

リスクベースの船舶設計技術

海洋リスク評価系

* 金湖富士夫, 岡秀行, 浅見光史, 大西世紀, 平尾好弘,
伊藤博子, 柚井智洋, 工藤潤一, 木村新太

リスクベース設計とは



- * 船舶の安全をリスクで評価し、それがリスク許容範囲内に収まるように船舶を設計すること。

(概略手順)

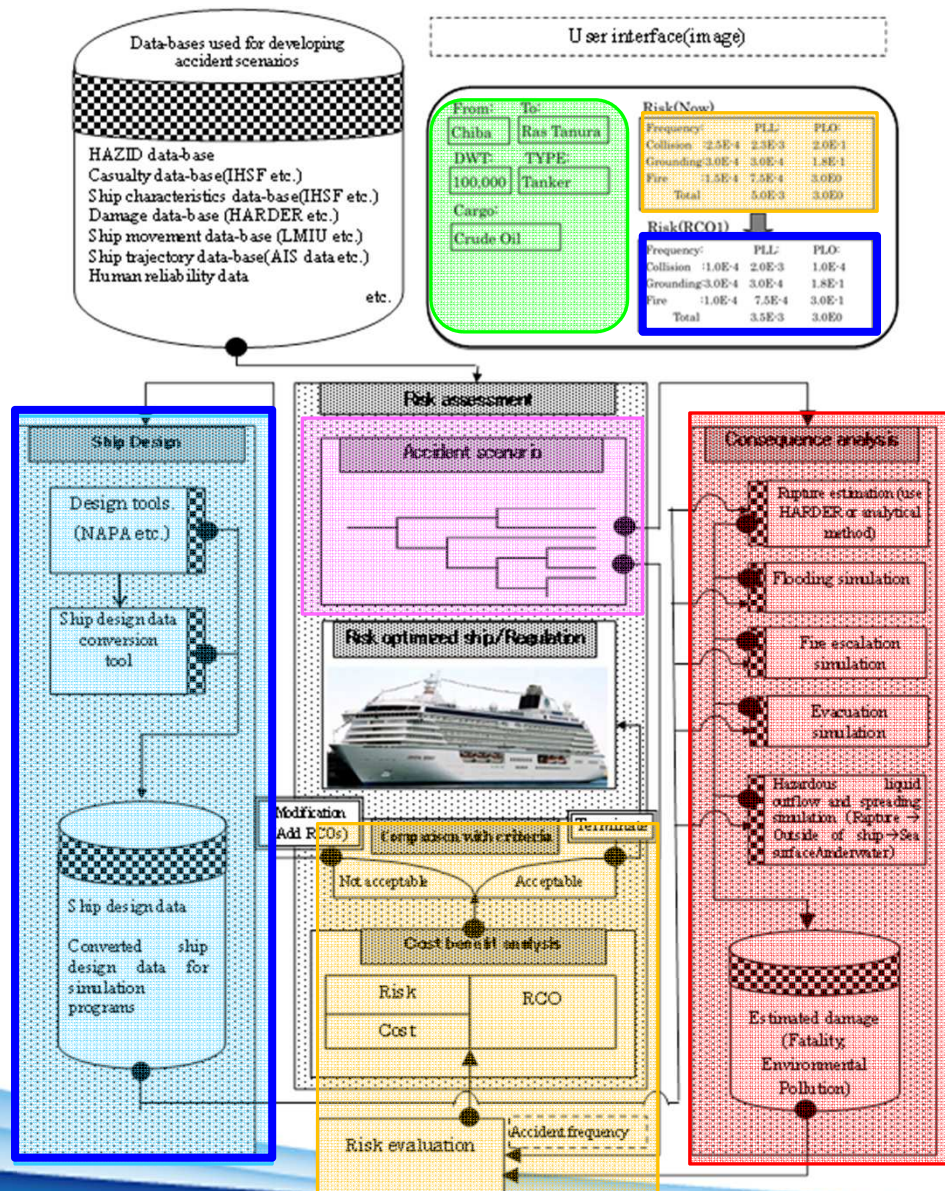
- * 遭遇する事故シナリオを考え得る限り構築する。
- * 得られた事故シナリオ全てで設計船のリスク解析（事故シナリオ発生頻度と被害(人命損失数、環境汚染)の推定)を実施し、リスクの総和を取り、それが許容範囲内にあるか確認する。

$$\text{Risk} = \Sigma \text{発生頻度(事故シナリオ(i))} \times$$

$$\text{被害(事故シナリオ(i))}$$

- * 許容範囲内になければ許容範囲に収まるよう設計変更を行う。

リスクベース設計のイメージ



- 1) 対象船舶の貨物、航路、運航等の条件
- 2) 対象船舶の設計
- 3) 事故シナリオの考慮
- 4) 事故シナリオの発生頻度と被害の推定
- 5) 全体リスクとリスク評価基準との比較。
- 6) リスクが基準を上回った場合は設計変更

リスク評価基準を満足するまで2)~6)を繰り返す。

1) 事故シナリオとその発生頻度の推定手法の研究

- 1-1) 船舶の事故シナリオの開発のためにより有効なHAZID手法の開発
- 1-2) 包括的事故シナリオの開発
 - 1-2-1) 起回事象から事故発生まで (事故発生シナリオ)
 - 1-2-2) 事故発生から最終状態まで (災害進展シナリオ)
- 1-3) 実測データを用いた起回事象発生頻度(衝突、座礁)の推定手法の開発

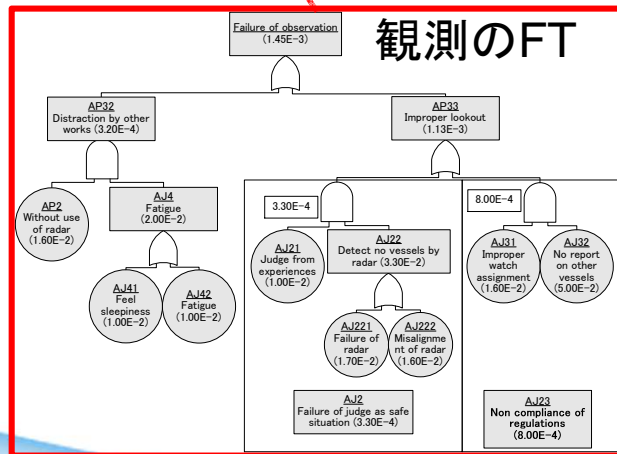
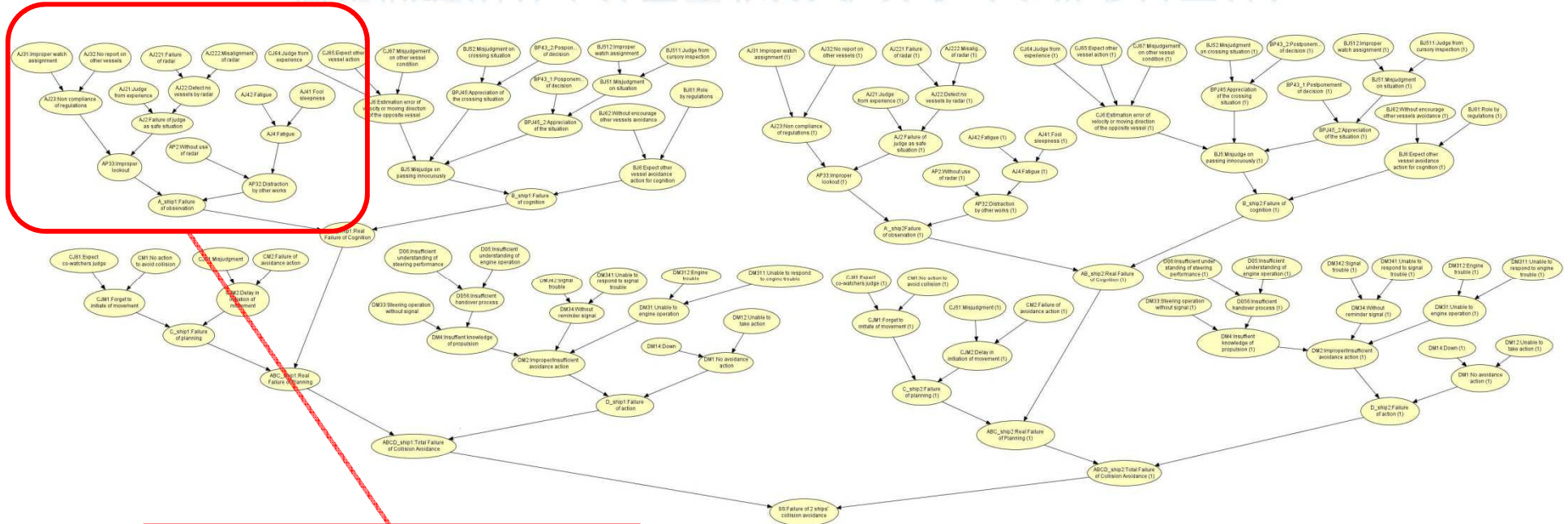
2) 結果解析手法の研究

- 2-1) 船舶傾斜/動揺時の火災シミュレーションプログラムの開発
- 2-2) 船舶傾斜/動揺時の煤および毒性ガス下での避難シミュレーションプログラムの開発
- 2-3) タンカー破孔からの油等の有害液体物質の流出シミュレーションプログラムの開発

● 試適用船舶：

- i) 大型旅客船 (L:270m, 乗客+乗組員:1000-2000 人)
- ii) 油タンカー (Aframax type)

事故発生シナリオ 衝突回避のリスクモデル(ベイジアンネットワーク)



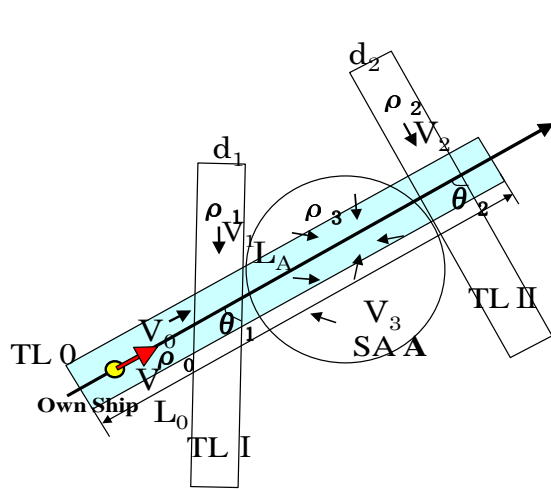
観測、認知、計画、実行の各過程をフォールトツリーで作成し、その後、ふそれらのフォールトツリーからベイジアンネットワークを作成する。

災害進展シナリオ 衝突後のET(ケミカルタンカー), IHSF海難データ

1st Event				2nd Event				Accidents' Num in Senario	Total Fatality	Total Quantity (Ton)	Freq. 1/Ship*Year	PLL (Person /Ship*Year)	PLC (Ton/Ship*Year)
Freq. (1/Ship*Year)	Type	Br. Prob.	Compartment	Br. Prob.	Type	Br. Prob.	Compartment						
2.01E-02	COLLISION	0.01	Ballast T	0.75				3	0	0	1.50E-04	0	0.00E+00
				0.25	FLOODED	1	Ballast T	1	0	0	5.01E-05	0	0.00E+00
		0.033	Cargo Area	0.846				11	0	1281.97	5.51E-04	0	6.43E-02
				0.077	FIRE	1	SP Hull/Ship	1	0	0	5.01E-05	0	0.00E+00
				0.077	COLLISION	1	Other Sp	1	0	241.613	5.01E-05	0	1.21E-02
		0.003	Double Bottom					1	0	0	5.01E-05	0	0.00E+00
		0.008	Forpeak T	0.667				2	0	0	1.00E-04	0	0.00E+00
				0.333	COLLISION	1	Cargo Area	1	0	0	5.01E-05	0	0.00E+00
		0.015	Miscellaneous	0.833				5	0	0	2.51E-04	0	0.00E+00
				0.167	REPORTED SINKING	1	SP Hull/Ship	1	0	0	5.01E-05	0	0.00E+00
		0.003	Other Sp	1	LISTED	1	SP Hull/Ship	1	0	192.993	5.01E-05	0	9.67E-03
		0.003	Shafting	1	COLLISION	1	Rudder	1	0	0	5.01E-05	0	0.00E+00
		0.738	SP Hull/Ship	0.841				248	0	1950.019	1.24E-02	0	9.77E-02
				0.014	FLOODED	0.5	Cargo Area	1	0	0	5.01E-05	0	0.00E+00
						0.5		1	0	0	5.01E-05	0	0.00E+00

事故シナリオとその発生頻度の推定手法 遭遇頻度の推定(例:紀伊半島東方沖)

● 航路内等密度船舶分布の遭遇数のモデル



$$\lambda_0 = 2r\rho_0V_0T_0\sqrt{1+\alpha_0^2+2\alpha_0\cos\pi}$$

$$\lambda_1 = 2r\rho_1V_1T_1\sqrt{1+\alpha_1^2+2\alpha_1\cos\theta_1}$$

$$\lambda_2 = 2r\rho_2V_2T_2\sqrt{1+\alpha_2^2+2\alpha_2\cos\theta_2}$$

$$\lambda_A = \frac{4r\rho_3V_3T_3}{\pi}(1+\alpha_3)E\left(\frac{2\sqrt{\alpha_3}}{1+\alpha_3}\right)$$

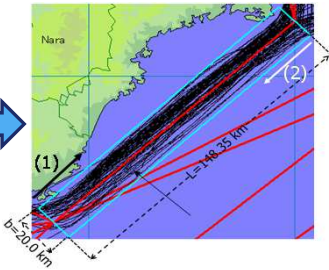
$$\lambda = \lambda_0 + \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_A$$

r : Collision diameter
 ρ : Ship density
 $\alpha_0 = \frac{V}{V_0}, \alpha_1 = \frac{V}{V_1}, \alpha_2 = \frac{V}{V_2}, \alpha_3 = \frac{V}{V_3}$
 $E(x) = \int_0^{\pi/2} \sqrt{1-x^2\sin^2\theta} d\theta$: Complete elliptic integral of the second kind

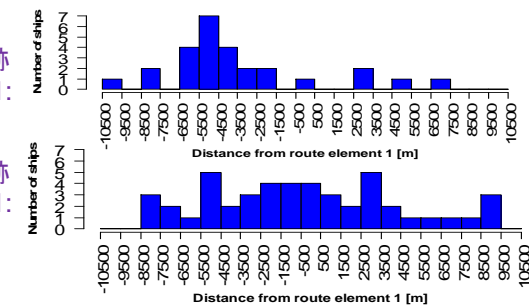
● AISデータ(遠州灘→紀伊半島沖)



● 航路要素1



航路幅方向航跡分布(航路要素1: 北東方向)
 航路幅方向航跡分布(航路要素1: 南西方向)

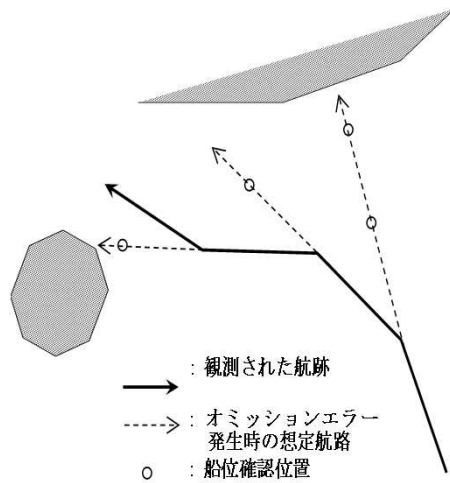


● 航路要素1における遭遇頻度 (2011年7月1日 ([1/day]))

航路要素1の細分化された航路帯の航路要素1の中心線からの幅方向の距離[m]	-10,500 ~ -9,500	-9,500 ~ -8,500	-8,500 ~ -7,500	-7,500 ~ -6,500	-6,500 ~ -5,500	-5,500 ~ -4,500	-4,500 ~ -3,500	-3,500 ~ -2,500	-2,500 ~ -1,500	-1,500 ~ -500	-500 ~ 500
合計(同航(北東,南西)+反航)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.936	0.451	0.000	0.346	0.000	0.000
航路要素1の細分化された航路帯の航路要素1の中心線からの幅方向の距離[m]	500 ~ 1,500	1,500 ~ 2,500	2,500 ~ 3,500	3,500 ~ 4,500	4,500 ~ 5,500	5,500 ~ 6,500	6,500 ~ 7,500	7,500 ~ 8,500	8,500 ~ 9,500	9,500 ~ 10,500	Total
合計(同航(北東,南西)+反航)	0.000	0.000	0.850	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	2.584

事故シナリオとその発生頻度の推定手法の研究 座礁頻度の推定(例:関門海峡)

● 座礁モデル



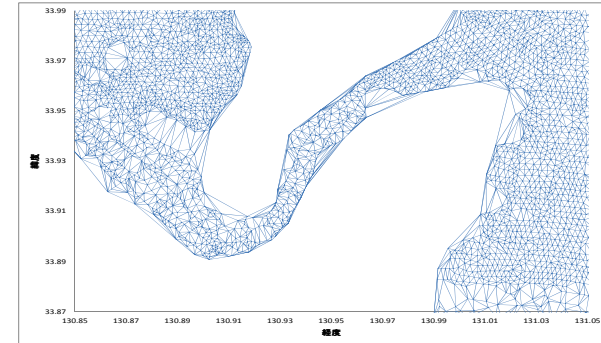
$$N_{grd}(i) = \int_0^{L(i)} \varepsilon^{\lceil \frac{T_i(x)}{\Delta t} \rceil} g_i(x) dx$$

ε : オMISSIONエラー率.
 Δt : 船位確認時間間隔
 $g_i(x)$: 船舶iが航跡点xで航路から外れる確率密度関数
 $T_i(x)$: 船舶iが航跡点xで航路から外れてから最も近くの浅瀬に座礁するまでの時間
 $L(i)$: 船舶iの航跡の長さ
 $\lceil y \rceil$: yの階段関数
 $N_{grd}(i)$: 船舶iの座礁数

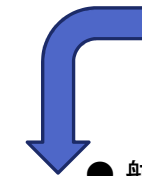
● 関門海峡での座礁頻度(要救助:統計値,要救助+不要救助:推定値)

年	関門海峡		瀬戸内海		B2/A2
	要救助(A1)	要救助+不要救助(推定 B1=A1*B2/A2)	要救助(A2)	要救助+不要救助(推定B2)	
H1	5	5.7	97	111	1.14
H2	5	5.6	105	117	1.11
H3	7	7.8	153	170	1.11
H4	4	4.3	111	120	1.08
H5	7	7.7	107	118	1.10
H6	6	6.5	76	82	1.08
H7	3	3.3	124	138	1.11
H8	6	6.3	89	93	1.04
合計	43	47.3	862	949	
平均	5.38	5.9	107.8	118.6	1.10

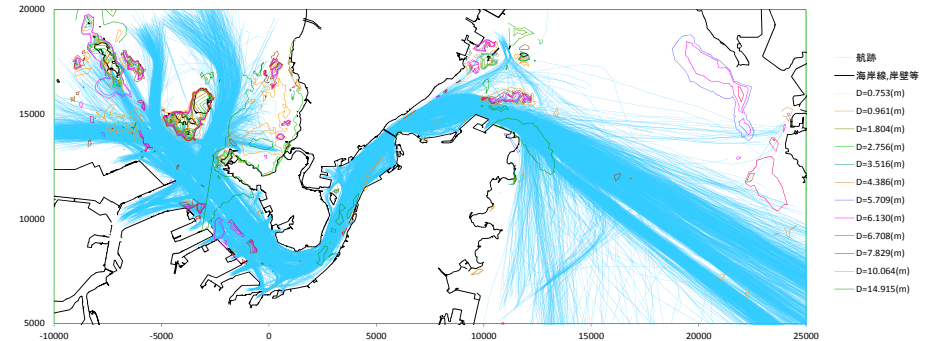
● 海底地形(ドロネ三角形による多面体近似)



船底水深で等深線を導出



● 航跡と船底水深での等深線



● 船位確認の時間間隔と確認を怠る確率とによる座礁発生頻度推定値

		船位確認の時間間隔 l(min)				
		1	2	3	4	5
確認を怠る確率	3.0E-03	5.08E+01	1.76E+02	3.30E+02	4.79E+02	5.91E+02
	1.0E-03	1.69E+01	5.85E+01	1.10E+02	1.59E+02	1.97E+02
	5.0E-04	8.42E+00	2.92E+01	5.49E+01	7.97E+01	9.84E+01
	1.0E-04	1.68E+00	5.84E+00	1.10E+01	1.59E+01	1.97E+01

浸水、火災/爆発事故の重要性

●死者/行方不明者数(IHSF, 1980 -2010)

		Fire/Explosion		Total
		Yes	No	
Flooding	Yes	5,821	13,935	19,756
	No	2,222	3,482	5,704
Total		8,043	17,417	25,460

●1事故当り平均死者数(IHSF, 1980 -2010)

		Fire/Explosion		Total
		Yes	No	
Flooding	Yes	16.04	2.42	3.22
	No	0.61	0.10	0.14
Total		2.02	0.41	0.55

●事故件数(IHSF, 1980 -2010)

		Fire/Explosion		Total
		Yes	No	
Flooding	Yes	363	5,764	6,127
	No	3,623	36,628	40,251
Total		3,986	42,392	46,378

●船舶の事故における死者数の80%は浸水事故、30%は火災/爆発事故、20%は浸水・火災/爆発事故で生じている。

●浸水事故では1件当り3.2人、火災事故では1件当り2.0人、浸水・火災事故では1件当り16.0人の死者が出ている。

火災・避難シミュレーションプログラム

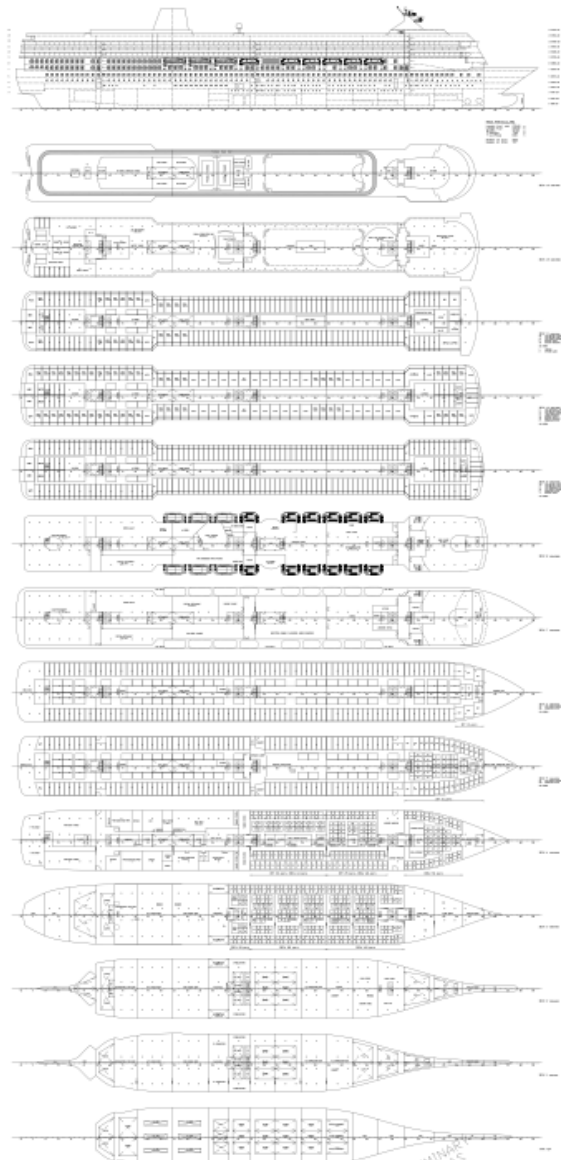
(火災シミュレーションプログラム)

- * 基本プログラム: FDS(Fire Dynamics Simulator) --- NIST(米国国立標準技術研究所)によって開発されたCFDコード。ソースコードが公開されている。
- * FDSに船体傾斜/動揺時の温度、すす、毒性ガス等の船内の拡散を模擬できるような修正を施す。

(避難シミュレーションプログラム)

- * 基本プログラム:EVACフィンランドのVTT 社がEVACを開発。
- * EVAC はFDSに組み込まれており、EVAC+FDSは <http://fire.nist.gov/fds> からダウンロードできる。
- * EVAC はエージェントベースの避難シミュレーションプログラムで、各エージェント(避難者)はエージェント間、壁との間、避難場所との間等に働く社会力(social force)により加速されて動く。(社会力による運動方程式を解いている)
- * EVACに船体傾斜時の避難者の歩行速度の関数を組み込む。

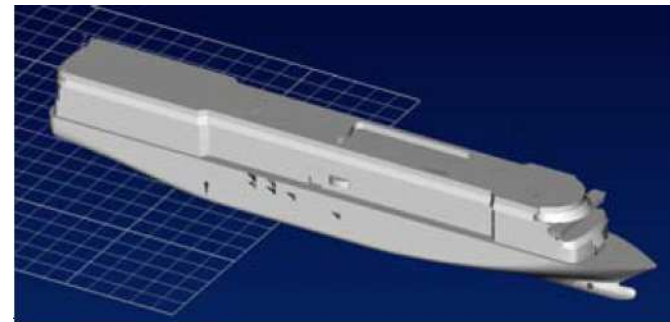
大型旅客船の火災シミュレーション例



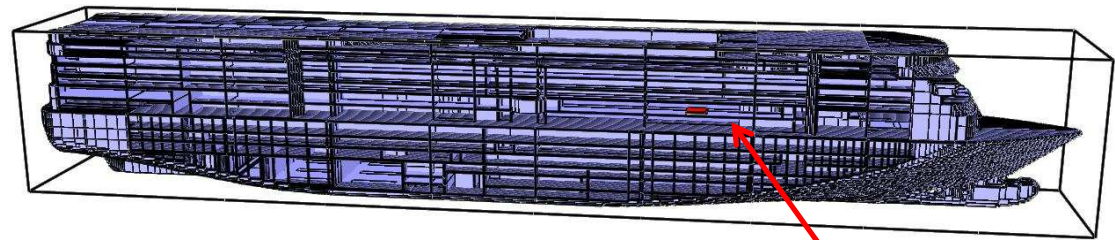
GA(General Arrangement)

主要目

Particular	Value	Particular	Value
L _{OA}	278.00m	LWT	35,100t
L _{pp}	250.00m	Passenger	1822
B	32.20m	Crew	727
Certificate	International		



3次元景観

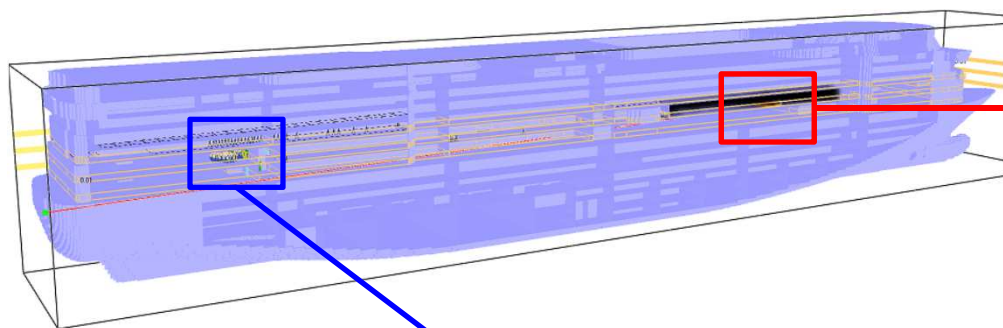


メッシュ分割 (一辺0.5m,
550 × 80 × 88 = 3,872,000)

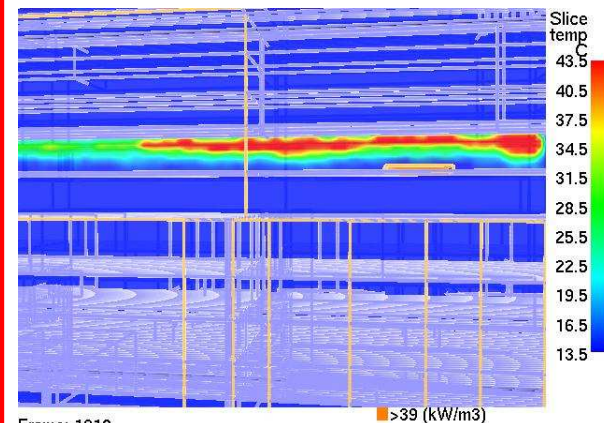
火源 (発熱率: **2MW**)

火災下避難シミュレーション例

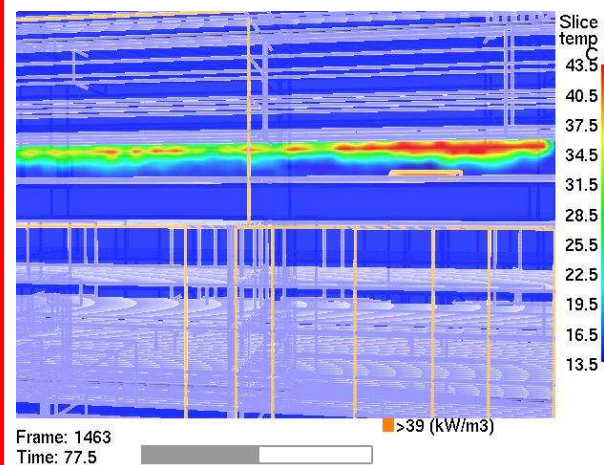
●火災下避難シミュレーション全景



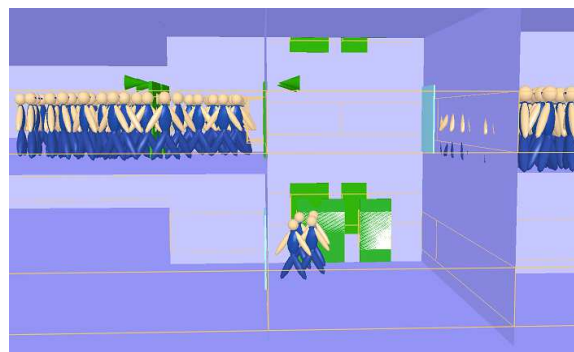
●船体動揺時(10度Roll, 周期15秒)の温度分布の変化



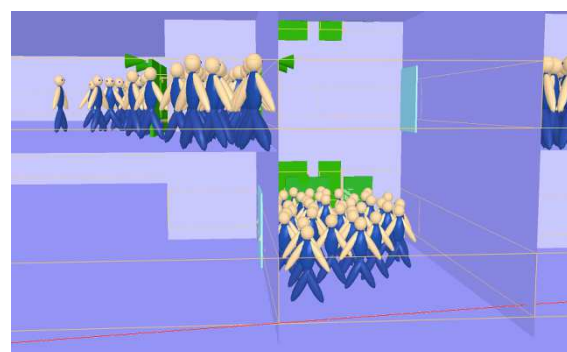
(a)70秒後



(b)77.5秒後



(a)平水中

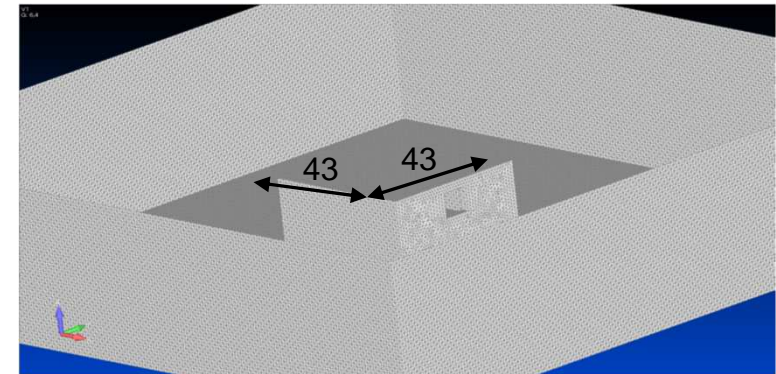
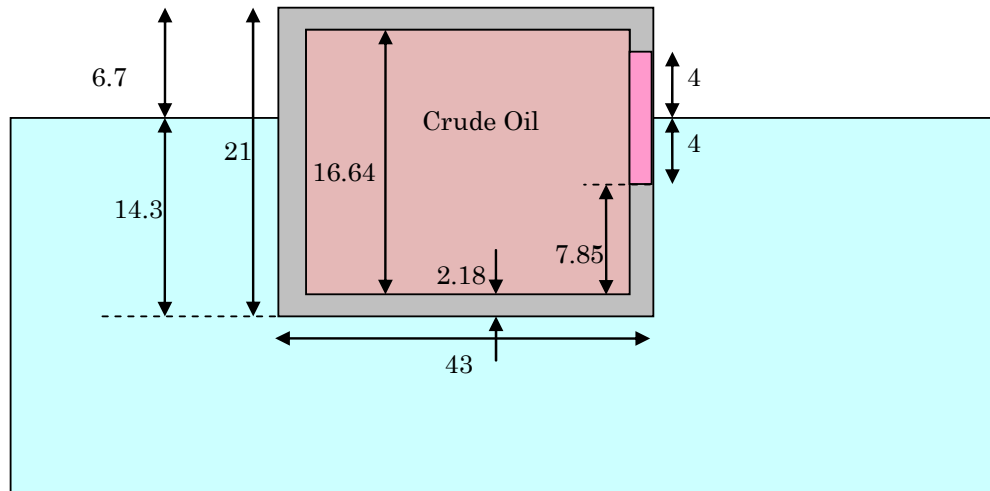


(b)傾斜時

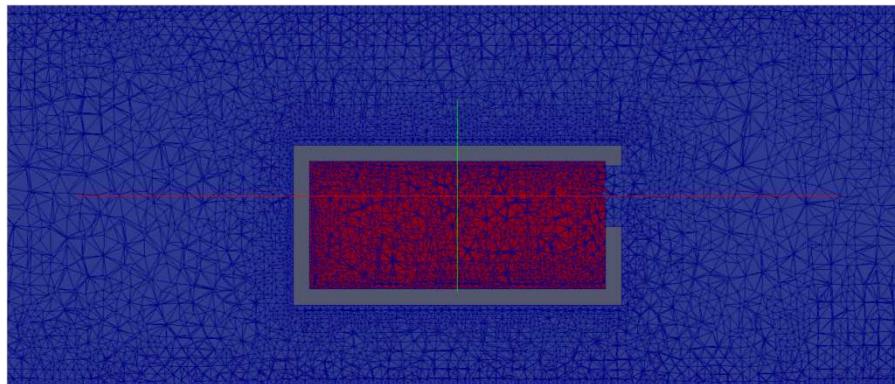
●平水中/船体傾斜時(右舷方向30度)の避難者の開口前滞留の変化

油流出シミュレーション(OpenFOAM)

計算条件



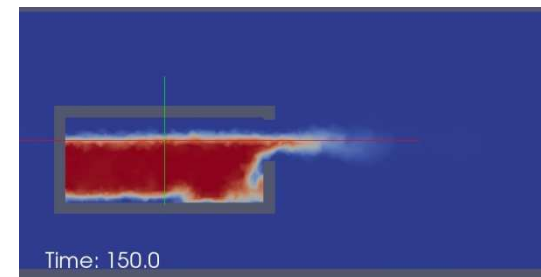
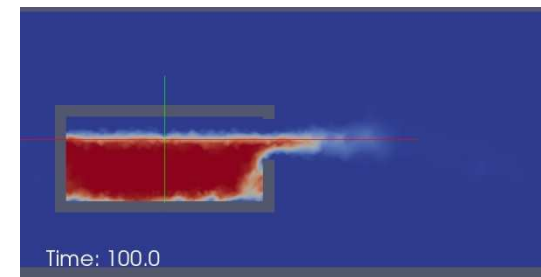
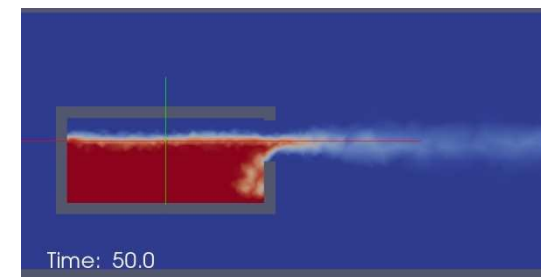
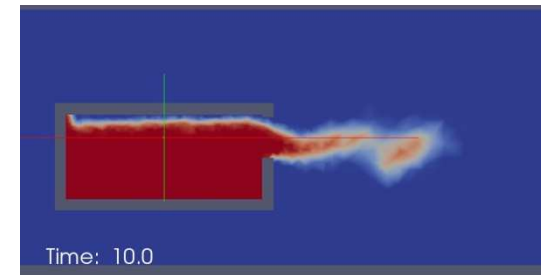
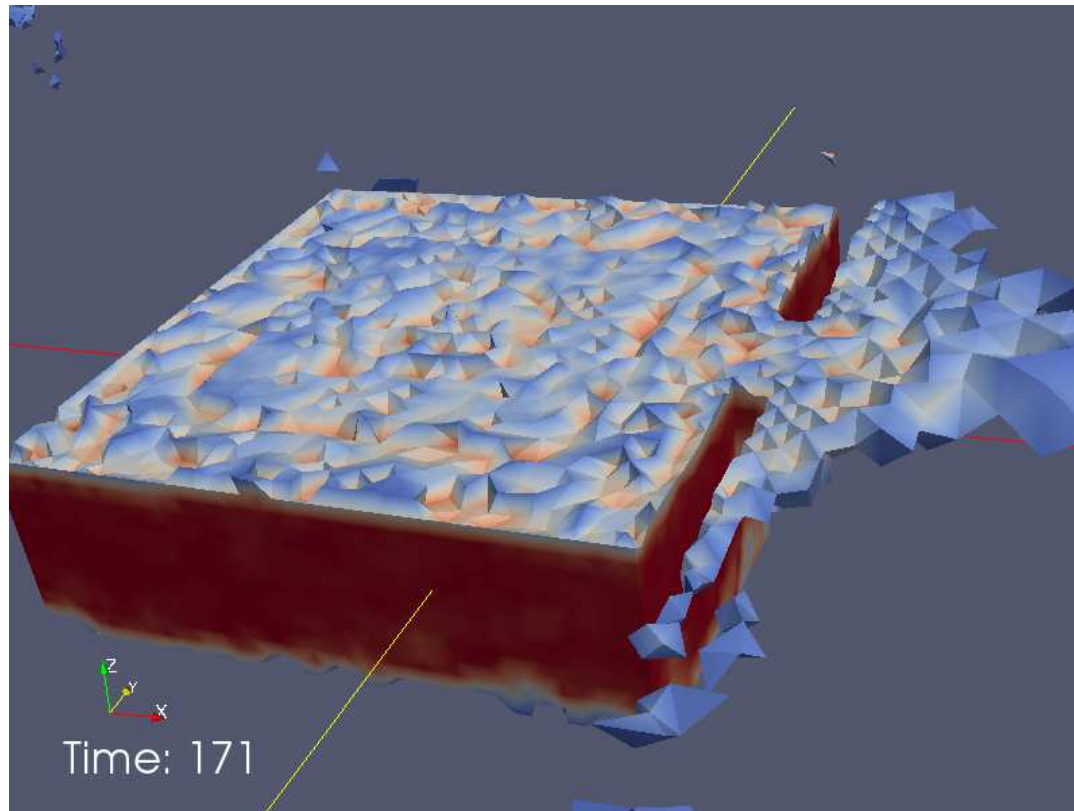
タンクと破孔(8m × 8m) (満載時) (図中の数字の単位:m)



メッシュ分割 (四面体メッシュ)

OpenFOAM (Open Field Operation and Manipulation)はソースコードが公開されているCFDプログラムで、ESIグループのOpenCFD Ltd.により開発された。OpenFOAM Foundationより under GPL licenseの下で配布されている。
(<http://www.openfoam.com/>).

油流出シミュレーション例



* リスクベース設計は欧州で既に実施されており、そのためのガイドラインがIMOで承認されている。当所は同ガイドライン適用を念頭に置き、リスクベース設計をより実際的かつ高精度にするための研究を実施している。
研究の現状を下記にまとめる。

- (1) FMEAの弱点を克服するHAZID手法を開発した。
- (2) 事故発生シナリオを作成するためET,FTにより定量化したモデルをベイジアンネットワークでまとめる手法を開発した。
- (3) IHSF海難データを解析し実績のある災害進展シナリオを抽出した。
- (4) 航跡データ等を用いて衝突、座礁の発生頻度を推定する手法を開発し、実海域に適用した。
- (5) 船舶傾斜/動揺時の火災進展シナリオにおける人命損失数を推定するために、FDSとEVACにそのための工夫を施し、大型旅客船での傾斜/動揺時の火災・避難シミュレーションを試行した。現在、平水中の火災シミュレーションの時間短縮のために、二層ゾーンプログラムとFDSのハイブリッドプログラムを開発中。
- (6) OpenFOAMを用いてタンカーの破孔からの油流出のシミュレーションを実施した。今後計算時間を短縮する簡易な手法を開発する予定。

発表原稿掲載ページ: http://www.nmri.go.jp/institutes/marine_risk/documents/index.html