

リスクベースの安全性評価手法を適用した設計技術の確立及び 安全基準の策定に関する研究

柚井 智洋*, 太田 進**, 岡 秀行*, 浅見 光史*
木村 新太*, 平尾 好弘*, 工藤 潤一*, 近内亜紀子*

Research on Establishment of Design Technology and Development of Safety Standards Adopting Risk-Based Safety Assessment Methods

by

Tomohiro YUZUI, Susumu OTA, Hideyuki OKA, Mitsufumi ASAMI
Arata KIMURA, Yoshihiro HIRAO, Junichi KUDO and Akiko KONNAI

Abstract

The EU funded research project SAFEDOR (Design for SAFETY/Operation/Regulation) developed several methods for Risk-Based ship Design (RBD). On the other hand, such several methods for RBD were not commonly utilized in Japanese shipbuilding industry and development of appropriate methods for RBD has been desired. Furthermore, there were demands for carriage of new cargoes such as Hydrogen Fuel Cell Vehicles (HFCVs) and for operation of ships of new types such as LNG fueled vessels. In order to enable such carriage and operation, it was necessary to develop new safety standards without experience on such carriage and operation. Under the above mentioned situation, a research on establishment of design technology and development of safety standards adopting risk-based safety assessment methods was conducted from fiscal year 2011 to 2015 and the outlines of the results of the research is reported in this article.

* 海洋リスク評価系, ** 特別研究主幹

原稿受付 平成29年10月31日

審査日 平成29年12月25日

目 次

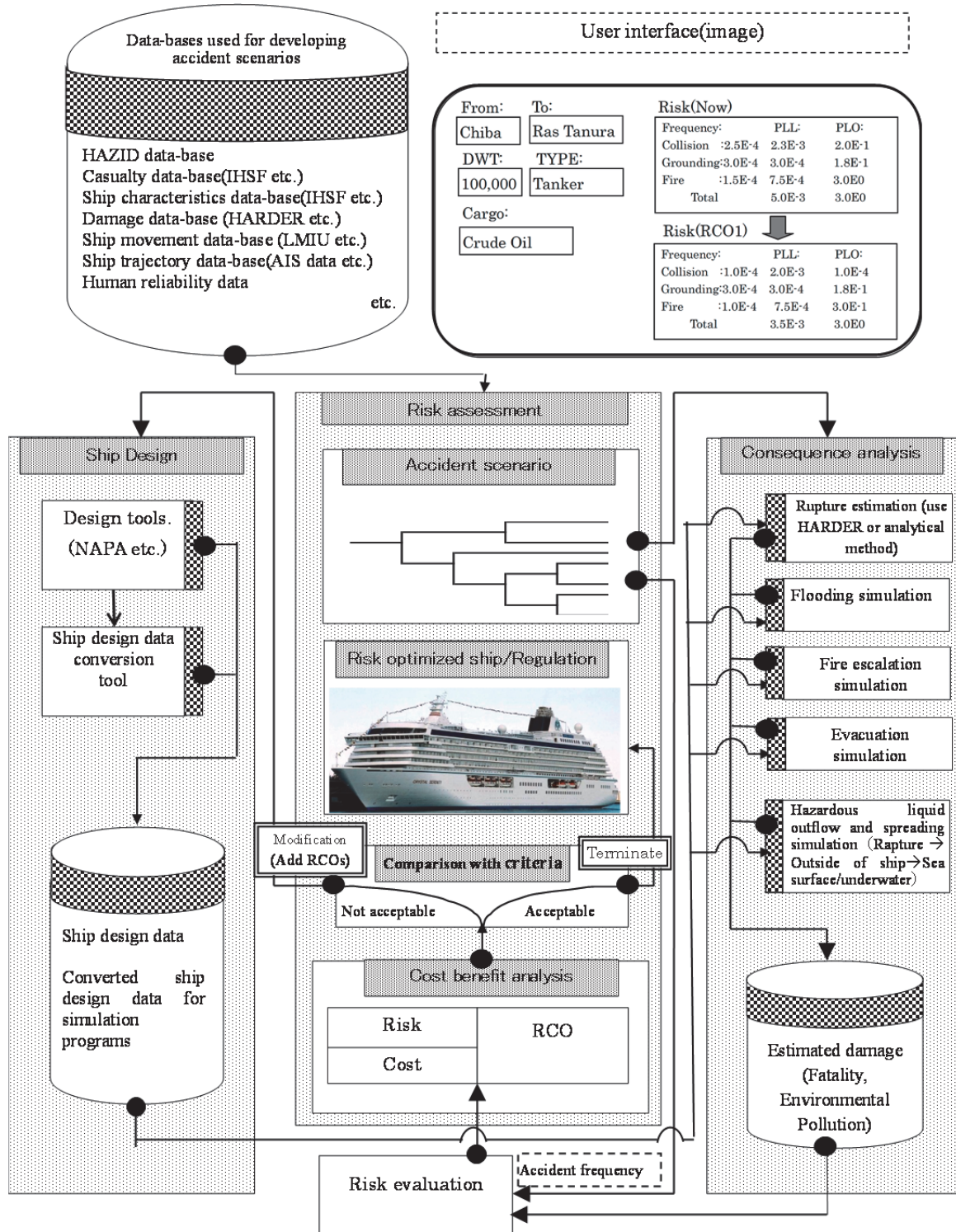
1. まえがき	20
2. リスクベース設計のための事故シナリオとその発生頻度推定手法の開発	22
2.1 船舶リスク評価のための新たな HAZID 手法の開発	22
2.2 事故発生シナリオの構築	22
2.3 災害進展シナリオの構築	23
2.4 衝突危険発生頻度推定法の開発	23
2.5 座礁危険発生頻度推定法の開発	24
3. リスクベース設計のための結果解析手法の高度化	24
3.1 船体傾斜／動揺時の火災シミュレーション	25
3.2 船体傾斜時の避難シミュレーション	25
3.3 タンカー破孔からの有害液体物質の流出シミュレーション	25
3.4 シミュレーション回数削減手法の開発	26
4. 新規輸送物等の安全基準の策定	26
4.1 水素燃料電池自動車等を運搬する船の区画の安全基準の策定	26
4.2 車両の固縛評価方法の開発	27
4.3 天然ガス燃料船のリスク評価	27
4.4 新規固体ばら積み貨物の承認方法の明確化	28
4.5 IAEA 輸送規則見直し	28
4.6 液化水素運搬船の安全基準の策定	28
5. まとめ	29
謝辞	29
参考文献	30

1. まえがき

SOLAS 条約では、第 I 章第 5 規則等において、規則が求める安全性と同等の安全性を有することを主管庁が認める場合、規則から逸脱することが出来る旨が規定されており、そのためのガイドライン¹⁾も策定されている。同等の安全性を有することを主張する 1 つの手段としてリスク評価が利用される。欧州研究プロジェクト SAFEDOR (Design for SAFETY/Operation/Regulation) は、これら規則の適用により、現状の安全基準では設計が困難な新形式船等の設計を可能とするために、安全をリスクで評価することにより既存船との同等安全性を主張するためのリスクベース設計を可能とする種々の手法を開発した²⁾。一方、我が国においては、リスクベース設計の体系的手法は存在せず、リスクベース設計の体系的手法の確立が急務となっている。リスクベース設計の体系の概要を図 1.1 に示す。図 1.1 の左側が船舶の設計部分、中央が事故シナリオ作成・定量化の部分、右側が結果推定の部分である。図 1.1 の中央と右側に関する研究が必要となっている。

また、水素燃料電池自動車 (Hydrogen Fuel Cell Vehicle, HFCV) や大型放射性機器等の新たな貨物の海上輸送や LNG 燃料船等の新形式船が出現しつつある。新たな貨物の海上輸送や新形式船の運航等を実現するためには、安全基準策定の必要がある。

以上の背景のもと、海上技術安全研究所では平成 23 年度から平成 27 年度にかけて重点研究「リスクベースの安全性評価手法を適用した設計技術の確立及び安全基準の策定に関する研究」を実施し、リスクベース設計のための体系的手法の確立、各種新規貨物の運送や新形式船の運航等の安全基準案等の策定を実施した。本報告では、2 章及び 3 章でリスクベース設計のための体系的手法の確立に関する研究成果の概要について報告し、4 章で各種新規貨物の運送や新形式船の運航等の安全基準案等の策定に関する研究成果の概要について報告する。

図 1.1 リスクベース設計の体系の概要¹⁸⁾

2. リスクベース設計のための事故シナリオの構築とその発生頻度の推定手法の開発

本章では図 1.1 の中央部に関連する研究について示す。リスクは事故発生頻度と損害の期待値の積の和として定義されるため、リスクベース設計のためには事故の発生頻度や損害の期待値を推定する必要がある。そのためには、事故シナリオを構築する必要がある。事故シナリオの構築のため、図 1.1 の左上に示すようにまず HAZID (HAZard IDentification) が実施される。この HAZID の新たな手法の開発について 2.1 節で示す。また、図 1.1 の中央上部に示す事故シナリオは事故発生シナリオと災害進展シナリオに分けられる。2.2 節と 2.3 節でこれらシナリオの構築について示す。事故発生頻度は構築した事故発生シナリオから推定するのが一般的であるが、衝突や座礁については航跡データ等から推定することも可能であり、その手法について古くから研究されている。本稿では、そのためのこれまでの理論を高度化した手法について 2.4 節と 2.5 節で示す。

2.1 船舶リスク評価のための新たな HAZID 手法の開発

対象システムのハザードを同定することを HAZID という。HAZID のための手法には、What If 法、HAZOP (HAZard and OPerability study)、FMEA (Failure Modes and Effects Analysis) 及び FMECA (Failure Modes, Effects, and Criticality Analysis) 等があるが、本研究では FMEA を改良した新たな手法（拡張 FMEA）を開発した。図 2.1 に開発した HAZID ワークシートの一例を示す。本研究の詳細については文献³⁾を参照されたい。

オペレーショナルモード：航行																		
ID	サブシステム	事故(故障モード)の原因				事故(故障モード)	位置	災害および事故(故障モードの影響)				FI	SI	RI	対策			
		ハザード	起因事象生起に影響する要素	起因事象	事故生起に影響する要素			災害拡大に影響する要素	事故に引き続く発生する災害および事故(故障モードの影響)	結果に影響する要素	結果				起因事象生起防止対策	事故防止対策	災害拡大防止対策	人命/環境保護対策
2	ピストン	*冷却水配管孔生成 *冷却性循環ポンプ不稼働 *潤滑油配管孔生成 *潤滑油循環ポンプ不稼働	*冷却水不足検知失敗 *潤滑油不足検知失敗	*冷却水不足 *潤滑油不足 *潤滑系トラブル *冷却水温度モニター不具合	*ピストン固着	機関室	*他の主機関 *海域幅員度 *海岸までの距離	*機関停止 *動力伝達システム不稼働 *船体漂流 *衝突 *座礁	*船体傾斜のため歩行困難 *浸水エリア拡大のため移動困難	*障害 *死亡 *流出油等による環境汚染 *不稼働損	FI2	SI2	FI2+SI2	*冷却水不足検知 *潤滑油不足検知	*定期検査	*機関の二重化	*短時間離脱型救命艇(自由降下式救命艇) *コースとガードに連絡	
a2	冷却水循環	*配管への機関振動の伝播 *経年劣化	*保守不実施 *機関振動 *経年劣化	*ベイン故障 *フラグの破損 *ポンプのシールの劣化	*定期検査	機関室	*冷却水不足検知システム	*ピストン固着 *機関室火災 *機関停止 *船体漂流 *衝突 *座礁	*船体傾斜のため歩行困難 *浸水エリア拡大のため移動困難 *煙のため移動困難	*障害 *死亡 *流出油等による環境汚染 *不稼働損	FI21	SI2	FI21+SI2	*定期検査 *冷却水不足検知	*定期検査	*定期検査	*短時間離脱型救命艇(自由降下式救命艇) *コースとガードに連絡	
aa2	冷却水配管	*稼働範囲を超えた使用	*機関の固定方法	*機関振動の配管への伝播 *経年劣化	*定期検査	機関室	*冷却水不足検知システム	*冷却水漏洩 *ピストン固着 *機関室火災 *機関停止 *船体漂流 *衝突 *座礁	*船体傾斜のため歩行困難 *浸水エリア拡大のため移動困難 *煙のため移動困難	*障害 *死亡 *流出油等による環境汚染 *不稼働損	FI211	SI2	FI211+SI2	*定期検査 *冷却水不足検知	*定期検査	*定期検査	*短時間離脱型救命艇(自由降下式救命艇) *コースとガードに連絡	

図 2.1 本研究で開発した HAZID ワークシートの記載例³⁾

2.2 事故発生シナリオの構築

事故発生シナリオ(ハザードの発生から事故に至るシナリオ)は、リスクの定量化や RCO (Risk Control Option) の効果の検討のために必要であり、HAZID の結果や既往研究を参考に構築されるのが一般的である。構築される事故発生シナリオのシナリオ発生頻度を推定するため、事故発生シナリオを構成するイベントとしては、可能な限り、そのイベントの発生確率が容易に得られるものを選定することが重要となる。海難事故原因の大半は人的過誤であるとされており、人的過誤の発生確率は人間信頼性解析に使用される人的過誤データから得ることが可能なため、事故発生シナリオをヒューマンエラーの観点から構築することが有効であると考えられる。事故としては衝突、接触、座礁、転覆、船体損傷及び火災/爆発等が考えられ、それらについて事故発生シナリオを構築する必要があるが、本研究ではヒューマンエラーの観点からの事故発生シナリオ構築の第一歩として、衝突の事故発生シナリオを構築した。

本研究では、NDM (Naturalistic Decision Making) モデル⁴⁾に基づき衝突回避の意思決定と行動の過程を「観測」、「認知」、「計画」及び「行動」の 4 段階に分類し、それらをヘディング(各過程)とする Event Tree (ET) を構築した。この ET から衝突回避失敗確率を推定するためには、各ヘディングの失敗確率を求めておく必要がある。この失敗確率を推定するために、Fault Tree (FT) を構築した。一例として、衝突回避の意思決定と行動の過程の

うち「計画」の失敗確率を推定するためのFTを図2.2に示す。FTの基本事象の生起確率の推定には、人的過誤の頻度指数データ^{5),6)}を用いた。モデルから得られた衝突回避失敗確率は、船の見合い1回当たり 1.11×10^{-4} と推定された。この衝突回避失敗確率の値は、後述する幾何学的モデル等の他のモデルを利用し推定された衝突回避失敗確率⁷⁾⁻¹⁰⁾と概ね同じ値である。したがって、一般的な人的過誤データのみを用いることで、船の見合い発生時における船舶同士の衝突回避失敗確率が導出可能であることが明らかとなった。本研究の詳細については、文献¹¹⁾を参照されたい。

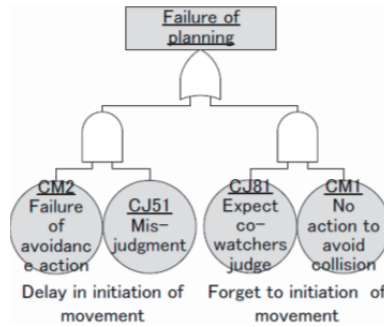


図2.2 衝突事故発生頻度推定のためのETの各ヘディングの失敗確率を推定するためのFTの例
(衝突回避の意思決定と行動の過程のうち「計画」の失敗確率を推定するためのFT)¹¹⁾

2.3 災害進展シナリオの構築

災害進展シナリオ(事故の発生から結果に至るシナリオ)も事故発生シナリオと同様に、リスクの定量化やRCOの効果の検討のために利用され、HAZIDの結果や既往研究を参考に構築されるのが一般的であり、シナリオを構成するイベントとしては、その発生確率が容易に得られるものを使用することが重要となる。災害進展シナリオは、前述のようにHAZIDの結果や既往研究を参考に構築されるのが一般的であるが、本研究ではIHSデータを利用して構築し、実際の事故の情報に基づいて災害進展シナリオを明らかにした。その例を図2.3に示す。本研究の詳細については文献¹²⁾を参照されたい。

1st Event				2nd Event				3rd Event				4th Event				Number of sequences	Total Fatality (People)	Total Quantity (Ton)	Frequency (1 /Ship*Year)	PLL (People /Ship*Year)	PLO (Ton /Ship*Year)
Freq	Type	Prob	Compartment	Prob	Type	Prob	Compartment	Prob	Type	Prob	Compartment	Prob	Type	Prob	Compartment						
1.45E-03	COLLISION	0.070	Bow	0.8												8	0	0	8.14E-05	0	0
				0.2	DAMAGED	0.5	Accom	1	DAMAGED	1	Somewhere Hull/Ship					1	0	0	1.02E-05	0	0
						0.5	Bow									1	0	0	1.02E-05	0	0
		0.038	Miscellaneous													4	0	0	4.07E-05	0	0
		0.014	Staffing													2	0	0	2.03E-05	0	0
		0.874	Somewhere Hull/Ship	0.592												74	2	0	7.53E-04	2.03E-05	0
				0.008	FAILURE	1	Electrical	1	FOUNDER ED	1	Somewhere Hull/Ship					1	423	0	1.02E-05	4.30E-03	0
				0.008	FLOODED	1	Engine/Rm	1	LISTED	1	Somewhere Hull/Ship	1	FOUNDERE D	1	Somewhere Hull/Ship	1	9	0	1.02E-05	9.15E-05	0
				0.016	FRACTURED	1	Somewhere Hull/Ship	0.5								1	4	0	1.02E-05	4.07E-05	0
								0.5	CRACKED	1	Bow	1	CRACKED	1	Stern	1	0	0	1.02E-05	0	0

図2.3 IHSデータから得られる災害進展シナリオの例(初期イベントが衝突の場合のETの一部)¹²⁾

2.4 衝突危険発生頻度推定法の開発

衝突事故発生頻度は、衝突危険発生頻度と衝突回避失敗確率との積により得られる。衝突危険とは、そのまま直進した場合に衝突する状況を意味し、幾何学的にモデル化が可能である。なお、接触は衝突で相手船の速度がゼロである場合に該当し、同様のモデル化により接触事故発生頻度も推定可能である。2つの水路が交差する領域における衝突危険発生数の幾何学的モデルに関するこれまでの理論^{10),13)}では、2つの水路の交差角が0[rad]や π [rad]に近い場合に衝突危険発生数の推定精度が悪いという課題があった。そこで本研究では、この課題を解決するよう理論式を改良した。また、改良された理論式の検証のため、計算機による交通流シミュレーションも実施した。その結果、表2.1に示す通り、交差角が $\pi/50$ [rad]と $45\pi/50$ [rad]の場合を除いて、理論値が信頼区間内に収まった。交差角 $\pi/50$ [rad]と $45\pi/50$ [rad]の場合でも、理論値が信頼区間の上限値をわずかに上回っているだけであ

り、シミュレーション回数を十分に増やすことによって、信頼区間内に収まることが期待される。したがって、本研究で開発された衝突危険発生数の理論式は妥当であると考えられる。本研究の詳細については文献^{14), 15)}を参照されたい。

表 2.1 衝突危険発生頻度の理論値の検証¹⁵⁾

Crossing angle [rad]	Theory	Simulation		
		Average	Lower limit	Upper limit
0	90.7	83.8	75.9	92.2
$\pi/50$	83.1	72.2	64.9	80.0
$45\pi/50$	80.3	71.0	63.8	78.8
$49\pi/50$	54.8	54.6	48.3	61.5
π	69.2	67.7	62.7	73.0

2.5 座礁危険発生頻度推定法の開発

座礁事故発生頻度も、衝突事故発生頻度と同様に、座礁危険発生頻度とその回避に失敗する確率との積により推定できる。これまでに船舶交通流と浅瀬の位置の関係を考慮し幾何学的に座礁危険発生数を推定するモデル^{10), 13)}が提案されている。しかし、座礁は衝突と異なり、計画航路通りに航行していれば座礁しないため、計画航路からの逸脱という観点を考慮する必要があると考えられる。そこで本研究では、航跡データと海底地形データを用いて、計画航路からの逸脱という観点を考慮した座礁危険発生頻度を推定する方法を開発した。開発したモデルに基づき明石海峡の航跡データと海底地形データを用いて座礁危険発生頻度を推定した結果を表 2.2 に示す。ここでは計画航路からの逸脱として衝突回避操船を考え、明石海峡の約 2 日間（49 時間）の全船舶の航跡データから衝突危険発生頻度を幾何学的モデルから推定し⁹⁾、それを使用し座礁危険発生頻度を推定し、その値を 1 年分に換算した。すなわち表 2.2 は明石海峡を航行する全船舶の 1 年分の座礁危険発生頻度の推定値を示している。表 2.2 から船が計画航路から逸脱した場合には是正措置をとるまでにかかる時間 $h_i(t)$ が短いほど座礁危険発生頻度が小さくなることがわかる。本研究の詳細については文献¹⁶⁾を参照されたい。

表 2.2 座礁危険発生頻度の推定結果¹⁶⁾

Mean of $h_i(t)$ [minutes]	5	10	15
Annual frequency of grounding candidates	3.95×10^4	7.91×10^4	1.01×10^5

3. リスクベース設計のための結果解析手法の高度化

本章では図 1.1 の右側に関連する研究について示す。前述のように、リスクは事故の発生頻度と損害の期待値の積の和として定義される。このうち損害の期待値の推定法としては、ET 等により構築される災害進展シナリオで対象船舶の定員数や貨物油量のうちの $\alpha\%$ が死亡や流出すると仮定し簡易推定する方法とシミュレーションにより詳細推定する方法がある。リスク評価の目的等に応じて、簡易推定と詳細推定が使い分けられ、リスクベース設計では詳細推定が必要となる。これまでにシミュレーション手法に関する研究が種々実施されているが、それらは船舶のリスクベース設計に使用するためには必ずしも適当ではない（具体的な課題については後述する）。そこで本研究では、船舶のリスクベース設計に使用するためにシミュレーション手法の高度化を実施した。3 章では、本研究で高度化した火災シミュレーション、避難シミュレーション及び油流出シミュレーションについて報告する。また、リスクベース設計のためには、シミュレーション回数を削減することが重要となるため、そのための手法についても報告する。

3.1 船舶傾斜／動揺時の火災シミュレーション

火災シミュレーションに関する研究は、火災安全工学分野で多数実施されており、それらの研究では陸上建築物を対象としているため、構造物そのものは運動しない状態を想定している。一方、船舶における火災シミュレーションでは、船舶の傾斜や動揺により、火源を含む空間が傾いたり、時々刻々動くことを考慮する必要がある。しかしながら、それらを考慮した火災シミュレーションは著者らの知る限り存在しなかった。そこで、本研究では、船舶傾斜／動揺を考慮した火災シミュレーション手法について検討した。

本研究では、火災シミュレーションの基本プログラムとして米国商務省国立標準技術研究所 (National Institute of Standards and Technology, NIST) で開発されたオープンソースコードである Fire Dynamics Simulator (FDS) を使用し、時間的に変化する重力項を組み込むことで船舶の傾斜及び動揺影響を考慮した。FDS では乱流場の解析手法としてラージ・エディ・シミュレーション (Large Eddy Simulation, LES) を採用しており、その Subgrid Scale (SGS) モデルとして Smagorinsky モデルが採用されている。Smagorinsky モデルは工学的に広く用いられているが、非乱流域や壁近傍で修正を要する等の欠点があるため、本研究では、これらの欠点を克服し安定な SGS モデルとして知られているコヒーレント構造モデル¹⁷⁾を FDS に組み込み、船体傾斜／動揺時の船内の温度分布やすす等の船内拡散を模擬できるシミュレーションプログラムに改良した。改良したシミュレーションプログラムを用いて火災シミュレーションを実施した結果を図 3.1 に示す。本研究の詳細については、文献^{18), 19)}を参照されたい。



図 3.1 火災シミュレーション結果の例 (すすの分布)²³⁾

3.2 船体傾斜時の避難シミュレーション

火災シミュレーションと同様、避難シミュレーションに関する研究は、陸上建築物を対象に多数実施されている。海事分野では、Maritime EXDODUS²⁰⁾、EVI²¹⁾及び ODIGO²²⁾がよく知られており、これらのシミュレーションプログラムでは、船体傾斜、あるいは船体傾斜に加えて動揺を考慮した避難シミュレーションが可能である。しかしながら、これらのプログラムはオープンソースではないため、導入が難しい。

そのため本研究では、避難シミュレーションの基本プログラムとして Technical Research Centre of Finland (VTT) で開発されたオープンソースコードである Evac を利用し、当該プログラムを船体傾斜の影響を考慮した避難シミュレーションプログラムに改良した。Evac は火災シミュレーションプログラム FDS に組み込まれており、FDS+Evac として公開されている。FDS+Evac では、火災により発生した煙による視界悪化および有毒ガスによる歩行速度の低下を考慮した避難者の移動状況を評価することができる。本研究では、FDS+Evac で船体傾斜時の避難状況を模擬できるように、床面の傾斜が避難者の歩行速度に与える影響を、床面の傾斜角度によって評価できるルーチンを Evac に追加した。改良したプログラムを用いて、ヒール時とトリム時それぞれの傾斜方向についてシミュレーションを実施した結果、避難途中において避難者が密集する地点は、傾斜方向や傾斜角によって異なることが示唆された。図 3.2 に改良したプログラムによる避難シミュレーション結果の一例を示す。本研究の詳細については、文献²³⁾を参照されたい。

3.3 タンカー破孔からの有害液体物質の流出シミュレーション

衝突や座礁等による油等の有害液体物質の海上流出等の環境リスクを推定するには、有害液体物質の流出量を推定する必要がある。流出量推定に関する研究としては、衝突時のタンカーサイドタンクからの油流出に関する研究²⁴⁾がある。その研究²⁴⁾では、Fluent²⁵⁾によりシミュレーションが実施されている。しかし、Fluent²⁵⁾はオープンソースではないため、導入が難しい。そこで、本研究では、ESI グループの OpenCFD Ltd.により開発されたオープンソースの数値流体力学コード OpenFOAM (Open Field Operation And Manipulation) により油流出シミュレーションプログラムを開発した。開発したプログラムによるシミュレーションの結果の一例を図 3.3 に示す。破孔

中心を通過する断面図から、破損タンクに隣接するバラストタンクに油が流入している様子が示されており、二重船殻が破孔発生時の油流出防止の RCO ともなることが示されている。

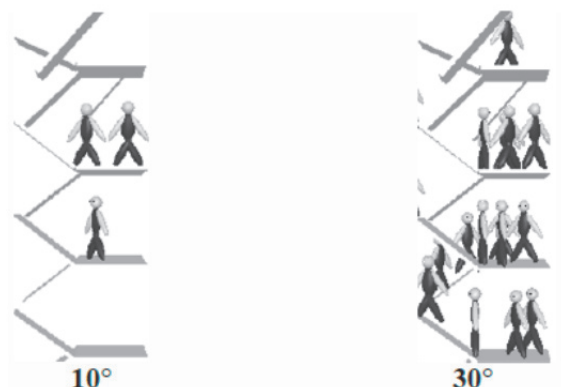


図 3.2 避難シミュレーション結果の例（傾斜角 10 度と 30 度の場合の階段室の様子。傾斜角の大きい 30° の場合では、避難者が階段の昇降に困難を生じ、結果として階段室に避難者が停滞している。）²³⁾

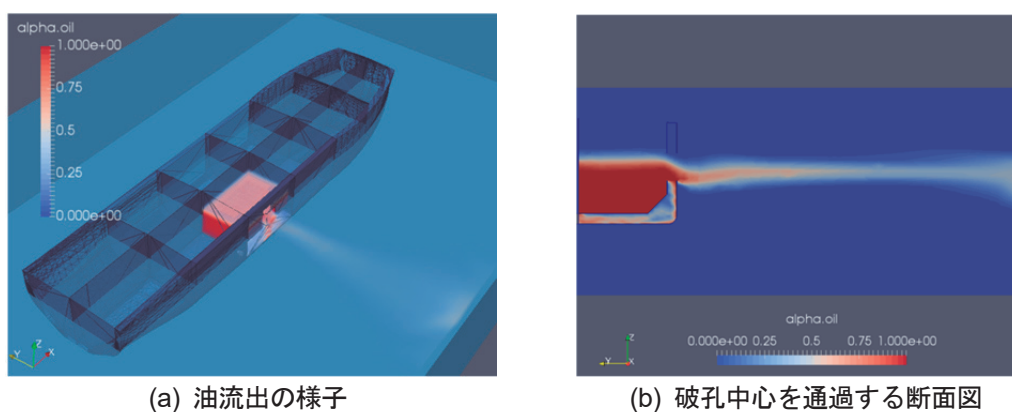


図 3.3 油流出シミュレーションの結果の例（油流出 24 秒後の様子）

3.4 シミュレーション回数削減手法の開発

シミュレーションにより、火災時の人命損失数やタンカー破孔からの有害液体物質の流出量を推定する場合、考慮すべき事故シナリオが多くなれば多くなるほどシミュレーション回数も多くなる。結果に影響を与える要素の数が多くなると幾何級数的に事故シナリオの数が多くなり、シミュレーションに多大な時間を要することとなる。リスクベース設計を実施するためには、シミュレーションに多大な時間を要することは、実用性の観点から好ましくない。したがって、リスク解析結果の精度を保ちつつシミュレーション時間を実用的な時間に収める必要があり、そのためには、シミュレーション回数を削減する必要がある。本研究では、そのための合理的な手法を開発した。詳細については文献²⁶⁾を参照されたい。

4. 新規輸送物等の安全基準の策定

4.1 水素燃料電池自動車等を運搬する船の区画の安全基準の策定

HFCV を自動車運搬船（Pure Car and Track Carrier, PCTC）によって海上輸送する場合、HFCV の燃料である水素の漏洩による可燃性雰囲気形成が危険性の一つとして挙げられる。可燃性雰囲気形成の防止のためには、貨物区域における効果的な通風が重要となる。しかし、研究時点において、実際の船倉内で気流を計測した報告は無く、船倉内の気流性状に関して参考となる知見は無かった。そこで本研究では、PCTC 貨物倉内における気

流計測を実施した。その結果、風速が無風に近い場所が存在すること(図4.1)、給排気口配置を工夫することで、無風に近い場所を低減できることがわかった。この気流計測の詳細については文献²⁷⁾を参照されたい。

また、船舶検査等の実務において、船倉内の気流性状の概略を短時間で知る必要があるが、そのためには数値シミュレーションが必要となる。そこで本研究では、計算負荷の小さい数値モデルとして MASCON (MASs-CONSistent flow) モデルを採用し、船倉内の気流の数値シミュレーションを実施した。その結果、MASCON モデルにより概ね実測値に一致する二次元断面上の気流場を再現できることがわかった。詳細については文献²⁸⁾を参照されたい。

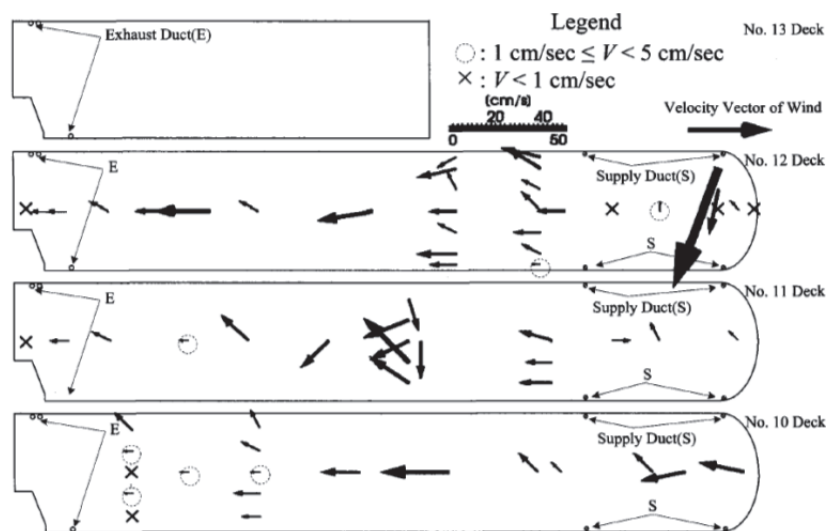


図 4.1 気流計測の結果の例²⁷⁾

4.2 車両の固縛評価方法の開発

国土交通省により「フェリー等における貨物固縛の強度評価の方法について」²⁹⁾(固縛ガイドライン)が発行されている。本ガイドラインでは、貨物と固縛装置の剛性を考慮しない実用的な固縛評価方法(剛体モデル)が示されている。しかし剛体モデルは、固縛装置に作用する力の評価方法としては厳密なものではない。一方、文献³⁰⁾で貨物と固縛装置の剛性を考慮する固縛評価モデル(弾性モデル)が提案されており、乗用車に関する弾性モデルによる計算結果と実船計測結果は概ね良い一致を示している。しかし、カーフェリーの代表的な貨物の一つであるセミトレーラについては十分な研究がなされていない。そこで本研究では、セミトレーラの固縛について、剛体モデルと弾性モデルによる固縛評価を実施した。その結果、剛体モデルによる評価では、セミトレーラの積載位置によっては張力が過小評価される可能性が高いことが明らかになった。詳細については文献³¹⁾を参照されたい。

4.3 天然ガス燃料船のリスク評価

環境保護等の観点から天然ガス燃料船の導入機運が高まっている。天然ガス燃料船の実現のためには、安全基準等の策定が必要であるが、研究時点において、安全基準等が策定されていなかった。そこで本研究では、LNG 燃料補給に関し、ハード面及びソフト面から HAZID を実施し、必要な安全対策を抽出し、抽出された安全対策を国土交通省の LNG 移送ガイドライン³²⁾に提案した。例えば、大量 LNG 漏洩に対する安全対策として、ウォーターカーテンによる船体保護を提案し、ガイドライン³²⁾に採用された。

			深刻度 SI				
			1	2	3	4	5
			無視してよい Negligible	小さい Minor	中程度 Midium	大きな Major/ significant	破滅的な Catastrophic/major
頻度 FI	5	頻繁 Frequent	M	H	H	H	H
	4	良くありそ うな Very likely	M	M	H	H	H
	3	ありそう Likely	L	M ③少量LNG漏洩	M	H	H
	2	起こりうる Possible	L ⑩落雷による着火 ⑫第3船との衝突 (小型船(FRP船)) ⑬電源・油圧機能喪失	L ①物体の落下 ⑫第3船との衝突 (大型船)	M ④中量LNG漏洩(燃 焼等せず)	M	H
	1	起こりそ うに ない Unlikely	L	L ⑦LNG過積 ⑨ロールオーバー	L ②作業員の落下 ⑪バンカー船・LNG 燃料船の火災	M ④中量LNG漏洩(燃 焼等発生)	M ⑤大量LNG漏洩

図 4.2 HAZID の結果³³⁾

4.4 新規固体ばら積み貨物の承認方法の明確化

固体ばら積み貨物の海上輸送は、国際海上固体ばら積み貨物コード（International Maritime Solid Bulk Cargoes Code, IMSBC コード）により国際的に統一された安全規制が実施されており、IMO において IMSBC コードの改正作業が実施されている。本研究では、IMSBC コードに係る IMO WG の議長を務めるとともに、日本提案文書の作成等に貢献した。また、IMSBC コードに記載されていない固体ばら積み貨物を運送する場合は、貨物の性状の評価及びこれに基づく運送方法の決定が必要であるが、本研究では、IMSBC コードに記載されていない固体ばら積み貨物の運送を計画している事業者の検討の一助になることを目的に、貨物の種別の判定方法や運送方法の決定方法に関する知見を纏め、海技研報告³⁴⁾として公開した。

4.5 IAEA 輸送規則見直し

2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震による福島第一原子力発電所の事故（福島事故）以降、国際原子力機関（International Atomic Energy Agency, IAEA）において IAEA 原子力安全基準全体の見直しが要請され、その一環として IAEA 放射性物質安全輸送規則（IAEA 輸送規則）の見直しが実施された。IAEA 輸送規則見直しのポイントとしては、福島事故の教訓の一つである「地震・津波への対策の強化」があり、そうした自然起因事象に対する安全性が現行の IAEA 輸送規則で適切にカバーされているか、ギャップ分析を通じて確認することとなった。そこで、当事国である日本は、自然災害が放射性物質輸送にもたらす影響をリスク概念に基づいて分析し、2013 年 7 月に IAEA において開催された輸送環境技術会合（TM-44891）において、自然事象に起因する輸送事象の評価手法とそれに基づく使用済燃料の国内輸送を対象としたケーススタディの結果を報告した。津波及び火山活動に起因する少数の潜在的過酷事象が影響の面からセーフティケースとして例示されたが、いずれも推定頻度がかなり低くリスクは僅少であり、現行輸送規則の技術基盤が自然起因事象に対して概ね妥当であることを示した。本研究の詳細については、文献³⁵⁾を参照されたい。

4.6 液化水素運搬船の安全基準の策定

水素社会の実現に向けて、豪州から我が国への液化水素の海上輸送が計画されている。液化水素の海上輸送の実現のためには、安全基準等の策定が必要であるが、研究時点において、液化水素運搬船の安全基準等が策定されていなかった。そこで本研究では、液化水素運搬船に対しハザードを抽出し、液化水素の低温性等を考慮した材料選択等の合理的な安全要件案³⁶⁾を示し、国土交通省と豪州海事安全庁との安全要件に関する覚書の合意に貢献した。

5. まとめ

本報告では、平成23年度から平成27年度にかけて実施した重点研究「リスクベースの安全性評価手法を適用した設計技術の確立及び安全基準の策定に関する研究」の一部の成果の概要について報告した。

リスクベース設計のための体系的手法の確立に関する研究では、事故シナリオの構築とその発生頻度の推定手法の開発及び結果解析手法の高度化を実施した。その主な結果を以下に示す。

- ✓ 事故シナリオの構築に関し、新たな HAZID 手法として、FMEA を改良した手法を開発した。また、海難事故原因の大半は人的過誤であることを考慮し、ヒューマンエラーの観点から衝突事故発生シナリオを構築した。その妥当性も検証し、人的過誤データのみから衝突回避失敗確率が推定可能であることを明らかにした。更に、実際の事故の情報に基づく災害進展シナリオを明らかにした。
- ✓ 事故発生頻度の推定に関し、衝突危険発生頻度及び座礁危険発生頻度を航跡データ等から推定する従来の手法を高度化した手法を開発した。その妥当性も検証し、開発した手法の妥当性を明らかにした。
- ✓ 結果解析手法の高度化に関し、船舶傾斜や動揺等を考慮して、船舶のリスクベース設計に使用するために適当なシミュレーション手法の高度化を実施した。また、実用性の観点から、シミュレーション回数を合理的に削減する手法を開発した。

新規輸送物の安全基準の策定に関する研究の主な結果は以下である。

- ✓ 水素燃料電池自動車等を運搬する船の区画の安全基準の策定に関し、PCTC 貨物倉内における気流計測を実施し、風速が無風に近い場所が存在すること等がわかった。また、船倉内の気流の数値シミュレーションを実施し、MASCON モデルにより概ね実測値に一致する二次元断面上の気流場を再現できることがわかった。
- ✓ フェリーにおける車両の固縛評価方法の開発に関し、セミトレーラの固縛について、剛体モデルによる評価では、セミトレーラの積載位置によっては張力が過小評価される可能性が高いことがわかった。
- ✓ 天然ガス燃料船のリスク評価に関し、LNG 燃料補給に関する HAZID を実施し、必要な安全対策を抽出し、抽出された安全対策を国土交通省の LNG 移送ガイドラインに提案した。
- ✓ 新規固体ばら積み貨物の承認方法の明確化に関し、IMSBC コードに係る IMO WG の議長を務めるとともに、日本提案文書の作成等に貢献した。
- ✓ IAEA 輸送規則見直しに関し、自然災害が放射性物質輸送にもたらす影響をリスク概念を用いて分析し、IAEA 輸送規則見直しの議論に貢献した。
- ✓ 液化水素運搬船の安全基準の策定に関し、液化水素運搬船に対しハザードを抽出し、合理的な安全要件案を示し、国土交通省と豪州海事安全庁との安全要件に関する覚書の合意に貢献した。

海事分野においてリスク評価の重要性はますます高まっていくことが予想される。海上技術安全研究所では、引き続きリスク評価に関する研究に取り組んで行く予定である。

謝 辞

本重点研究は著者らの他に、金湖富士夫（研究当時海洋リスク評価系、2 章及び 3 章の研究主任者）、大西世紀（海洋リスク評価系、3 章の研究参加者）、川越陽一（企画部、研究当時海洋リスク評価系、2 章及び 4 章の研究参加者）、三友信夫（研究当時海洋リスク評価系、2 章の研究参加者）、矢加部文（研究当時海洋リスク評価系、4 章の研究参加者）、柳裕一郎（流体性能評価系、研究当時海洋リスク評価系、4 章の研究参加者）により実施したことを付記する。

参考文献

- 1) IMO: Guidelines for the Approval of Alternatives and Equivalents as Provided for in Various IMO Instruments, MSC.1-Circ.1455, 2013.
- 2) A. Papanikolaou *et al.*: Risk-Based Ship Design, Springer, 2009.
- 3) 金湖富士夫, 川越陽一, 三友信夫: 船舶のリスク評価のための FMEA に基づく新たな HAZID 手法, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第 15 号 (2012), pp.281-284.
- 4) M. R. Endsley: Toward a Theory of Situation Awareness in Dynamic Systems, Human Factors, 1995, Vol.37, Issue 1, pp.32-64.
- 5) Y. Tamura and T. Shinoda: Safety Assessment with Marine Casualty Data on Collision Accidents between Fishing Vessels and Cargo Vessels, Proc. of 2009 Int. Conf. on Offshore and Polar Engineering, 2009.
- 6) H. C. Benhardt, *et al.*: Savannah River Site Human Error Data Base Development for Nonreactor Nuclear Facilities, WSRC-TR-93-581, 1994.
- 7) H. Itoh and F. Kaneko: A Probabilistic Model for the Consequences of Collision Casualties, Proc. of 4th Int. Conf. on Collision and Grounding of Ships, 2007.
- 8) F. Kaneko: Effectiveness of Separation Scheme for Prevention of Collision by Diminishing Ships' Encounter Probability, Proc. of 3rd Int. Conf. on Collision and Grounding of ships, 2004.
- 9) F. Kaneko and D. Hara: Estimation of Dangerous Encounters' Number from Observed Ship Trajectories, Proc. of 4th Int. Conf. on Collision and Grounding of ships, 2007.
- 10) 藤井弥平, 巻島勉, 原潔: 海上交通工学, 海文堂(1981), pp.79-85.
- 11) 浅見光史, 金湖富士夫: NDM モデルに基づく船舶衝突モデルの開発, 日本船舶海洋工学会論文集, 第 15 号 (2012), pp.207-217.
- 12) 金湖富士夫: IHSF 海難データベースの分析による旅客船の事故シーケンスの抽出, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第 19 号 (2014), pp.315-318.
- 13) P. T. Pedersen: Collision and Grounding Mechanics, Proceedings of WEGENT'95, 1995, pp.125-157.
- 14) F. Kaneko: An Improvement on a Method for Estimating Number of Collision Candidates between Ships, the Sixth International Conference on Collision and Grounding of Ships and Offshore Structures, CRC press, 2013, pp.27-38.
- 15) 金湖富士夫: 二船の遭遇頻度推定手法の総括, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第 17 号 (2013), pp.169-172.
- 16) F. Kaneko: Models for Estimating Grounding Frequency by Using Ship Trajectories and Seabed Geometry, Ships and Offshore Structures, Vol.7, No. 1, 2012, pp.87-99.
- 17) H. Kobayashi: The Subgrid-Scale Models Based on Coherent Structures for Rotating Homogeneous Turbulence and Turbulent Channel Flow, Physics of Fluids, 17, 045104, 2005.
- 18) F. Kaneko *et al.*: On A Practical Methodology for Risk Based Design – Progress Report of NMRI Research Project -, Proceedings of the IDFS 2013, pp.43-59.
- 19) H. Oka and Y. Oka: Numerical Analysis on Plume Temperature Properties Formed above a Harmonically Oscillating Fire Source, Fire Safety Journal, 88, 2017, pp.56-66.
- 20) E. R. Galea *et al.*: Recommendations on the Nature of the Passenger Response Time Distribution to be used in the MSC 1033 Assembly Time Analysis Based on Data Derived from Sea Trials, International Journal of Maritime Engineering, Vol.149, Part A1, 2007, pp.15-29.
- 21) D. Vassalos *et al.*: A Mesoscopic Model for Passenger Evacuation in a Virtual Ship-Sea Environment and Performance-Based Evaluation, Proceedings of Pedestrian and Evacuation Dynamics (PED 2001), pp.369-391.
- 22) J. Y. Pradillon: ODIGO – Modelling and Simulation Crowd Movement onboard Ships, 3rd International Conference on Computer and IT Application in the Maritime Industries (COMPIT), 2004, pp.278-289.
- 23) M. Asami, H. Oka and F. Kaneko: Effects of Inclination of Corridors on Behaviors of Evacuees on Passenger Ships, Proceedings of IMDC2015, pp.155-166.

- 24) M. T. Tavakoli et al.: Analytical and Numerical Modelling of Oil Spill from a Side Tank with Collision Damage, Ships and Offshore Structures, Vol.7, No. 1, 2012, pp.73-86.
- 25) Fluent Inc.: FLUENT 6.1 user's guide. 2003.
- 26) F. Kaneko *et al.*: A Method for Analyzing Fire Risk of Passenger Ships Utilizing Simulation Technique in Risk-Based Design, Proceedings of IMDC2015, pp.437-457.
- 27) 川越陽一, 太田進, 岡秀行: 自動車専用船の貨物倉における気流計測, 日本航海学会論文集, 第 125 号 (2011), pp.123-128.
- 28) 一般財団法人日本船舶技術研究協会: IMO フォロー (救命検討会、防火検討会、航海設備検討会) (2012 年度報告書), pp.631-639.
- 29) 国土交通省海事局: フェリー・RORO 船の安全対策について, 外洋を航行するフェリー・RORO 船の貨物固縛方法について (ガイドライン) 別添, 国海環第 3 号の 1, 国海運第 9 号の 1, 国海安第 26 号の 1, 国海査第 60 号の 1, 平成 23 年 4 月 28 日.
- 30) S. Ohta *et al.*: Study on Method for Evaluating Securing Arrangements for Pure Car Carriers – Numerical Model for Calculating Forces Acting on a Car and Lashing Belts, 日本航海学会論文集, 第 103 号 (2000), pp.143-150.
- 31) 矢加部文, 太田進, 田村兼吉: カーフェリーに積載されるセミトレーラの固縛評価に関する研究, 日本航海学会論文集, 第 128 号 (2013), pp.89-100.
- 32) 国土交通省: Ship to Ship 方式 LNG 移送のオペレーションガイドライン.
- 33) 国土交通省: 天然ガス燃料船に関する総合対策報告書, 2013, p.10.
- 34) 太田進: 国際海上固体ばら積み貨物規則に記載が無い貨物の運送に係る評価, 海上技術安全研究所報告, 第 15 号, 第 3 号 (平成 27 年度), 2015, pp.67-120.
- 35) 平尾好弘, 近内亜紀子: 福島第一原子力発電所事故を契機とした IAEA 輸送安全規則の見直しと日本の貢献 - 放射性物質の輸送中に自然ハザードに起因して起きる潜在事象の同定と評価 -, 海上技術安全研究所報告, 第 13 号, 第 4 号 (平成 25 年度), 2013, pp.13-20.
- 36) Australia and Japan: Safety Requirements for Carriage of Liquefied Hydrogen in Bulk - Draft Interim Recommendations and Proposal on a Work Plan, CCC 2/4, 2015.