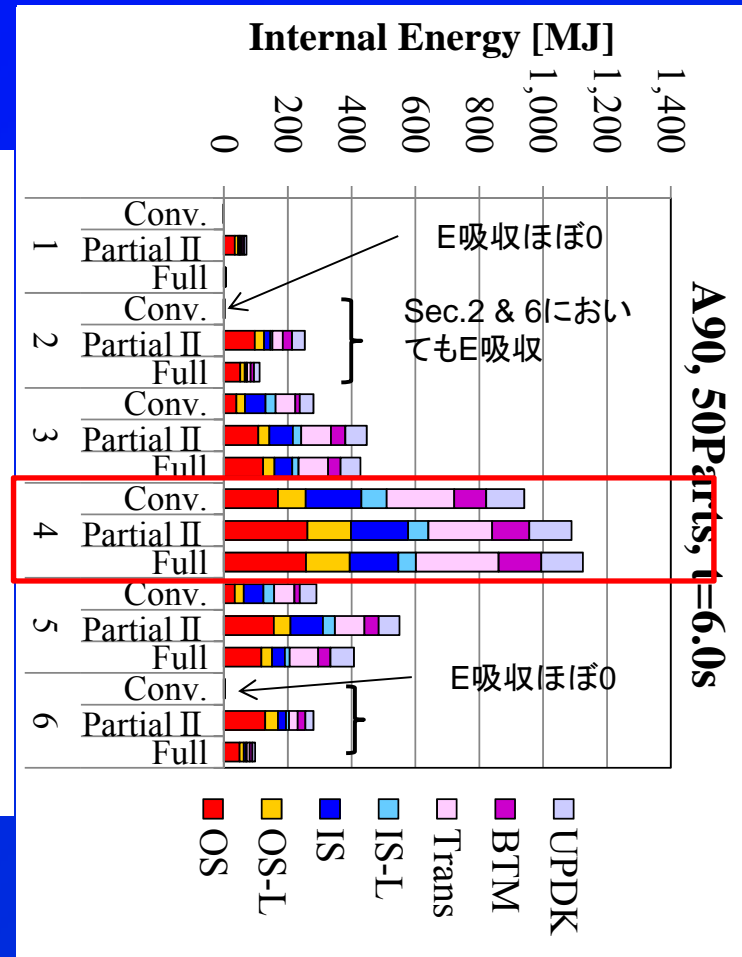
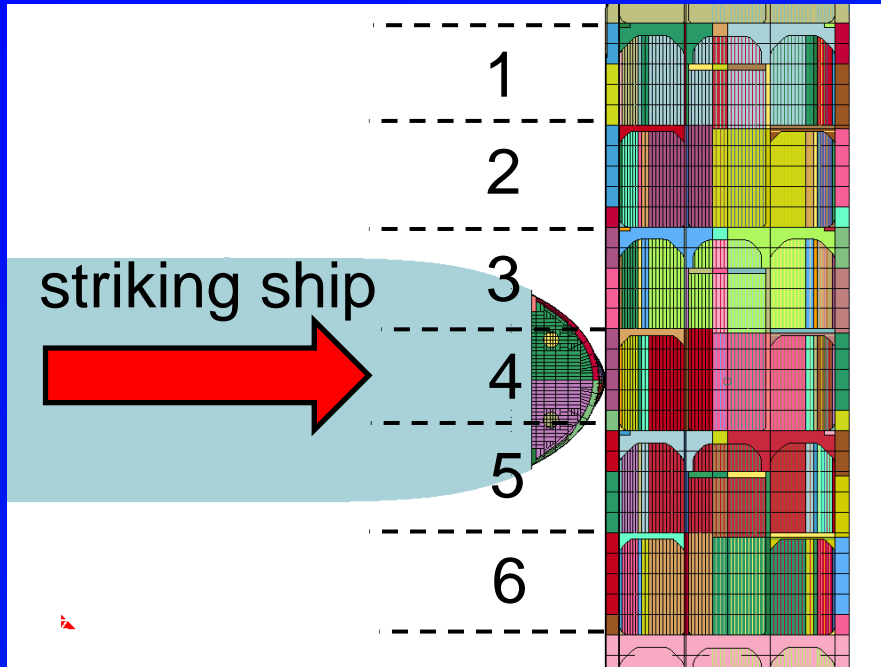
$$V_{B,cr} = \sqrt{2E_{s,cr} \times \frac{M_A + M_B}{M_A M_B}}$$

### 簡易法とFEAの比較

Case	VB,cr [kt]		Error [%]
	SF+FEA (1case)	FEA (44cases)	
1	5.1	5.5	7.3
2	8.7	8.5	-2.4
3	6.3	6.5	3.1
4	10.0	11.5	13.0

# 5.3 E吸収メカニズム エネルギー吸収量の空間分布

## 被衝突船のSection定義



Sec.4のエネルギー吸収最大

外板、Trans部材のエネルギー吸収が多い

HDSを適用により、衝突Sectionだけでなく、離れたSectionでもエネルギー吸収 → 外板のMembrane(膜力)効果

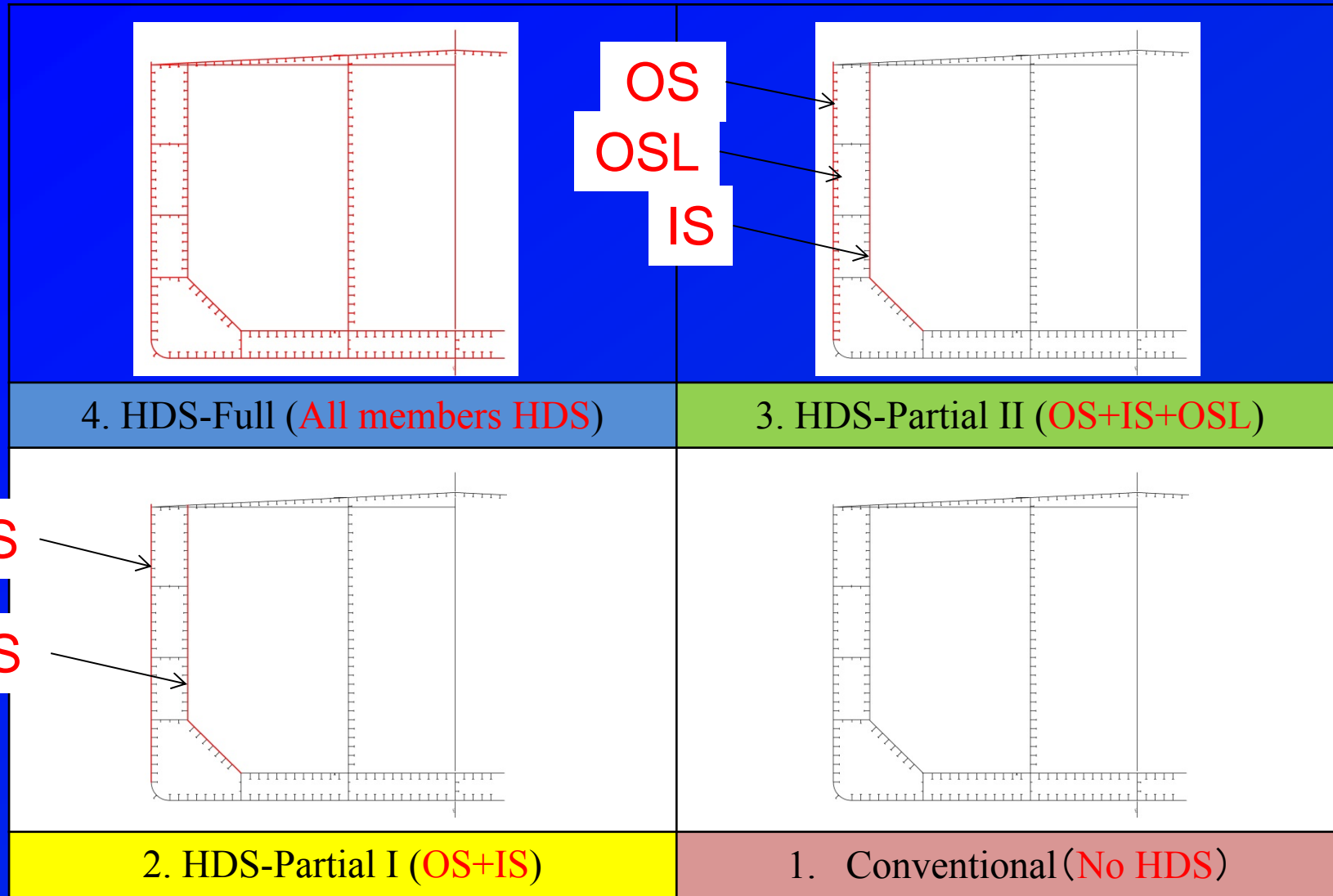


## 5.3 E吸収メカニズム

1. 延性増大による各要素のE吸収率1.5倍
2. 延性増大による荷油タンク破壊遅延(時間軸)
3. 船長方向のエネルギー吸収量増大(空間軸)

上記1.~3.の相乗効果により、荷油タンク破断までのエネルギー吸収量が増大している。

# 5.4 HDS 適用部材検討(4パターン)



### 5.3 HDS適用部材検討

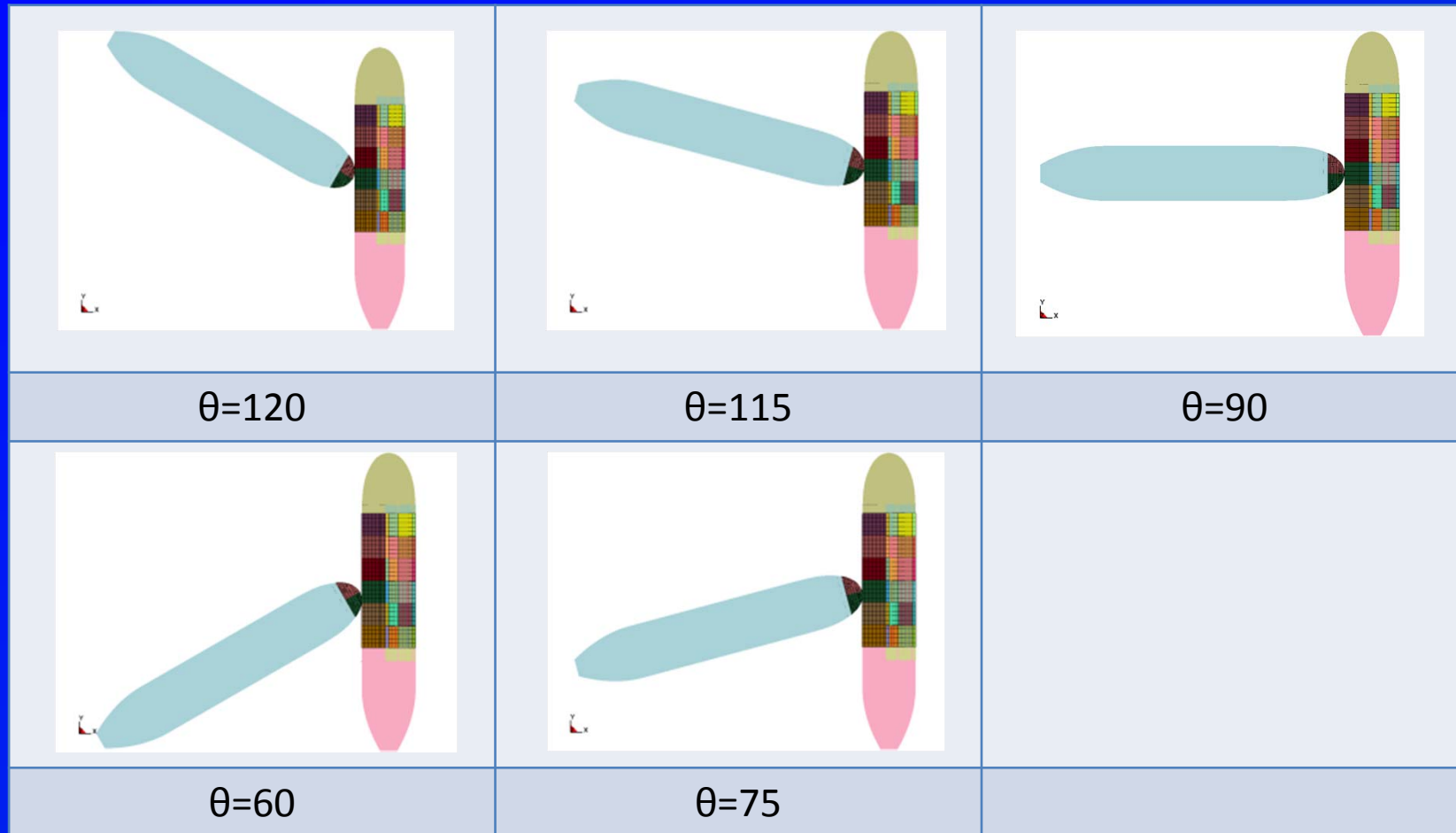
HDS Application Pattern		Outer shell	Inner shell	Outer shell longi.	Inner shell longi.	Other members	OS Rupture	IS Rupture
		<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;"> <span style="color: red; font-weight: bold;">●適用</span> </div>						
1	Conventional						×	×
2	HDS-Partial I	●	●				×	×
3	HDS-Partial II	●	●	●			○	○
4	Full	●	●	●	●	●	○	○

×タンク破口発生

○タンク破口なし

- ・外板・内板のみへの適用では、荷油タンク破損は防ぎきれない。
- ・荷油タンク破壊を防止するためには、外板ロンジへのHDS適用が有効。
- ・大変形：船側外板は、曲げ→膜力(=引張力)として効いている。

## 5.4 斜め衝突



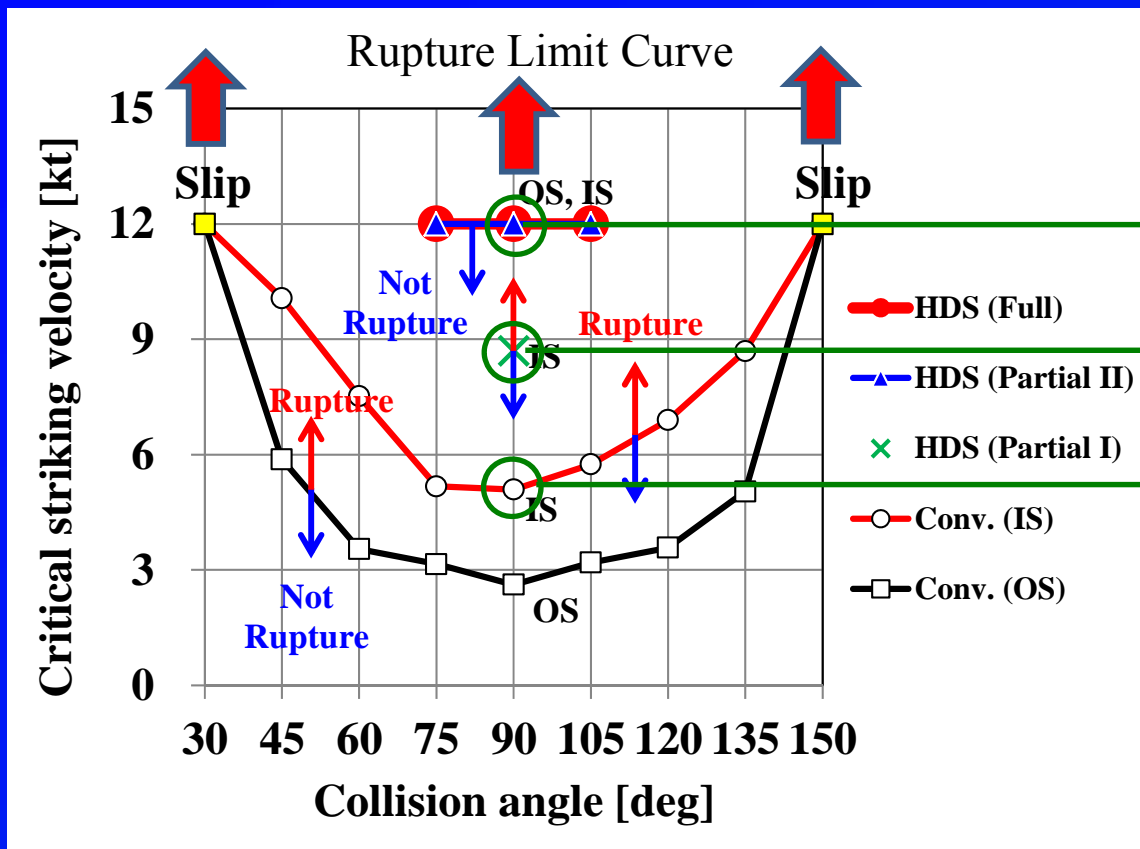
- $\theta=30, 45, 60, 75, 90(\text{right angle}), 105, 120, 135, 150$  (9 angles)
- 被衝突船前進速度なし仮定

## 5.4 斜め衝突 解析ケース (53 cases)

Velocity [kt]	Angle								
	30	45	60	75	90	105	120	135	150
12	○	×	×	×	×	×	×	×	○
10	-	×	-	×	-	-	-	×	-
9	-	○	-	-	-	-	-	○	-
8	-	○	×	×	-	-	-	○	-
7	-	○	×	×	×	×	×	-	○
6	-	○	○	○	×	×	○	○	○
5	-	-	○	○	×	○	○	○	○
4	-	-	○	○	○	○	○	○	-
3	-	-	-	-	○	-	-	-	-
2	-	-	-	-	○	○	-	-	-
1	-	-	-	-	○	-	-	-	-

- 3+3+46=52 cases, 1 case only for Partial I ( $\theta=90\text{deg}$ )
- × : IS rupture、○ IS not rupture

# 限界衝突速度の破断限界曲線 (Rupture Limit Curve: RLC) 29



Partial II (OS+OSL+IS)

Partial I (OS+IS)

Conventional

Velocity [kt]	Angle								
	30	45	60	75	90	105	120	135	150
12	○	×	×	×	×	×	×	×	○
10	-	×	-	×	-	-	-	×	-
9	-	○	-	-	-	-	-	○	-
8	-	○	×	×	-	-	-	○	-
7	-	○	×	×	×	×	×	-	○
6	-	○	○	○	×	×	○	○	○
5	-	-	○	○	×	○	○	○	○
4	-	-	○	○	○	○	○	○	-
3	-	-	-	-	○	-	-	-	-
2	-	-	-	-	○	○	-	-	-
1	-	-	-	-	○	-	-	-	-

各角度毎の限界衝突速度推定

FE解析結果

- 90度の限界衝突速度が最も小さい(被衝突船に厳しい)
- HDS-Full, HDS-Partial II: 12kt衝突でも荷油タンク破壊なし

## 6.まとめ

- (1) 高延性鋼適用により、荷油タンク破壊までのエネルギー吸収量が従来鋼に比べ2.6-2.9倍となる。
- (2) 高延性鋼適用によるE吸収メカニズムが明らかとなった。
- (3) 高延性鋼適用による限界衝突速度向上
- (4) 高延性鋼の効果的適用部材検討の結果 外板ロンジ適用効果重要
- (5) 研究過程で得られた知見等より、HDS適用範囲を決定し、世界で初めてHDSを実船適用した(10隻)。今後も適用船舶数増加が見込まれる。
- (6) 高延性鋼は、日本海事協会により、承認されており、使用することにより、Notationが付与される。
- (7) 衝突時のタンカーからの油流出防止だけでなく、船舶の耐衝突安全性向上の観点からも高延性鋼の適用は有効である。

- 新日鐵住金株式会社、今治造船株式会社、(独)海上技術安全研究所、一般財団法人日本海事協会、2016、“衝突時の被害低減のための船体構造への高延性鋼(HDS)適用に関する研究報告書”。
- 大川鉄平、紙田健二、船津裕二、山田安平、戸澤秀、市川和利、今城大貴、柳田和寿、石田浩司、2016、“衝突時の被害低減のための船体構造への高延性鋼適用に関する研究(その1)船体用高延性鋼HDSの開発について”、日本船舶海洋工学会春季講演会論文集第22号。
- 山田安平、船津裕二、菅勇人、戸澤秀、有馬俊朗、市川和利、紙田健二、稲井智明、2016、“衝突時の被害低減のための船体構造への高延性鋼適用に関する研究(その2)高延性鋼が耐衝突強度に与える影響について”、日本船舶海洋工学会春季講演会論文集第22号。
- 紙田健二、稲井智明、市川和利、小田直樹、菅勇人、上西豊、山田安平、戸澤秀、2016、“衝突時の被害低減のための船体構造への高延性鋼適用に関する研究(その3)高延性鋼の実船適用と船級Notationについて”、日本船舶海洋工学会講演会論文集第22号。