

# タンカー構造と船体の破損強度について

## Tanker Structure and Hull Failure Strength

Hajime Kawano and Masaru Hirakata,  
National Maritime Research Institute, Japan.



# Contents;

- ◆ 1. はじめに
  - ◆ 1 - 1. タンカー油流出事故
  - ◆ 1 - 2. タンカー構造のIMOルール来歴
- ◆ 2. 船体の経年劣化について
  - ◆ 2 - 1. 代表的な強度劣化
  - ◆ 2 - 2. 腐食衰耗データ特性
  - ◆ 2 - 3. 縦曲げ強度の劣化
- ◆ 3. 老朽船の破損強度について
  - ◆ 3 - 1. 大規模破壊の基本メカニズム
  - ◆ 3 - 2. 事例スタディから
- ◆ 4. まとめ



# 1-1. タンカー油流出事故

Large-Scale Oil Spill Accident by Tankers

year	ship name	flag state	volume (10 <sup>3</sup> kL)	causes
1967	“Torrey Canyon”	Liberia	119	grounding
1972	“Sea Star”	Korea	120	collision & fire
1976	“Urquiola”	Spain	100	grounding
1977	“Hawaiian Patriot”	Liberia	95	foundered 12yrs
1978	“Amoco Cadiz”	Liberia	223	grounding
1979	“Atlantic Empress”	Greece	287	collision & fire
1979	“Independenta”	Rumania	95	collision & fire
1983	“Castillo de Bellver”	Spain	252	fire
1988	“Odyssey”	Greece	132	foundered 17yrs
1989	“Exxon Valdez”	USA.	37	grounding
1991	“ABT Summer”	Liberia	260	Fire
1993	“Braer”	Liberia	85	grounding
1996	“Sea Empress”	Liberia	72	grounding
1997	“Nakhodka”	Russia	6.2	foundered 26yrs
1999	“Erika”	Malta	10 + $\alpha$	foundered 25yrs
2001	“Baltic Carrier”	Marshall Is.	2.5	collision & fire
2002	“Prestige”	Bahama	(4)??	foundered 26yrs



# 1-2. タンカー構造のIMOルール来歴 VLCC構造様式の変遷

表 3-1-1 VLCC構造の変遷

<p>第一世代 VLCC</p> <p>↓</p> <p>大量輸送</p> <p>↓</p>	<p>昭和40年代建造。</p> <p>1966-79年に約700隻以上建造された。</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・大量輸送時代の海上石油輸送の花形として VLCC 出現。</li> <li>・出光丸 20.9 万 DWT (1966[昭 41]) 建造。</li> <li>・船の大型化に伴う技術開発が盛んになり設備大型化(マンモス dock)。</li> </ul>
<p>第二世代 VLCC</p> <p>↓</p> <p>省エネの高まり 環境対応への指向</p> <p>↓</p> <p>↓</p>	<p>トリーキャニオン号事故[*1]を契機とした、</p> <p>1987年発効の MARPOL 73/78に基づく設計船</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・基本設計要求; SBT 設置と総量、タンクサイズ、タンク配置(PL)、復原性、原油洗浄(COW)、イナートガスシステム、スロップタンク容量、など。</li> <li>・環境ニーズ指向隆盛; 搭載機器の自動化、メンテナンスフリー化、係船作業の合理化、居住性向上、タービンからディーゼルへ、ディーゼル主機 LongStroke 化、船体抵抗・推進性能の改善(KoltNozzle 等)、高張力鋼増大、など。</li> </ul>
<p>第三世代 VLCC</p> <p>↓</p> <p>ライフサイクルの 経済性・安全性</p> <p>↓</p> <p>(今日)</p>	<p>エクソンバルデス号事故[*2]を契機とした、</p> <p>Double Hull 化および SH タンカーのフェイス・アウ。</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・油漏れ対応の船体構造強化、タンク配置の変化、バラストタンク(防爆用)換気システム・防食対策が SH タンカーから変更</li> <li>・ESP 検査強化、検査用のアクセス確保。</li> <li>・船のリサイクル、解撤ほか。</li> <li>・バラスト時の重心問題(荷役時に SH より不安定)、静水中応力増加傾向、カーゴタンク底部の塗装多用(孔食)、など。</li> </ul>

注記 [\*1]--- トリーキャニオン号事故:1967年、英国シシリー諸島沖。

[\*2]--- エクソンバルデス号事故:1989年、アラスカ湾。

# 1-2. IMOタンカー構造ルールの主要来歴

## IMOでのタンカー構造ルールの主なる来歴

- 1954: ・海洋油濁防止条約
- 1969: ・ロードオントップ方式(運航時の汚染の防止)
- 1971: ・タンクの大きさ制限(衝突座礁における流出油量の制限)
- 1973: ・油排出監視制御装置(排出基準 ppm への合致を確保する)  
 ・分離バラスタンク SBT (運航時のバラスタ水廃棄による汚染を無くす)  
 ・損傷時復元性(衝突及び座礁事故後に船の浮力を確保する)
- 1978: ・MARPOL73/78 13E, SBTの防衛的配置(事故後の流出油量を減少する)、  
 ・イナートガス装置IGS(爆発を防止する); 現存タンカー対応は下表 IGS requirements を参照  
 ・原油洗浄システム COW(運航時の汚染を減少する); 現存タンカー対応は下表 COW rerui
- 1992: ・MARPOL73/78 13F. (新造タンカーの二重船殻化の要求)  
 ・同 13G. (既存船の対策要件)

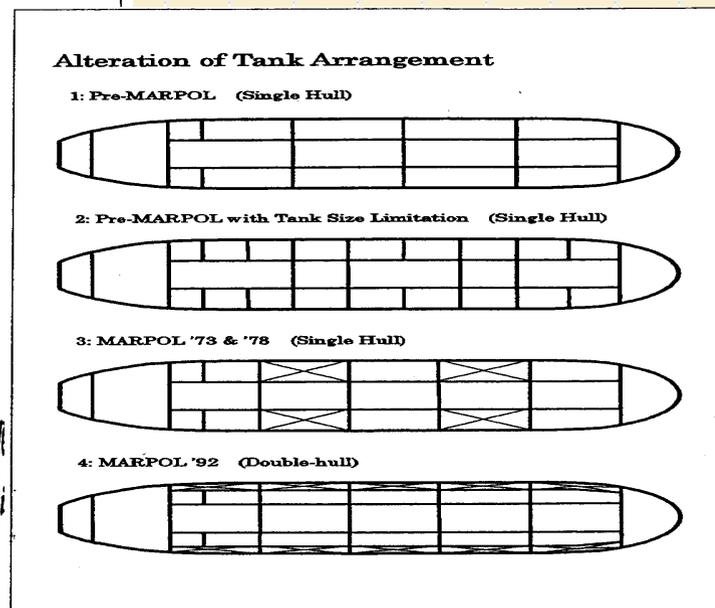


図 3.1-1. タンカーにおけるタンク配置の変化(模式図)



# 1-2. タンカー構造のIMOルール来歴

## タンカー構造へのESP適用化

IMO総会決議A.744(18)、SOLAS第XI章第2規則「Enhanced Survey Program」

検査強化プログラム(ESP)は1996年1月1日から強制化

(油タンカーに関する検査強化プログラムをAnnex Bとして定めている)

- 1) 受験要領書(Survey Program)の受験前の作成および提出
  - 2) 定期検査の一部として船底検査(Dry-dock Survey)の実施
  - 3) 船体構造の総合的状态を把握するための総合検査(Overall Survey)の実施
  - 4) 精密検査(Close-up Survey)の概念の導入
  - 5) 板厚計測箇所の詳細を規定し、検査官立会いの下で実施。(認定業者による計測も可) belt gaugingの実施
  - 6) 塗装の状態を含む検査中に得られた船体構造に関するデータを主管庁が査定する
- 7) 各検査報告書の記述内容(様式)を定め、本船での保管を義務付ける



# 1-2. タンカー構造のIMOルール来歴

## シングルタンカーの船齢制限

~~表 3.1-9~~ シングルハル・タンカーの船齢制限 (MEPC46での取決め)

対象船舶	船齢制限ほか
<b>カテゴリ-1:</b> 2万 D/W 以上の Pre-MARPOL 船 (1982 年以前の建造船が該当)	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 2003 年～2007 年にかけて順次フェースアウト。</li> <li>● 2005 年を越えて使用する場合、CASが必要。</li> </ul>
<b>カテゴリ-2:</b> 2万 D/W 以上の MARPOL 船 (1982 年～1996 年の建造船が該当)	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 2003 年以降、原則、船齢 25 年に達した船から順次フェースアウト。</li> <li>● 最終使用期限は 2015 年。</li> <li>● 2010 年を越えて使用する場合、CASが必要。</li> </ul>
<b>カテゴリ-3:</b> 5千～2万 D/W の Pre-MARPOL 船	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 2003 年から船齢に従い順次フェースアウト。</li> <li>● 最終使用期限は 2015 年。</li> </ul>

注, (1) MARPOL 船: MARPOL 73/78 附属書Iの 13(SBT)、13B(COW)、13E(SBT/PL) 及び 18[4] (SBT,COW 関連)で規定されている新船のための要件を満たすもの。

Pre-MARPOL 船: 以上の要件を満足していないもの。

(2) CAS: Condition Assessment Scheme 船舶の状態を評価する新たな検査方案。

## 2. 船体の経年劣化について

### 2-1. 代表的な強度劣化

#### (1) 腐食衰耗

- a. 骨材の腐食
- b. 板材の一樣腐食
- c. 局部腐食

#### (2) 疲労き裂

#### (3) 塗膜の劣化



## 2-1. 代表的な強度劣化(1)

### (1) 腐食衰耗

#### a. 骨材の腐食

#### b. 板材の一樣腐食

#### c. 局部腐食

### (2) 疲労き裂

### (3) 塗膜の劣化

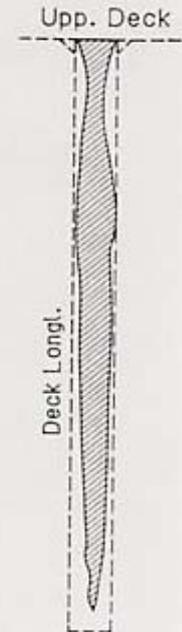
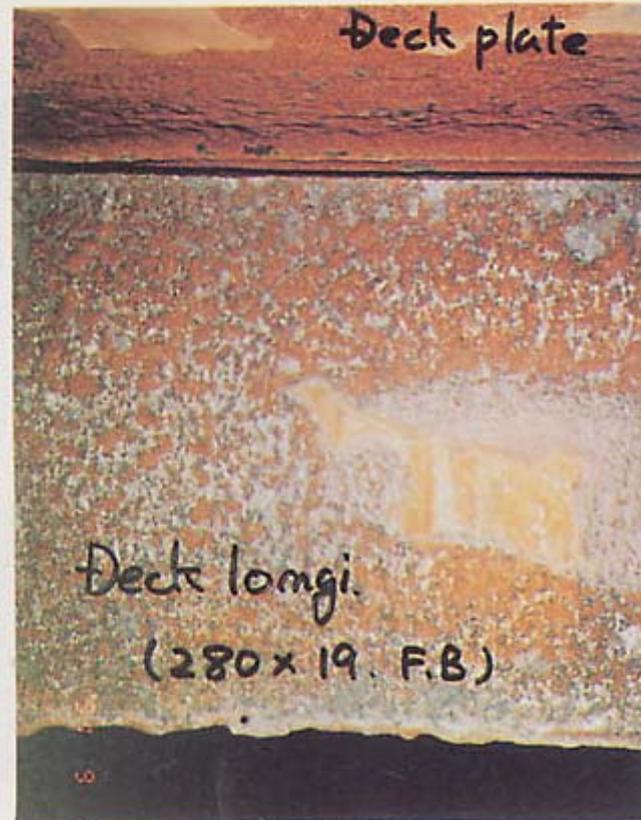


写真 2.2 デッキロンジの腐食衰耗

WBT及びCO/WBTのデッキロンジが腐食衰耗してすみ肉がなくなり、甲板から離脱していた。デッキロンジの先端部はナイフエッジ状となっている(船齢15年)。



# 2-1. 代表的な強度劣化(2)

- (1) 腐食衰耗
  - a. 骨材の腐食
  - b. 板材の一樣腐食**
  - c. 局部腐食
- (2) 疲労き裂
- (3) 塗膜の劣化

流速影響、  
温度影響、

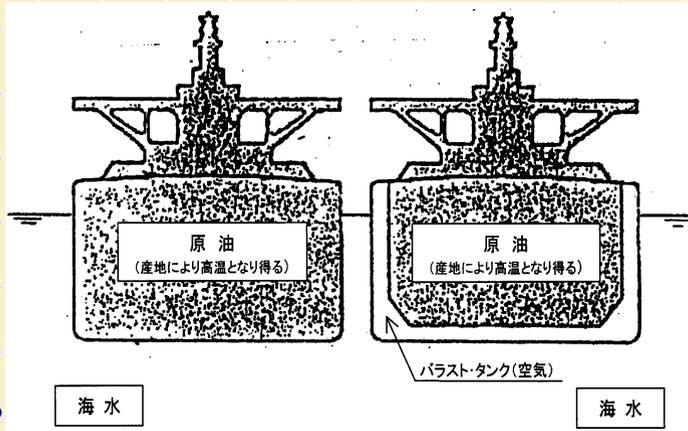


図 4.5-1. DHタンカーのバラストタンクによる保温効果(模式図)

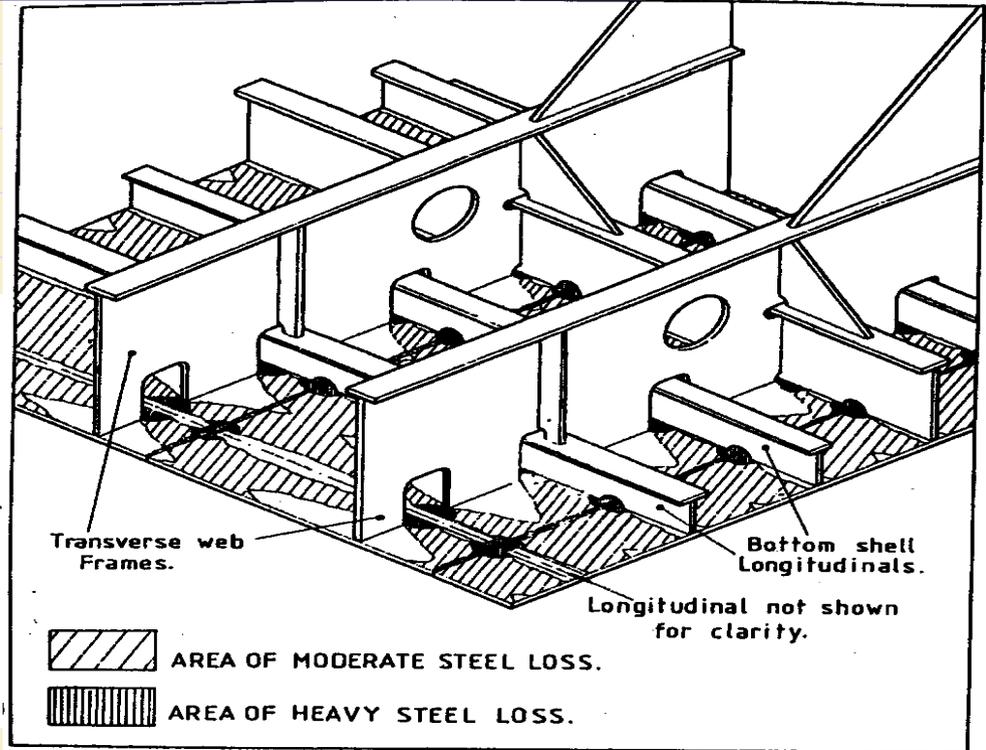


図 4.2-5 . 船底部の腐食

# 2-1. 代表的な強度劣化(3)

## (1) 腐食衰耗

- a. 骨材の腐食
- b. 板材の一樣腐食
- c. **局部腐食**

## (2) 疲労き裂

## (3) 塗膜の劣化

孔食(ピッチング)、  
応力集中部、  
グルーピング腐食

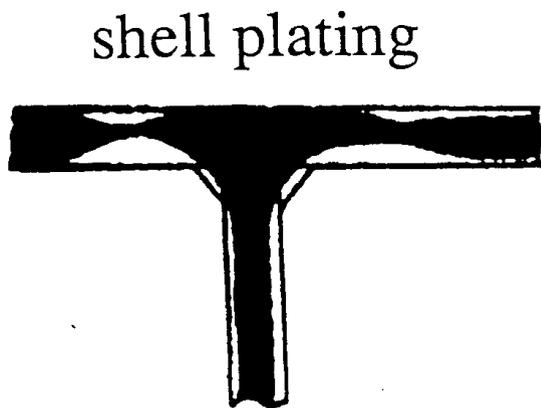


図 4.2-8. 隅肉溶接のグルーピング腐食

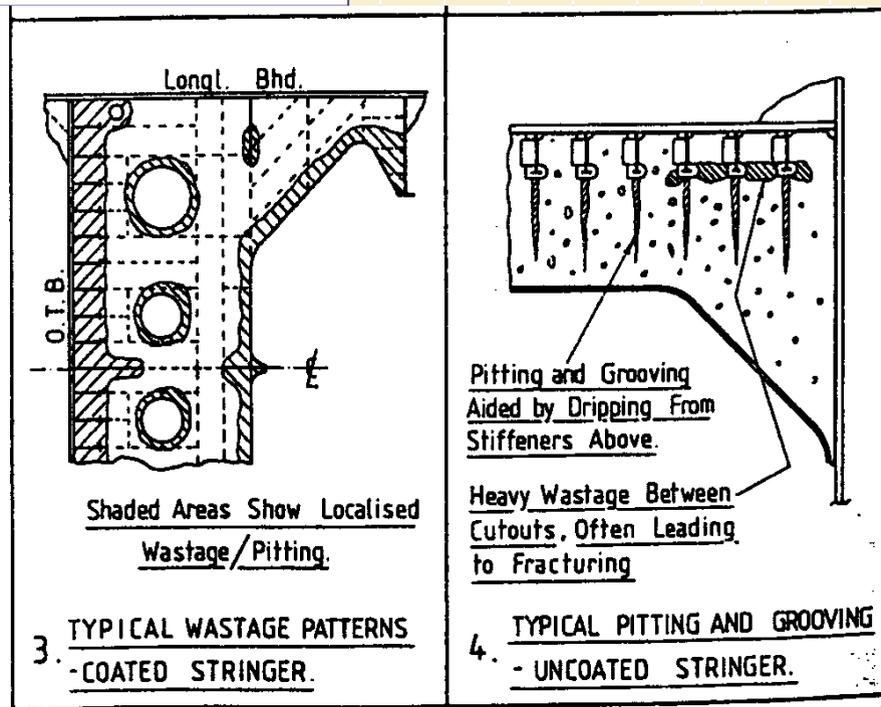


図 4.2-7. 桁材の代表的な局部腐食



# 2-1. 代表的な強度劣化(4)

## (1) 腐食衰耗

- a. 骨材の腐食
- b. 板材の一樣腐食
- c. 局部腐食

## (2) 疲労き裂

## (3) 塗膜の劣化

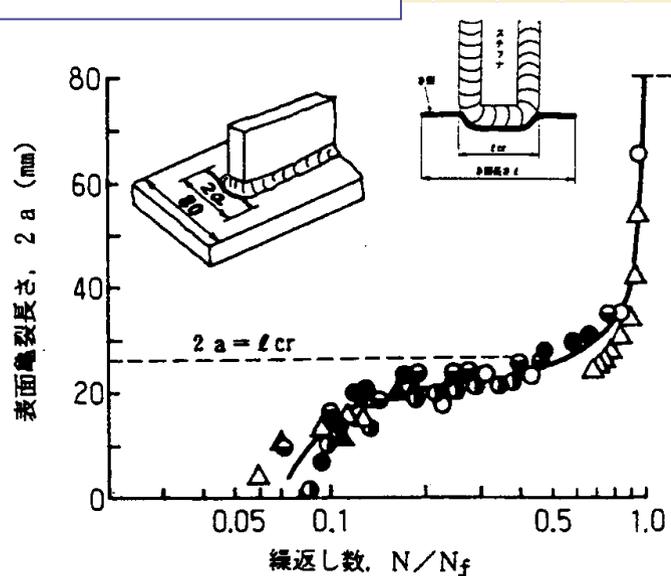


図 4.2-10. 実験で得られた疲労クラック表面長さ と 無次元化繰返し数の関係

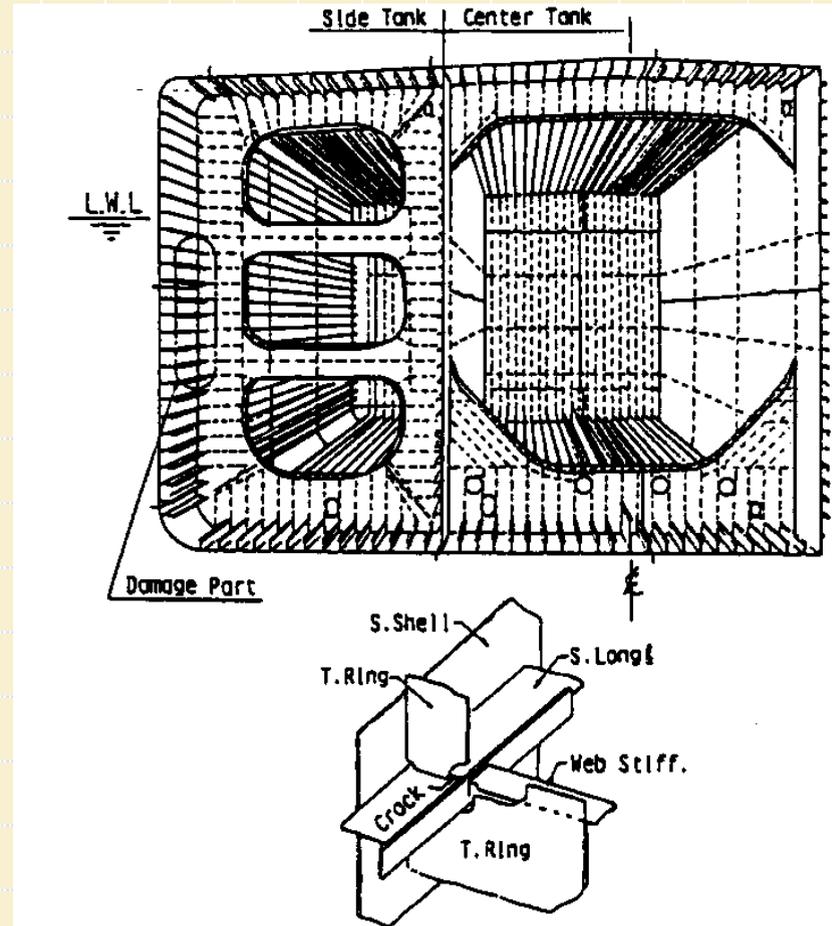


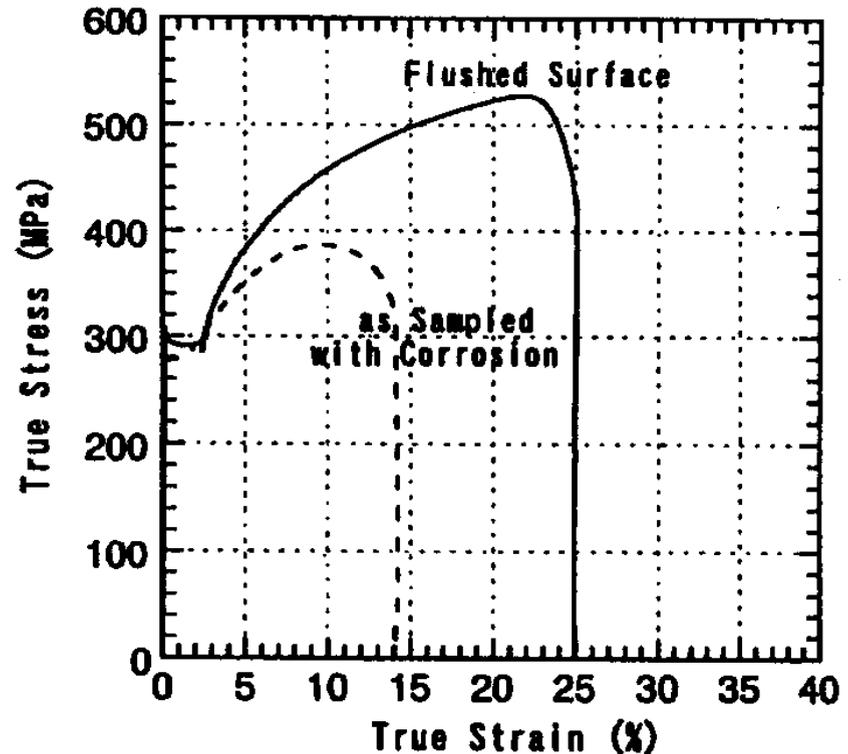
図 4.2-9. 第二世代 VLCC 船側縦通材の疲労クラック



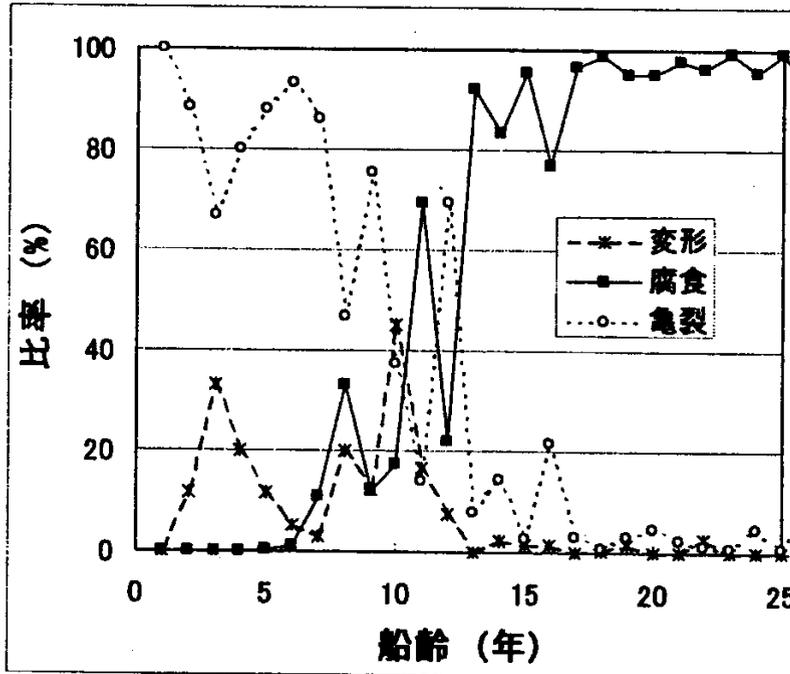
## 2-1. 代表的な強度劣化(5)

経年材の応力vs.歪線図の特性変化:

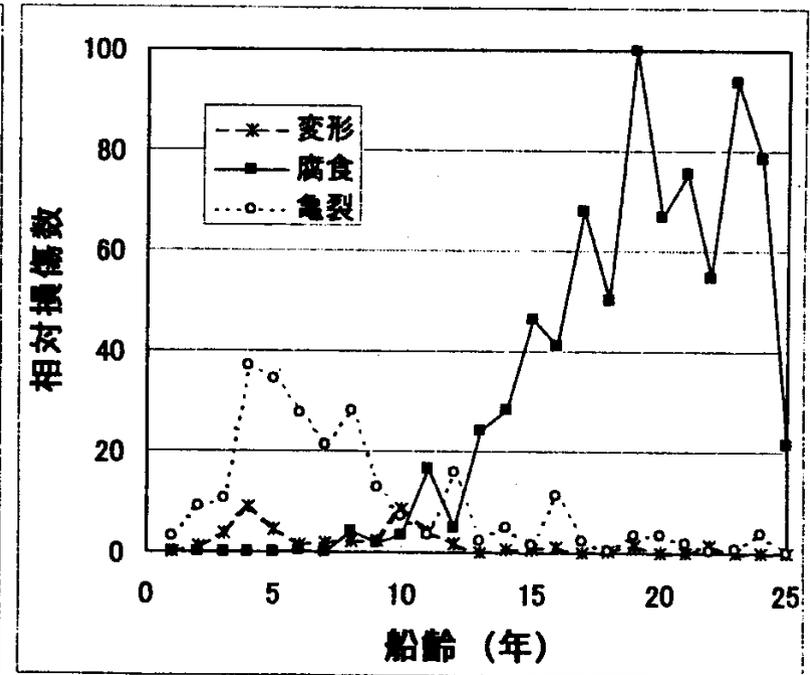
- a. 経年船から削り出し試験片の特性は処女材相当
- b. 経年材の見掛け特性低下は、表面凹凸に起因する



# 2-1. 代表的な強度劣化 統計的な劣化頻度



(a) 損傷形態別の推移



(b) 損傷数の推移

図1 損傷統計から見た船齢毎の損傷傾向



# 2. 船体の経年劣化について

## 2-2. 腐食衰耗データの特性分析

### 日本海事協会の腐食データベース分析:

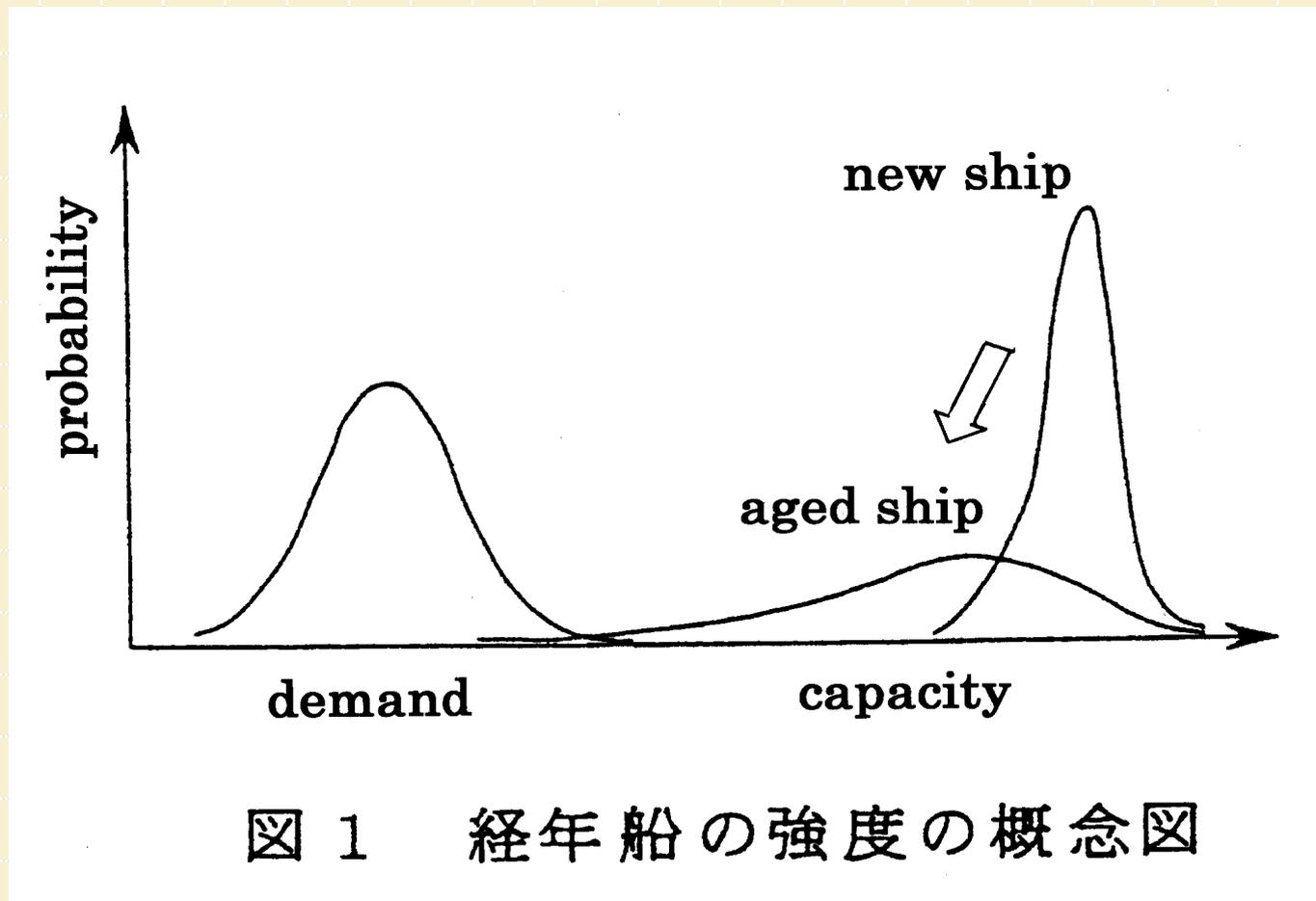
表 4.3-5. タンカー構造部材の衰耗量に関する推定結果

部材・部位		記号	50%累積レベル					95%累積レベル				
タンク別			5年目	10年目	15年目	20年目	25年目	5年目	10年目	15年目	20年目	25年目
Bottom Trans.	Web	COT BT/W	0.00	0.00	1.10	1.46	1.69	0.59	1.64	2.35	2.86	3.25
	"	"	0.00	0.00	0.44	1.11	1.46	0.00	1.25	1.94	2.50	2.94
	Flange	COT BT/F	0.00	0.41	0.82	1.04	1.21	0.72	1.32	1.70	1.98	2.22
"	"	WBT "	0.00	0.00	0.30	0.83	1.08	0.00	0.93	1.37	1.72	2.01
Cross Tie	Web	COT CT/W	0.00	0.34	0.86	1.11	1.28	0.49	1.18	1.64	1.97	2.23
	"	"	0.00	0.00	0.26	0.83	1.08	0.00	0.94	1.37	1.72	2.01
	Flange	COT CT/F	0.00	0.35	0.82	1.06	1.23	0.53	1.22	1.65	1.96	2.21
"	"	WBT "	0.00	0.00	0.51	0.90	1.13	0.17	0.99	1.43	1.78	2.06
Deck Trans.	Web	COT DT/W	0.00	0.72	0.98	1.17	1.32	1.03	1.53	1.86	2.13	2.35
	"	"	0.00	0.30	0.78	1.01	1.18	0.78	1.34	1.70	1.98	2.21
	Flange	COT DT/F	0.00	0.28	0.93	1.29	1.58	0.63	1.33	1.84	2.27	2.65
"	"	WBT "	0.00	0.00	0.78	1.12	1.38	0.77	1.73	2.40	2.93	3.38
Horizontal Girde	Web	COT HG/W	0.00	0.64	0.93	1.13	1.28	0.92	1.45	1.81	2.08	2.30
	"	"	0.00	0.00	0.73	1.03	1.22	0.45	1.11	1.55	1.89	2.16
	Flange	COT HG/F	0.00	0.39	0.87	1.18	1.43	1.07	1.93	2.55	3.05	3.48
"	"	WBT "	0.00	0.00	0.88	1.28	1.54	0.56	1.61	2.38	2.98	3.43
Longi.Bhd Trans	Web	COT LT/W	0.00	0.54	1.09	1.46	1.75	0.59	1.30	1.84	2.31	2.71
	"	"	0.00	0.25	0.67	0.85	0.99	0.71	1.06	1.30	1.48	1.64
	Flange	COT LT/F	0.00	0.52	0.77	0.93	1.05	0.72	1.08	1.33	1.52	1.68
"	"	WBT "	0.00	0.00	0.65	0.84	0.98	0.65	1.02	1.27	1.46	1.63
Side Trans.	Web	COT ST/W	0.00	0.61	0.83	0.98	1.10	0.72	1.10	1.36	1.55	1.71
	"	"	0.00	0.00	0.83	1.21	1.52	0.54	1.26	1.78	2.21	2.59
	Flange	COT ST/F	0.00	0.58	0.80	0.96	1.08	0.72	1.10	1.35	1.54	1.70
"	"	WBT "	0.00	0.00	0.65	0.84	0.97	0.69	1.04	1.28	1.47	1.63
Transverse Bulkhead	COT	TB	0.00	0.48	1.00	1.35	1.63	0.79	1.44	1.94	2.35	2.72
	WBT	"	0.00	0.00	1.10	1.61	2.00	0.44	1.40	2.04	2.56	3.02
Upper Deck Plate	COT	UD	0.00	0.52	1.03	1.33	1.55	0.82	1.93	2.63	3.14	3.54
	WBT	"	0.00	0.00	0.79	1.06	1.25	0.51	1.15	1.59	1.92	2.19
Side Shell Plate	COT	SS	0.00	0.00	0.78	1.03	1.21	0.44	1.16	1.60	1.92	2.18
	WBT	"	0.00	0.00	0.69	1.20	1.52	0.00	1.11	1.66	2.09	2.46
Bottom Plate	COT	BP	0.00	0.74	1.16	1.43	1.64	1.02	2.11	2.78	3.27	3.66
	WBT	"	0.00	0.00	0.88	1.28	1.53	0.30	1.53	2.35	2.96	3.42
Longitudinal Bhd.Plate	COT	LB	0.00	0.00	0.84	1.10	1.27	0.55	1.19	1.63	1.96	2.22
	WBT	"	0.00	0.33	0.81	1.04	1.22	0.56	1.24	1.65	1.95	2.20
Deck Longitudinals	COT	DL	0.00	0.34	0.82	1.06	1.24	0.51	1.21	1.64	1.95	2.21
	WBT	"	0.00	0.00	0.63	0.96	1.17	0.00	0.99	1.46	1.82	2.10
Side Longl.	Web	COT SL/W	0.00	0.00	0.59	0.94	1.16	0.29	1.02	1.46	1.81	2.09
	"	"	0.00	0.00	0.44	0.87	1.11	0.00	0.97	1.41	1.76	2.04
	Flange	COT SL/F	0.00	0.00	0.58	0.94	1.16	0.00	0.98	1.44	1.80	2.08
"	"	WBT "	0.00	0.00	0.48	0.89	1.13	0.00	0.92	1.39	1.75	2.04
Bottom Longl.	Web	COT BL/W	0.00	0.00	0.68	1.00	1.20	0.27	1.04	1.50	1.85	2.13
	"	"	0.00	0.00	0.68	1.00	1.20	0.00	1.03	1.50	1.85	2.13
	Flange	COT BL/F	0.00	0.00	0.77	1.01	1.19	0.59	1.24	1.64	1.94	2.19
"	"	WBT "	0.00	0.00	0.53	0.91	1.14	0.00	0.93	1.40	1.77	2.05
Longi.Bhd.Trans	Web	COT LL/W	0.00	0.00	0.54	0.92	1.15	0.27	1.01	1.45	1.79	2.07
	"	"	0.00	0.00	0.54	0.92	1.14	0.25	1.01	1.44	1.79	2.07
	Flange	COT LL/F	0.00	0.00	0.62	0.96	1.17	0.34	1.04	1.48	1.82	2.10
"	"	WBT "	0.00	0.00	0.44	0.94	1.30	0.00	0.97	1.75	2.45	3.06



## 2. 船体の経年劣化について

### 2-2. 経年船の強度の概念図

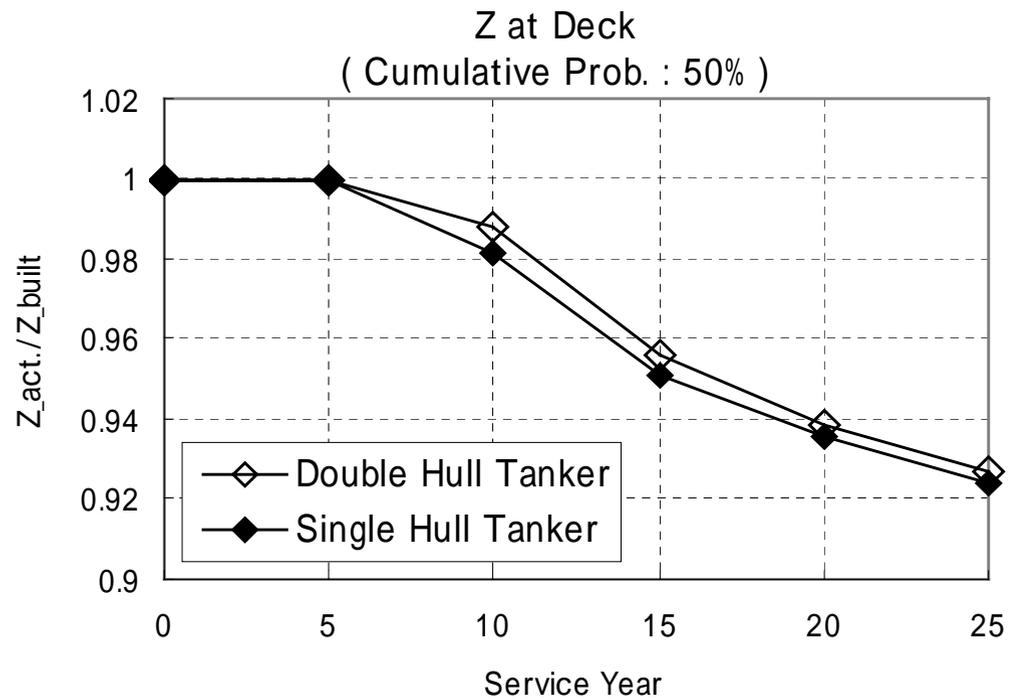


# 2. 船体の経年劣化について

## 2-3. 船体断面係数の劣化(試算)

Average tendency of the VLCC mid-ship section modulus :

- (1) IMO requirement :  
within 10% loss of  $Z$
- (2) Average corrosion  
damage is within  
IMO requirement.



# 3-1. 大規模破壊の基本メカニズム(1)

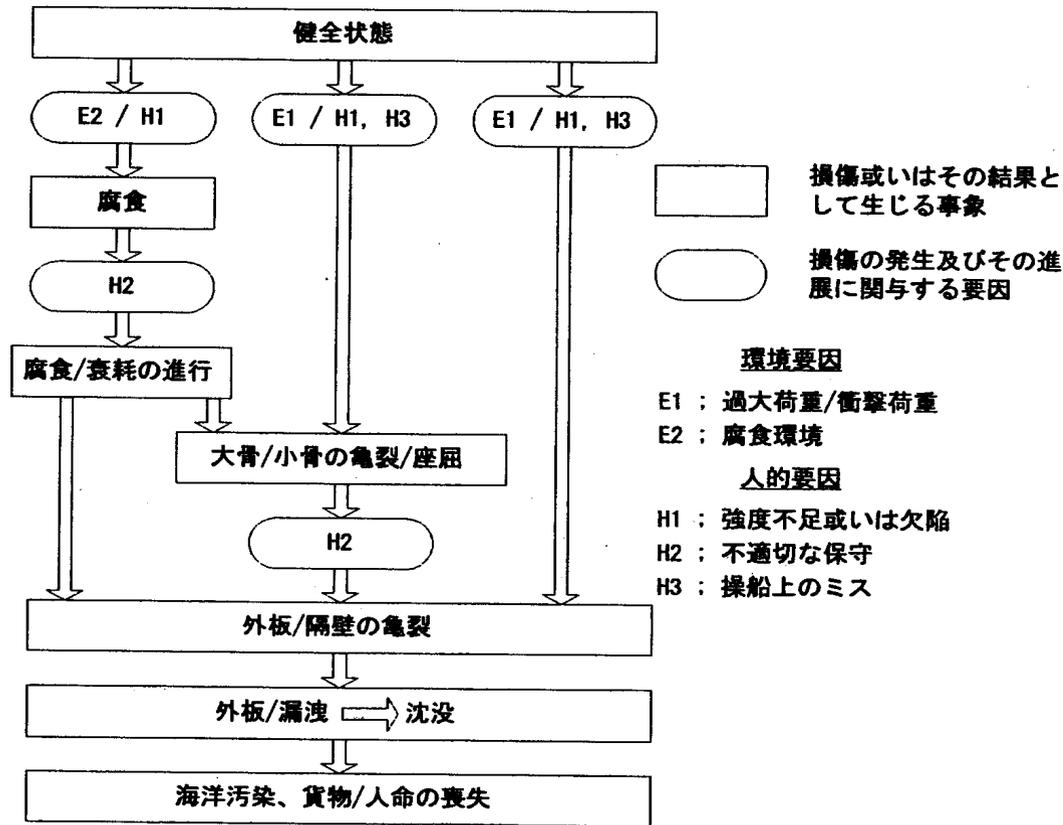


図2 重大事故に至るまでの事象の流れ



# 3-1. 大規模破壊の基本メカニズム(1) 船体折損メカニズムの場合

折損のトリガー因子;

(1) Sagging時における甲板の座屈・崩壊

(2) " おける船底部のき裂破壊

(3) Hogging時における甲板のき裂破壊

(multi-site damage)

(4) " おける船底部の座屈・崩壊

i) 折損は大波高時にて; Sagging Moment > Hogging "

ii) 甲板裏は特に腐食衰耗が著しい(船底との衰耗進行差)

など。

# 3-2. 事例スタディから ナホトカ号の事故概要

事故状況：

Main Dimensions of Nakhodka

Loa	177.25 m
Lpp	166.0 m
B	22.4 m
d(基準)	9.38 m
D	12.32 m

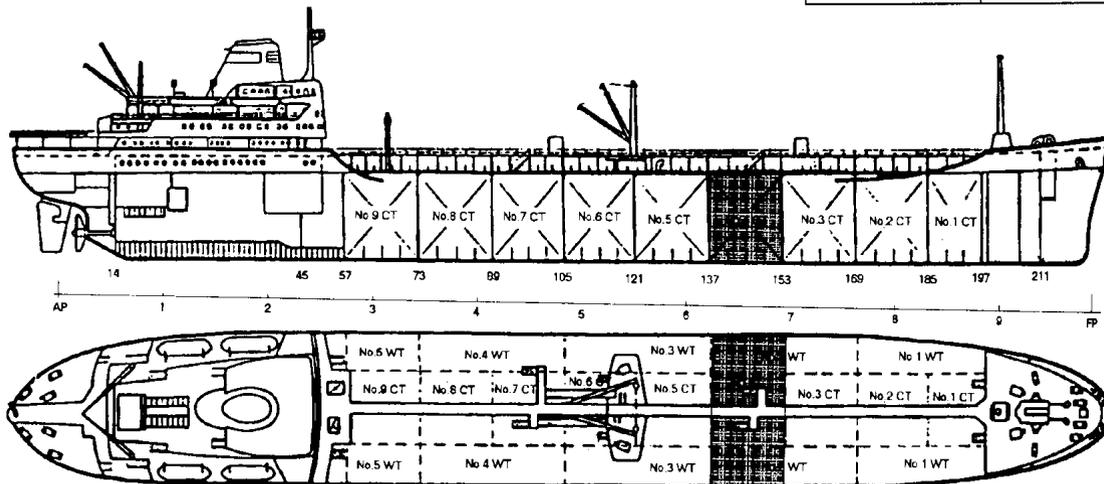
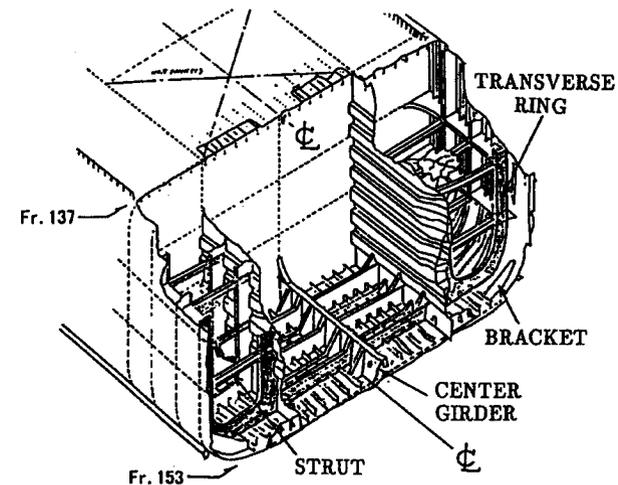


Fig. 1 General Arrangement of the MS Nakhodka



Fractured cross-section of hull girder at sea bottom

# 3-2. 事例スタディから ナホトカ号事故時の積付けパターン

積付けパターン：標準的な積付け条件を超えていた。

No.5 P.W.T. 0 ( 0)	No.4 P.W.T. 1,300 (618.5)		No.3 P.W.T. 1,307 (1,420)		No.2 P.W.T. 1,263 ( 0)		No.1 P.W.T. 440 (408.5)	
No.9 C.T. 590 (1,543)	No.8 C.T. 1,417 (1,543)	No.7 C.T. 1,432 (1,543)	No.6 C.T. 1,418 (1,543)	No.5 C.T. 1,416 (1,543)	No.4 C.T. 1,372 (1,543)	No.3 C.T. 1,370 (1,581)	No.2 C.T. 1,345 (1,581)	No.1 C.T. 88 ( 921)
No.5 S.W.T. 0 ( 0)	No.4 S.W.T. 1,302 (618.5)		No.3 S.W.T. 1,301 (1,420)		No.2 S.W.T. 1,257 ( 0)		No.1 S.W.T. 601 (408.5)	

Loading Patterns

図中の数値：実際の積載量  
( )内は標準的積付け条件



# 3-2. 事例スタディから ナホトカ号事故時の衰耗状況

板厚衰耗の計測データ： 板厚の20～35%程度の衰耗あり

表2 板厚衰残の計測結果

Structural member	Original thickness	Thickness reduction	Remarks
Bottom plate	20 mm	6 mm	based on the average of measured data around Fr. 157
Side shell	17 mm	6 mm	measured data are limited, and considered to be the same as bottom plating
Deck plate of center tank	20-24 mm	4 mm	based on the measured data in 1993
Deck plate of side tank	20-24 mm	7.5 mm	based on the average of measured data
Deck longitudinal	14 mm	5.5 mm	based on the average of measured data
Other members	11-14 mm	3 mm	measured data are scattering between 2 mm and 4 mm



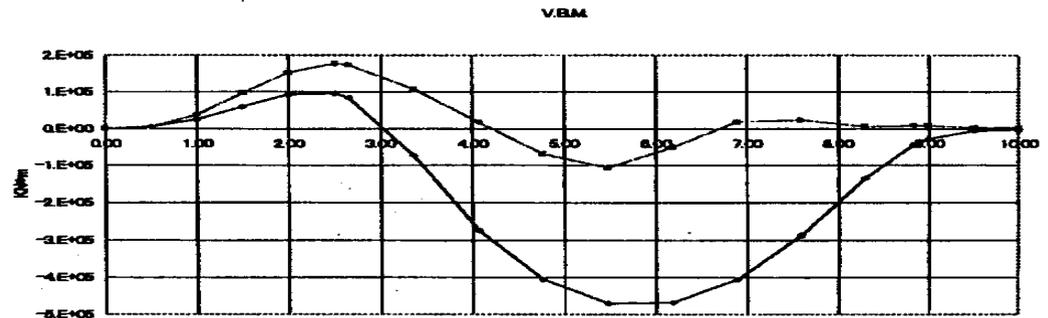
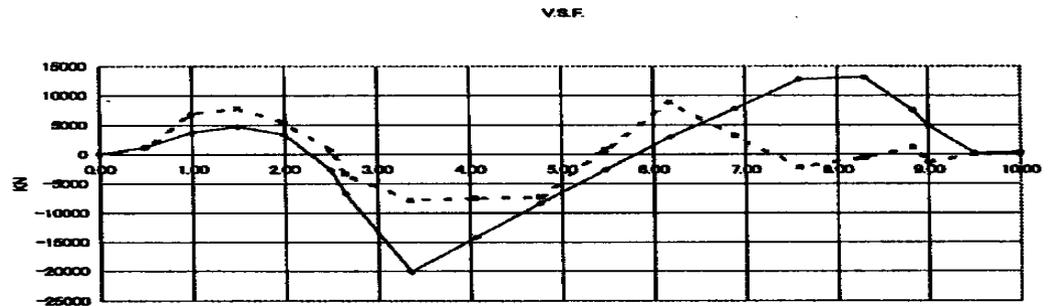
# 3-2. 事例スタディから ナ号の作用荷重(瞬時値)推定結果

縦曲げモーメント(sag)推定結果:

非線形船体運動応答シミュレーションによる。

折損発生時(瞬間)の  
船体梁の

せん断力分布[上段]  
および  
縦曲げモーメント分布  
[下段]

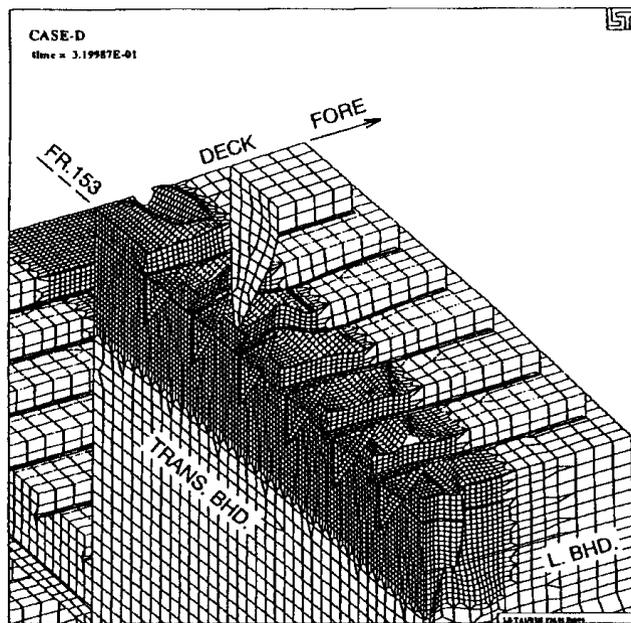


Still Water Shearing Force and Bending Moment for the Nokhodka (solid line; at the accident, dotted line; standard condition)

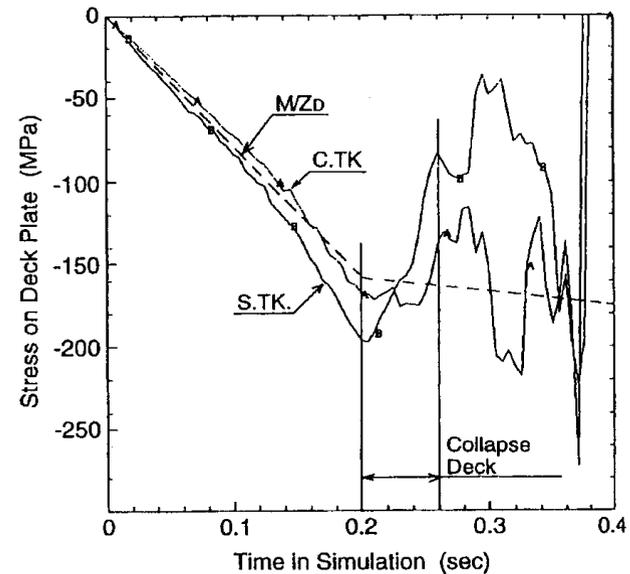


# 3-2. 事例スタディから ナ号甲板構造の崩壊シミュレーション解析

解析推定：折損はFr.153近辺の上甲板構造の座屈・崩壊からスタート



(a)



(b)

- Collapse of deck structure ;  
(a) collapse mode at deck,  
(b) stress at deck vs. time in simulation



# 3-2. 事例スタディから ナホトカ号での作用荷重と強度

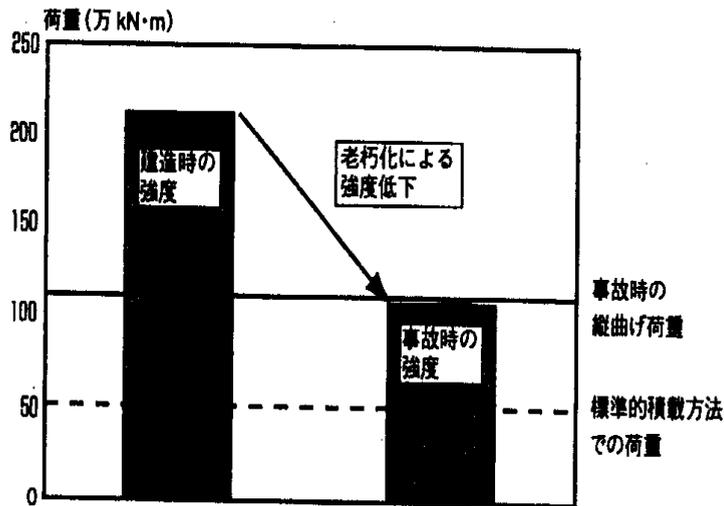


図 10 ナホトカ号に作用した荷重と船体強度

## Section Modulus of the M/V Nakhodka at the accident

Location	Section modulus at the time of accident		RS standard value (SS 3 ~ 7)	IACS standard value (SS 3 ~ 7)
	SS 6.2	SS 6.9		
Deck	80,000 cm <sup>2</sup> m	67,800 cm <sup>2</sup> m	78,200 cm <sup>2</sup> m	74,400 cm <sup>2</sup> m
Bottom	67,000 cm <sup>2</sup> m	68,500 cm <sup>2</sup> m	78,400 cm <sup>2</sup> m	

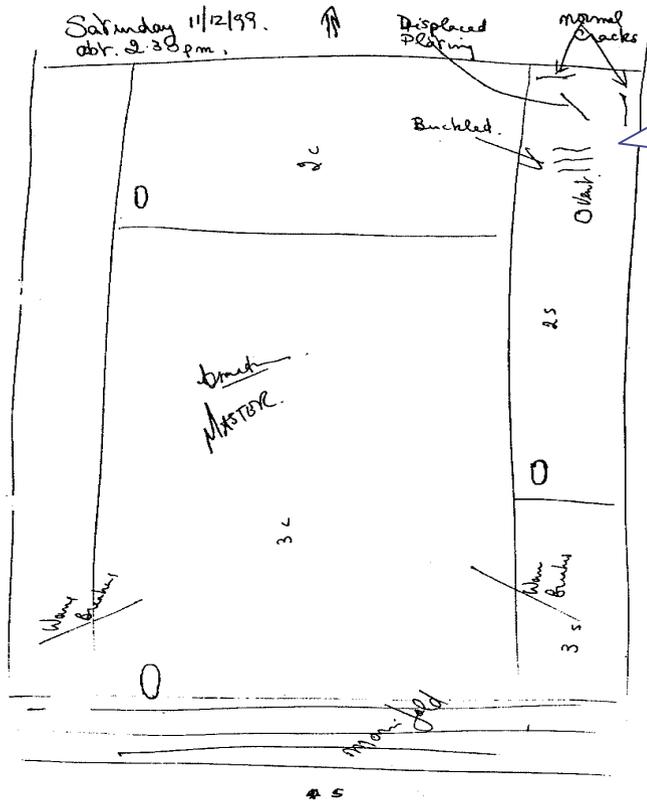
### 事故原因;

- (1) ナホトカ号は建造時の状態が維持されていれば、十分な強度を有していたが、構造部材の腐食衰耗により、強度が約半分に低下していた。
- (2) その結果、日本海における年間最大級の波浪による外力が船体強度を上回り、折損に至った。
- (3) また、標準的方法によらない貨物の積載により船体に作用した荷重が大きくなったことも副次的な要因である。

# 【予備slide】 3-2. 事例スタディから エリカ号の事故状況(1)

Annexes

ANNEX 12 Master's sketch of cracks and buckling on deck as observed on Saturday 11 December 1999 at 1430 hrs

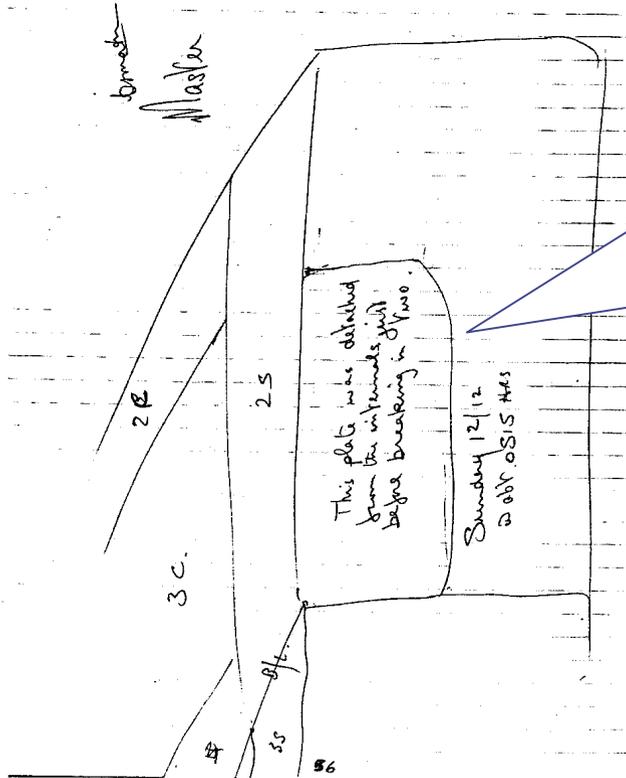


船長メモによれば、  
2Sタンクに座屈が発生し  
クラックが視認できていた

# 【予備slide】 3-2. 事例スタディから エリカ号の事故状況(2)

Annexes

ANNEX 18 Master's sketch of side shell detachment as observed on Sunday 12 December 1999 at about 0515 hrs



船長メモによれば、  
“This plate (side shell at  
2S tank) was detached  
from the internals just  
before breaking in two.”

## 4. まとめ

- (1) タンカー油流出事故は、種々の努力にも係わらず、根絶できていない。過度の腐食衰耗が見逃されている可能性があり、特に、ESPの厳格遂行やサブ・スタンダード船の排除が強く求められる。
- (2) 腐食衰耗データの分析から、平均的な衰耗進行のみならず、船齢に伴う分散の増大がポイントと言える。平均的な衰耗進行の場合、IMOの縦強度要求(建造時の10%)に適合しうる。
- (3) 船体の折損事故には、過度の腐食衰耗が隠されており、その発生トリガーとして、第一に大波高時のsaggingモーメントによる甲板構造の座屈・崩壊が考えられる。第二には、hogging時の甲板構造の引張り破壊(Multi-site crack + corrosion)による折損の可能性が考えられる。

また、油流出への対応では、事故防止の視点からだけでなく、事故時の被害を低減する方策・流出事故後に迅速な現状回復をはかる方策など、多面的な取組みが不可欠と考えられる。