

東京大学大学院新領域創成科学研究科
人間環境学専攻

平成 29 年度
修士論文

Systems Approach を用いた
自律船のコンセプト設計

2018 年 2 月 8 日提出

指導教員 稗方 和夫 准教授 印

学生証番号 47-166681

伊藤 航大

目次

目次.....	I
図目次	V
表目次	VIII
第1章 序論	1
1.1 背景.....	2
1.1.1 はじめに	2
1.1.2 Systems Approach の有効性	3
1.2 目的.....	4
1.3 本論文の構成	4
第2章 自律船に関する先行研究・調査	5
2.1 はじめに.....	6
2.2 主たる自律船プロジェクト	6
2.2.1 AAWA.....	6
2.2.2 MUNIN	6
2.2.3 ReVolt	8
2.2.4 日本における自律船の動向	9
2.3 自律船全般に関する研究	9
2.3.1 自律船・遠隔船の定義・分類	9
2.3.2 自律化レベルの定義について	11
2.3.3 自律船のリスクアセスメントに関する研究	14
2.3.4 自律船と自動運転車.....	15
2.3.5 自律船の設計に関する研究	17
2.3.6 自律船の機能の分解に関する研究	18
2.4 自律船の要素技術に関する研究.....	21
2.4.1 周囲の環境の把握・認識(認知)	21

2.4.2 状況に応じた動作の判断(判断)	28
2.4.3 実際の操作(操作)	29
2.4.4 運転時以外に必要とされる技術	30
2.5 自律船に関する法制度についての研究・調査	33
2.5.1 現在の海上法の概要	33
2.5.2 IMO の動向	34
2.5.3 自律船実現に向けて考えるべき事項	35
第3章 SYSTEMS APPROACH のツール	36
3.1 SYSTEMS APPROACH と SYSTEM THINKING	37
3.2 FORM, FUNCTION, NEEDS, INTENT, CONCEPT	37
3.3 ILITY	38
3.4 STAKEHOLDER VALUE NETWORK	38
3.5 OBJECT PROCESS METHODOLOGY	40
3.5.1 Object Process Methodology とは	40
3.5.2 OPM の書き方について	42
3.6 MORPHOLOGICAL MATRIX	43
3.6.1 Morphological Matrix とは	43
3.6.2 MM における制約の表現	45
3.6.3 MM を用いた定量的評価	45
3.6.4 MM の作成と評価軸の選定について	46
3.7 ツールの組み合わせに関する研究	47
3.8 本研究の位置付け	48
第4章 自律船の設計フロー	49
4.1 概要	50
4.2 利害関係者の分析と評価軸の選定	51
4.2.1 利害関係者の分析	51
4.2.2 評価軸の選定	52
4.3 OPM による既存船舶の機能の分析	52
4.4 MM の作成	53
4.5 評価軸に対応した評価値の計算	54

4.6 パレート最適解の計算	54
第5章 ケーススタディ	56
5.1 はじめに.....	57
5.2 利害関係者の分析と評価軸の選定	57
5.2.1 利害関係者の分析	57
5.2.2 評価軸の選定.....	60
5.3 OPM による既存船舶の機能の分析	63
5.4 MM の作成	65
5.5 評価軸に対応した評価値の計算.....	67
5.5.1 Economy の計算	67
5.5.2 Operational safety の計算	69
5.5.3 Reliability・Flexibility・Uncertainty・Modularity・Maintainability の 計算	71
5.6 パレート最適解の計算	72
5.6.1 海運会社の場合	73
5.6.2 造船会社の場合	74
5.6.3 船級協会の場合	75
5.6.4 港湾局の場合.....	78
5.6.5 保険会社の場合	79
5.6.6 船用機器メーカーの場合.....	81
5.6.7 まとめ	82
第6章 考察	85
6.1 はじめに.....	86
6.2 自律船の設計フローに関する考察	86
6.2.1 手続き的な部分と属人的な部分	86
6.2.2 OPM から MM の作成について.....	87
6.2.3 MM における重要な意思決定項目の抽出.....	87
6.2.4 評価軸に対応した評価値の計算について	88
6.3 海事クラスター内の利害関係者に応じた自律船の設計.....	89
6.4 自律船の設計フローの意思決定における貢献.....	89

第7章 結論	90
7.1 結論	91
7.2 今後の展望	91
謝辞	92
参考文献	96
APPENDIX	102
A. 海上交通シミュレータについて	102
a.1. シミュレータの概要	102
a.2. シミュレーションの流れ	103
a.3. 基本的な航行方法	104
a.4. 避航の判断と避航行動	104
a.4. 船舶の運動	105

図目次

図 1-1	内航船員の構成[2].....	2
図 2-1	MUNIN のコンセプト[8].....	7
図 2-2	ReVolt のコンセプト船[9].....	8
図 2-3	自律船の分類([12]より著者が作成).....	10
図 2-4	Autonomous level of Lloyd Registers.....	12
図 2-5	Autonomy level of NFAS[12].....	14
図 2-6	Ship autonomy types[12].....	14
図 2-7	MUNIN のデザイン方法[15].....	15
図 2-8	考えられるリスクとその対処法[15]	15
図 2-9	自律船と自動運転車との比較[7].....	16
図 2-10	Autonomous Navigation System[7]	17
図 2-11	Illustration of relationships between ODD, DNT and DNT Fallback[12]	18
図 2-12	Radar の画面[18].....	22
図 2-13	3D レーザスキャナとの比較[22]	23
図 2-14	Camera	24
図 2-15	ECDIS の構成要素([26]より著者が作成).....	26
図 2-16	ECDIS のディスプレイ表示[27].....	27
図 2-17	センサーの組み合わせ[7].....	28
図 2-18	TCPA・DCPA について	29
図 2-19	Real-Time Based Approach のコンセプトイメージ[35].....	31
図 2-20	SCC のイメージ図[8].....	33
図 3-1	SVN の例[48].....	39
図 3-2	Object と Process.....	40
図 3-3	OPM structural links	41
図 3-4	OPM procedural enabling link.....	41
図 3-5	OPM procedural transforming link	41
図 3-6	Team1 の海運サービスの分析	42

図 3-7 Team2 の海運サービスの分析	43
図 3-8 Apollo project の MM[45].....	44
図 3-9 Apollo project における意思決定項目のマッピング[45].....	44
図 3-10 Apollo project の constraint[45]	45
図 3-11 MM の特性値の設定	46
図 3-12 Hiekata らの提案手法の概要図[54]	47
図 4-1 自律船設計フローの概要図.....	51
図 4-2 OPM の例[45].....	53
図 4-3 作成する MM (GF は General Form、SF は Specific Form を表す)	54
図 4-4 設計案のプロットイメージ (評価軸が 2 軸の場合).....	55
図 4-5 各設計案のデータ構造	55
図 5-1 自律船プロジェクトの利害関係者となりうる存在の列挙	57
図 5-2 自律船プロジェクトの SVN	59
図 5-3 意思決定者・第一受益者・意思決定者に関わる一次的な利害関係者を抽出 した SVN	59
図 5-4 既存船舶の機能の OPM によるモデル化.....	64
図 5-5 作成した MM (OS: Open Sea 外洋, CA: Congested Area 輻輳海域)	65
図 5-6 本ケーススタディで検討する MM	66
図 5-7 MM の制約条件の表現	66
図 5-8 MUNIN・ReVolt の設計案の MM へのマッピング	67
図 5-9 キャッシュフローモデル[59]	68
図 5-10 MM の特性値の設定	72
図 5-11 設計案のプロット(海運会社の場合).....	73
図 5-12 設計案のプロット(造船会社の場合).....	75
図 5-13 設計案のプロット(船級協会の場合).....	76
図 5-14 設計案のプロット(港湾局の場合)	78
図 5-15 設計案のプロット(保険会社の場合).....	80
図 5-16 設計案のプロット(船用機器メーカーの場合)	81
図 6-1 Connectivity と Sensitivity の観点からの意思決定項目の構造化[6]	88
図 7-1 開発した海上交通シミュレータ	102
図 7-2 シミュレーションの流れ	103

表目次

表 2-1 ReVolt のコンセプト船の主要目	8
表 2-2 Sheridan による自律化レベルの定義	11
表 2-3 SINTEF の自律化レベルの定義[14]	13
表 2-4 MUNIN Main function groups and sub-groups[12]	19
表 2-5 Summary of the different layers and substantive branches of maritime law[7]	34
表 3-1 Syntax of logical constraints[6]	45
表 5-1 ニーズを評価する ility の列挙	60
表 5-2 先進安全船舶技術研究開発支援事業	61
表 5-3 ニーズを評価する評価軸	63
表 5-4 Cost changes	68
表 5-5 $\Delta Autonomous\ ship\ technology\ cost + \Delta Crew\ wages$ の設定値 (10KUSD)	69
表 5-6 $\Delta Hotel\ system\ development\ cost$ の設定値 (10KUSD)	69
表 5-7 シミュレータの基本設定	70
表 5-8 パラメータの設定	71
表 5-9 算出された衝突回数 (左: 外洋 / 右: 輻輳海域)	71
表 5-10 各プロット点の内訳(海運会社の場合)	74
表 5-11 パレート最適解のうち各 Form が占める割合(海運会社の場合)	74
表 5-12 パレート最適解のうち各 Form が占める割合(造船会社の場合)	75
表 5-13 パレート最適なプロット点の内訳(船級協会の場合)	77
表 5-14 パレート最適解のうち各 Form が占める割合(船級協会の場合)	77
表 5-15 パレート最適なプロット点の内訳(港湾局の場合)	78
表 5-16 パレート最適解のうち各 Form が占める割合(港湾局の場合)	79
表 5-17 パレート最適なプロット点の内訳(保険会社の場合)	80
表 5-18 パレート最適解のうち各 Form が占める割合(保険会社の場合)	80
表 5-19 パレート最適なプロット点の内訳(船用機器メーカーの場合)	82
表 5-20 パレート最適解のうち各 Form が占める割合(船用機器メーカーの場合)	

.....	82
表 5-21 パレート最適解の全設計案に占める割合	83
表 5-22 MUNIN と ReVolt の設計案がパレート最適解と判定されたか?	84

第1章 序論

1.1 背景	2
1.1.1 はじめに	2
1.1.2 Systems Approach の有効性	3
1.2 目的	4
1.3 本論文の構成	4

1.1 背景

1.1.1 はじめに

近年、世界的に船舶の自動化・無人化が進められている。船舶の自律化・無人化を進める理由として、下記のメリットがあげられる。

- 船員の高齢化などによる船員不足の解消
- 長距離航海における船員の負担の減少
- 人為的ミスの削減による衝突などの減少
- 人件費を始めとするコストの削減
- 環境への配慮

特に内航船の船員不足と船員の高齢化は深刻な問題である[1]。船員不足問題は 20~30 年前から存在したが、近年は高齢化が進んだことで退職者が増え、問題がさらに顕著になっている。平成 27 年 10 月時点で日本国内には 20,258 名の内航船員が存在するが、55 歳以上が 4 割を占める[2]。外航船の船員不足は内航船ほど顕著ではないが、船員の多くは外国人であり、日本人の船員は少なく、人材の確保が問題になっている。海上運送法に基づく「日本船舶及び船員の確保に関する基本方針」に定める目標では、平成 20 年からの 10 年間で日本人船員を 1.5 倍に増加させることが定められている。

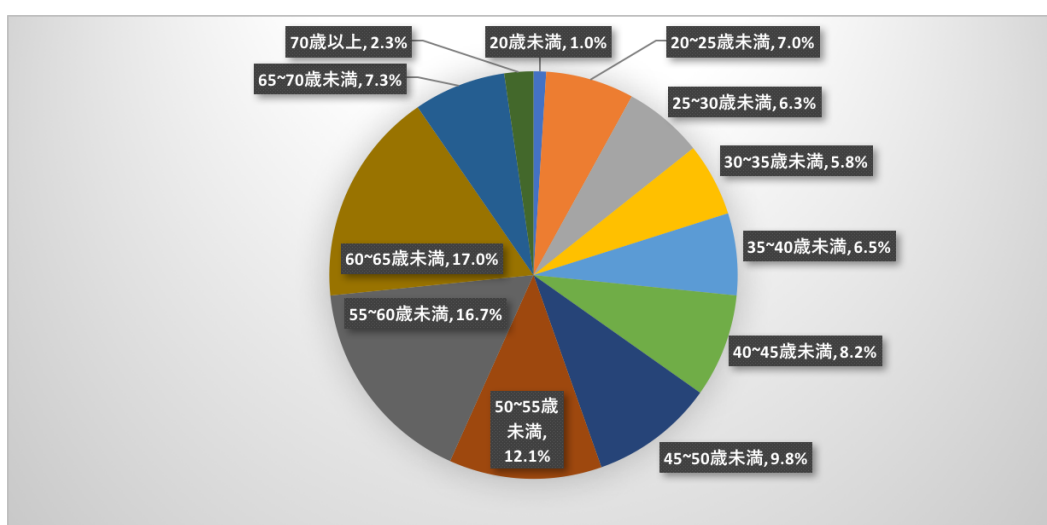


図 1-1 内航船員の構成[2]

また劣悪な労働環境による船員の離職率の高さも問題である。船員の定着率はおおよそ7割であり、3割は途中で辞めて行く[1]。たとえ給与が高くても、勤務形態(3ヶ月乗船1ヶ月休み)や労働環境の過酷さが原因となる。居住環境・食事の問題・携帯電話が繋がらないことが生活環境の主たる問題点であると内航海運関係者へのヒアリングにより指摘されている。

このような問題に対応するために自律船というアイデアが考案された。Rodseth ら[3][4]は、自律船はいくつかの持続性について貢献すると述べている。

- 経済的持続性: 運航にかかるコスト(例えば人件費など)を削減する
- 環境的持続性: 人間の生活に関わる設備を削減することで、燃料消費量を下げる
- 社会的持続性: 疲労した船員が操船に関わることを避けることで安全性を向上させる、

またリモートシステムにより長時間の航海がなくなることで、船員に対する負担を下げる

自律船に関する研究は初期段階であり、2018年1月現在においては、コンセプト設計が主である。代表的なプロジェクトとして Rolls-Royce によって行われている AAWA、EU によって行われた MUNIN、DNV-GL によって行われた ReVolt などが挙げられる。これらのプロジェクトは造船会社や船級協会、大学などの複数の利害関係者によって進められているが、各利害関係者の立場から明確に分析した記述は存在しない。

1.1.2 Systems Approach の有効性

Systems Approach とは、社会科学の分野で発展した考え方であり、複雑性のある問題に対して事象全体をシステムとして認識することで問題解決を図る方法論のことである[5]。

Simmons[6]は、この Systems Approach を用いて、アポロ計画問題について考察している。

Simmons は、アポロ計画問題について意思決定すべき問題を抽出し、考えられる設計案から、どの設計案を選ぶべきかという問題を解いた。例えば、「宇宙船への搭乗員の数は何人にすべきか」、「燃料は何を選択すべきか」などである。

アポロ計画問題は技術システムと社会システムの融合した Sociotechnical システムであり、このような複雑な問題には Systems Approach は有効であった。自律船のコンセプト設計問題は同じく技術システムと社会システムが融合した Sociotechnical システムであり、定式化が難しい複雑な問題である。この問題には Systems Approach が有効であると考えられる。

1.2 目的

自律船の開発は初期段階にある。利害関係者は自律船に対して異なるニーズを持っており、自律船のコンセプトは全ての利害関係者のニーズを満たすことが理想である。しかしながら、相反するニーズが存在し、全ての利害関係者のニーズを満たすことは難しい。実際には、特定の利害関係者にとって最適な選択をする代わりに、多くの利害関係者が満足しうる意思決定を目指すこととなる。

本研究では、このような意思決定の支援として、利害関係者ごとに異なるニーズを明確に記述し、モデルベースで性能を見積もることで、優れた自律船のコンセプト設計案を検討するフローを提案する。

具体的には、Systems Approach を用いて自律船コンセプトの設計フローを提案し、実証する。利害関係者ごとのニーズを Stakeholder Value Network(SVN)を用いて明らかにし、ニーズに基づき自律船の性能を評価する評価軸を決定する。次に、ニーズから Object Process Methodology(OPM)を用いて既存船舶に関わる Function と Form をマッピングし、自律船コンセプト設計における意思決定項目を Morphological Matrix(MM)として表現する。意思決定項目の組み合わせとして表現される自律船コンセプトを、選択した評価軸に基づき評価し、パレート最適なコンセプトを算出する。MUNIN や ReVolt などの既存の自律船コンセプトを評価することで、提案する自律船の設計フローが機能することを確認する。

1.3 本論文の構成

本論文の構成について以下に示す。

第1章では、本研究の背景と目的について述べた。

第2章では、自律船に関する先行研究・事例について述べる。

第3章では、Systems Approach のツールについて述べ、本研究の位置付けを示す。

第4章では、自律船の設計フローについて述べる。

第5章では、自律船の設計フローに沿って、著者が自律船について設計を行った一例をケーススタディとして示す。

第6章では、提案した自律船の設計フローやケーススタディについての考察について述べる。

第7章では、本研究の結論と今後の展望について述べる。

第2章 自律船に関する先行研究・調査

2.1 はじめに.....	6
2.2 主たる自律船プロジェクト.....	6
2.2.1 AAWA.....	6
2.2.2 MUNIN	6
2.2.3 ReVolt	8
2.2.4 日本における自律船の動向	9
2.3 自律船全般に関する研究	9
2.3.1 自律船・遠隔船の定義・分類	9
2.3.2 自律化レベルの定義について	11
2.3.3 自律船のリスクアセスメントに関する研究.....	14
2.3.4 自律船と自動運転車.....	15
2.3.5 自律船の設計に関する研究	17
2.3.6 自律船の機能の分解に関する研究	18
2.4 自律船の要素技術に関する研究.....	21
2.4.1 周囲の環境の把握・認識(認知)	21
2.4.2 状況に応じた動作の判断(判断)	28
2.4.3 実際の操作(操作).....	29
2.4.4 運転時以外に必要とされる技術	30
2.5 自律船に関する法制度についての研究・調査	33
2.5.1 現在の海上法の概要	33
2.5.2 IMO の動向	34
2.5.3 自律船実現に向けて考えるべき事項.....	35

2.1 はじめに

本章では、近年の自律船の導入状況と研究について紹介するとともに、自律化の際に必要なとされる要素技術について説明する。次に船舶設計についての研究を述べる。本章、特に2.4の知識は、4.4において設計空間を表現する際に役立つ。

2.2 主たる自律船プロジェクト

現在、世界中で自律船に関するプロジェクト・研究が進められている。主なものとしてここでは、Rolls-Royce によって行われている Advanced Autonomous Waterborne Applications (AAWA)[7]、ドイツ、ノルウェー、スウェーデン、アイスランド、アイルランドに位置する国や企業によって行われている Maritime Unmanned Navigation through Intelligence in Networks (MUNIN)[8]、DNV-GL によって行われている ReVolt[9]、そして日本における自律船の動向について概説する[10]。

2.2.1 AAWA

AAWA は、Finnish Funding Agency for Technology and Innovation から 660 万ユーロ支援を受けた自律船の共同プロジェクトである。2015 年から 2018 年までの 3 段階での実施予定であり、Phase1(2015 年-2016 年)は概念定義、Phase2(2016 年-2017 年)は要素技術開発、Phase3(2017 年-2018 年)は概念確認である。協賛会社・機関は、Rolls-Royce、DNV-GL、Inmarsat、Deltamarin、NAPA、Brighthouse Intelligence、Tampere University of Technology、VTT Technical Research Centre of Finland Ltd、Abo Akademi University、Aalto University である。船舶に取り付けられている複数のセンサーをどのコンテキストでどのように組み合わせれば良いかというセンサーフュージョンの問題、MAXCMAS 避航操船をはじめとした制御アルゴリズムなど「技術の開発・検討」をはじめとして、「安全とセキュリティ」、「社会的・法的受容性」、「ビジネスモデル」の 4 つの観点から自律船について検討している。

Rolls-Royce 社は、提案する技術のほとんどは既存の技術の組み合わせにより、達成が可能だとしているが、実際に組み合わせた場合に既存の船舶と同一の性能を確保すること、また自律船に見合った従来より高い性能を確保することは課題であると述べている。

2.2.2 MUNIN

MUNIN は、技術の開発ではなく、自律船のコンセプト開発を目的としたプロジェクトである。

MUNIN プロジェクトは、2012 年 9 月から 2015 年 8 月まで、290 万ユーロの予算で実施された。供試船として、国際航路を航行するバルクキャリア船を選定し、先進センサモジュール、深海域自律航路システム、自律エンジンモニタリングシステム、陸上制御センタ、陸上制御センタ船舶運用士、陸上制御センタ機関士及び陸上制御センタ状況管理チームの開発とシミュレータによる検討が行われた。

MUNIN は、バルクキャリア船を対象に、深海域での大陸間航海を陸上のコントロールセンタでモニタリングしながら運航することを想定した自律船のコンセプトを設計している。離着陸と湾内・輻輳海域での航海は現在同様、船上のブリッジから行う予定である。運航船舶が外洋に近づくと乗船している船員が別の船で陸上に戻り、そこからはリモートコントロールで運航することを想定している[8]。

レーダーや AIS(Automatic Identification System)、赤外線カメラを始めとした先進センサモジュールが、船舶の運航環境をモニタリングし、物体の認識や危険度の判断を行う。先進センサモジュールの信頼性や精度は現在のセンサーよりも高くなる予定である。また船舶の自動運航は衝突回避とウェザールーティングという 2 種類のモジュールにより実現される。衝突回避モジュールは、漁船や貨物船、浅海域などが検出されると運航船舶は COLREGs のルールに従い、避航を行う。ウェザールーティングモジュールは航路の天候や海象の予測を行い、最適な航路を提案する。



図 2-1 MUNIN のコンセプト[8]

MUNIN は自律航行における検討の結果として、以下のように述べている。「自律航行のコ

ンセプトを検討する上で、特に大きな障害はなかった。ただし、商業ベースの自律船に関する自律航行システムを構築するにはさらなる検証作業が必要であり、新たな先進センサの利用も求められる。さらに、幅員海域の利用においては、自動避航あるいは避航操船支援機能の向上が必要である。」

2.2.3 ReVolt

ReVolt はノルウェー及びドイツの船級協会である DNV-GL が主体となって行ったプロジェクトである。ReVolt の目的は、ノルウェーにおけるトラック輸送に変わる効率的な輸送手段の開発である。彼らが考案した自律船のコンセプトは、バッテリー駆動により電気をエネルギー源とする短距離の完全無人船である。彼らが考案したコンセプト船を図 2-2 に示す。多分野の専門家との議論とチームワークにより、このコンセプトは設計された。サービススピードは 6knot、航海範囲はおよそ 100 海里、搭載コンテナ数は 100TEU とした。その主要目について表 2-1 に示す。完全無人化を達成することで、載貨貨物の増加と、運航コストとメンテナンスコストの低下を実現でき、既存船舶に対して、30 年間で 34million USD の節約になると述べている。現在は 20 分の 1 スケールの模型船を建造し、実験を行なっている。



図 2-2 ReVolt のコンセプト船[9]

表 2-1 ReVolt のコンセプト船の主要目

Item		Item	
Loa	60.23 m	Cargo Capacity	100 TEU
B	14.5 m	Cruising range	100 NM
Draught (Full)	5.0 m	2 Blade Azimuth Pod	2
Service Speed	6 knot	Retractable Bow Thruster	2
Battery	3000 kwh		

ReVolt はプロジェクトの結論として以下のように述べている。

「ReVolt は自律船のコンセプトを設計した。ReVolt の開発したコンセプト船は現在の技術で建造、運用可能であるが、商業ベースでの実現には、いくつかの技術において課題があり、さらなる開発と検証が必要である。またインフラの充実度により、システムのパフォーマンスが左右されるため、インフラの整備も含めた検討が必要である」。

2.2.4 日本における自律船の動向

国土交通省をはじめとして、政府は 2025 年までの「自動運航船」の実用化を目指している(政府は「自律船」という名称ではなく、「自動運航船」という名称を用いている)。内閣府が発表した未来投資戦略 2017 –Society 5.0 の実現に向けた改革-[11]では、下記のように自律船について述べられている。

「2025 年までの「自動運航船」の実用化に向けて、船舶の設備、運航等に関わる国際基準の 2023 年度中の合意を目指すとともに、国内基準を整備する。そのため、来年度には、これらの基準の基礎となる要素技術として、船内機器等のデータ伝送に関わる国際規格を我が国主導で策定するとともに、改正後の海上運送法に基づき、運航効率化のための最先端のデータ伝送技術等を活用した先進船舶が、2025 年までに 250 隻程度で導入されることを目指す」。

2.3 自律船全般に関する研究

2.3.1 自律船・遠隔船の定義・分類

自律船(autonomous ship)の定義について、2006 年に行われた欧州連合の政府系海事関係諮問機関である WATER BONE TP: Technical Platform では下記の通り、定義されている。

“The vessel with next generation modular control systems and communications technology will enable wireless monitoring and control functions both on and off board. These will include advances decision support systems to provide a capacity to operate ships remotely under semi or fully autonomous control”

つまり、自律船には「自律制御を可能にする先進判断支援システム」と「ワイヤレスでの監視と制御機能を可能にする次世代モジュラー制御システム及び通信技術」の両方が必要であると述べている。しかしながら、自律・遠隔に関する区別は曖昧なままである。

また MUNIN は自律船について、下記のような定義を行なっている。

“No persons on board for whole or part of the voyage. The ship, with partial help from remote control, must be able to manage the voyage on its own.”

MUNIN は、自律船と人間との関係を述べるにとどまり、自律化達成のために必要とされる技術については述べてない。

また 2017 年 10 月に公開された NFAS(Norwegian Forum for Autonomous Ships)[12]において、自律船の分類がなされている。その分類について下図に示す。ここでは自律船(Autonomous Maritime Vehicles)について、第一次の分類として無人潜水艦(Unmanned Underwater Vehicles: UUV)と自律洋上船(Autonomous Surface Vehicles)に分類している。その後、Autonomous Surface Vehicles について自律型のもの(Maritime Autonomous Surface Ship: MASS)と無人型のもの(Unmanned Surface Vehicle: USV(Small))について区分している。一般に自律船(autonomous ship)と呼ばれるものはこの分類上では MASS に分類される。さらに MASS は、以下の 4 つに分類される。船橋に常に人がいて、機械が人間の作業を援助してくれる Autonomy Assisted Bridge: AAB。船内には人がいるが、常に船橋に人を置く必要がなく、平常時は機械が作業を行い、必要に応じて人間が船橋で操作を行う Periodically Unmanned Bridge: PUB。船内に人がおらず、必要に応じて何らかの手段で人間が乗船し操作を行う Periodically Unmanned Ship: PUS。完全無人化で操船を行う Continuously Unmanned Ship: CUS。

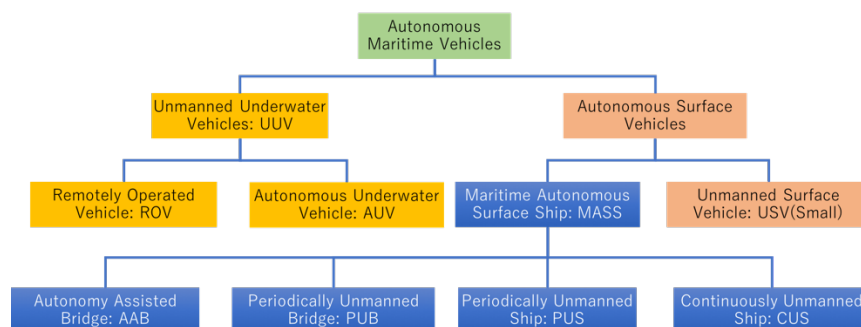


図 2-3 自律船の分類([12]より著者が作成)

2.3.2 自律化レベルの定義について

自律化レベル(Autonomy level または Levels of autonomy)については、数多くの定義が存在する。ここでは、そのうちのいくつかを解説する。

まず初めに、もっともよく知られている自律化レベルの定義は Thomas Sheridan[13]によるものである。Sheridan は人間が完全に制御する状態から、機械が完全に自律する状態までを 10 段階で定義した。

表 2-2 Sheridan による自律化レベルの定義

Level	Description
10	The computer does everything autonomously, ignores human
9	The computer informs human only if it (the computer) decides so
8	The computer informs human only if asked
7	The computer executes automatically, when necessary informing human
6	The computer allows human a restricted time to veto before automatic execution
5	The computer executes the suggested action if human approves
4	Computer suggests single alternative
3	Computer narrows alternatives down to a few
2	The computer offers a complete set of decision alternatives
1	The computer offers no assistance, human in charge of all decisions and actions

また、Lloyd Registers は 7 段階の自律化レベルを定義している。

Description
AL 0: Manual steering. Steering controls or set points for course, etc. are operated manually
AL 1: Decision-support on board. Automatic steering of course and speed in accordance with the references and route plan given. The course and speed are measured by sensors on board
AL 2: On-board or shore-based decision support. Steering of route through a sequence of desired positions. The route is calculated so as to observe a wanted plan. An external system is capable of uploading a new route plan
AL 3: Execution with human being who monitors and approves. Navigation decisions are proposed by the system based on sensor information from the vessel and its surroundings
AL 4: Execution with human being who monitors and can intervene. Decisions on navigation and operational actions are calculated by the system which executes what has been calculated according to the operator's approval
AL 5: Monitored autonomy. Overall decisions on navigation and operation are calculated by the system. The consequences and risks are countered insofar as possible. Sensors detect relevant elements in the surroundings and the system interprets the situation. The system calculates its own actions and performs these. The operator is contacted in case of uncertainty about the interpretation of the situation
AL 6: Full autonomy. Overall decisions on navigation and operation are calculated by the system. Consequences and risks are calculated. The system acts based on its analyses and calculations of its own capability and the surrounding's reaction. Knowledge about the surroundings and previous and typical events are included at a "machine intelligence" level.

図 2-4 Autonomous level of Lloyd Registers

また、ノルウェー産業科学技術研究所(SINTEF)は、自律化レベルを Operator independence, Complexity, Automation の 3 軸に分解し、表 2-3 のように自律化レベルを定義している[14]。

表 2-3 SINTEF の自律化レベルの定義[14]

Level	Operator independence	Automation	Complexity
0	Crew at bridge at all times	None: Direct control by human	Few static obstacles
1	Periodically unmanned bridge monitored by shore control that can muster crew on ship	Guidance to operator, no automatic control	Many static obstacles
2	Unmanned ship, continuous shore monitoring and control	Human supervises, automatic and deterministic control using simple set-points	Some movements of obstacles, no restriction on ship maneuverability
3	Periodically unmanned bridge with no shore monitoring, crew on ship mustered by system	Fully automatic and deterministic longer and more complicated control sequences	Some movements of obstacles, some restriction on maneuverability
4	Unmanned with shore monitoring, shore takes control when needed	Constrained autonomy – several, but restricted options selected by ship control system	Many movements, some restrictions maneuverability
5	Unmanned, no shore monitoring or control	Fully autonomous – no restrictions on decisions by system	Many movements, significant restrictions on maneuverability

また、NFAS[12]は Operational autonomy level と bridge manning level という 2 つの観点から自律化レベルを定義している。

Operational autonomy levels	Bridge manning levels
Decision Support: This corresponds to today's and tomorrow's advanced ship types with relatively advanced anti-collision radars (ARPA), electronic chart systems and common automation systems like autopilot or track pilots. The crew is still in direct command of ship operations and continuously supervises all operations. This level normally corresponds to "no autonomy".	Manned bridge: For AAB and PUB, when bridge is manned. This is the "trivial" case where most current rules and regulations are expected to apply.
Automatic: The ship has more advanced automation systems that can complete certain demanding operations without human interaction, e.g. dynamic positioning or automatic berthing. The operation follows a pre-programmed sequence and will request human intervention if any unexpected events occur or when the operation completes. The shore control center (SCC) or the bridge crew is always available to intervene and initiate remote or direct control when needed.	Unmanned bridge - crew on board: For PUB, when bridge is unmanned. One critical issue in this case is that mustering the crew to the bridge will take some time and the ship may need some autonomy both for the unmanned operation as well as during the mustering.
Constrained autonomous: The ship can operate fully automatic in most situations and has a predefined selection of options for solving commonly encountered problems, e.g. collision avoidance. It has defined limits to the options it can use to solve problems, e.g. maximum deviation from planned track or arrival time. It will call on human operators to intervene if continuously supervises the operations and will take immediate control when requested to by the system. Otherwise, the system will be expected to operate safely by itself	Unmanned bridge, no crew on ship: For PUS and CUS. This is the new situation where the ship may need some autonomy, also to handle connection problems in the case of direct remote control.
Fully autonomous: The ship handles all situations by itself. This implies that one will not have an SCC or any bridge personnel at all. This may be a realistic alternative for operations over short distances and in very controlled environments. However, and in a shorter time perspective, this is an unlikely scenario as it implies very high complexity in ship systems and correspondingly high risks for malfunctions and loss of system.	-

図 2-5 Autonomy level of NFAS[12]

また NFAS では、この Autonomy level に応じて各船舶の種類を決定している。

	Manned bridge	Unmanned bridge – crew on board	Unmanned bridge – no crew on board
Decision support	Direct control No autonomy	Remote control	Remote control
Automatic	Automatic bridge	Automatic ship	Automatic ship
Constrained autonomous	-	Constrained autonomous	Constrained autonomous
Fully autonomous	-	-	Fully autonomous

図 2-6 Ship autonomy types[12]

2.3.3 自律船のリスクアセスメントに関する研究

Rødseth ら[15]は、MUNIN の自律船設計アプローチについて解説し、自律船実現において考えられるシナリオとリスクを明らかにしている。MUNIN は、IMO によって推奨されている Formal Safety Analysis(FSA)を一部導入した、図 1 のような手法により自律船の設計を行っている。

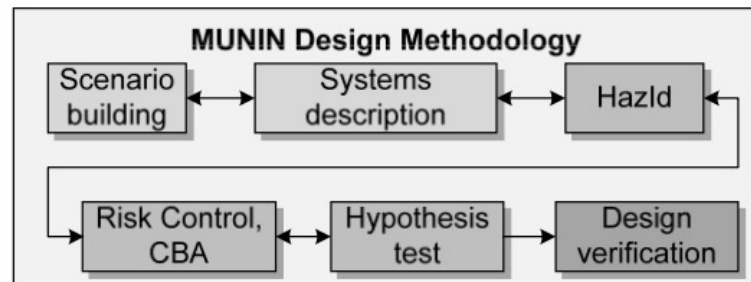


Figure 2. MUNIN Design process

図 2-7 MUNIN のデザイン方法[15]

また、65 通りの考えられるリスクを明らかにし、致命的なものとして以下の 5 つのリスクとその対処法を述べている(図 2-8)。「1. 他船との遭遇、衝突回避」、「2. 中小型船の発見、分類のミス」、「3. 視界不良下における物体認識のミス」、「4. 推進機器の故障」、「5. 悪天候下における航海」。

Table 2. Major risk control options

Hzd	Risk control
1	Avoid heavy traffic Object detection and classification Deep sea navigation module SCC and VHF communication with ships
2	Improved maintenance routines Improved condition monitoring Redundancy in propulsion (water jet)
3	Radar and AIS integrated in object detection SCC notification when in doubt
4	Weather routing SCC indirect control
5	FLIR camera and high resolution CCTV SCC notification when in doubt

図 2-8 考えられるリスクとその対処法[15]

2.3.4 自律船と自動運転車

Rolls-Royce が 2016 年に発表した資料[7]において、自律船と自動運転車との差異が述

べられている。本資料によれば、状況認識をセンサー等を通して行い、地図と比較し現在の位置を把握し、指示・避航動作をとる、というおおまかな流れは自律船、自動運転車ともに共通している。自動運転車と異なる点としては、船は 360 度全方位に動くことができる点、天候や海域の状態など環境による影響が大きい点、柔軟に止まったり曲がったりすることができず時間を要する点が述べられている。

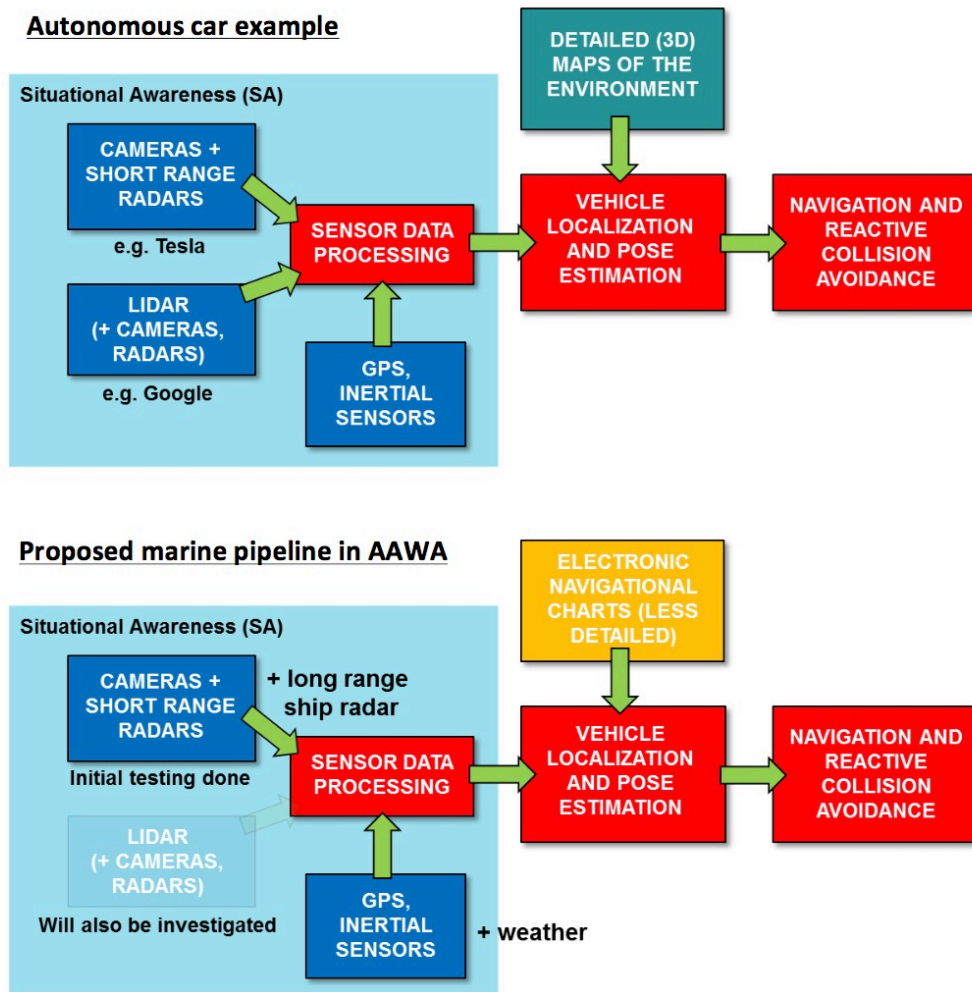


Figure 1. Comparison between automotive and marine navigation pipelines.

図 2-9 自律船と自動運転車との比較[7]

2.3.5 自律船の設計に関する研究

AAWA は Autonomous Navigation System(ANS)を提唱している[7]。図 2-10 にその構造を示す。航路計画モジュール、状況認識モジュール、衝突回避モジュール、船体状態把握モジュールという 4 つのモジュールをもつ。

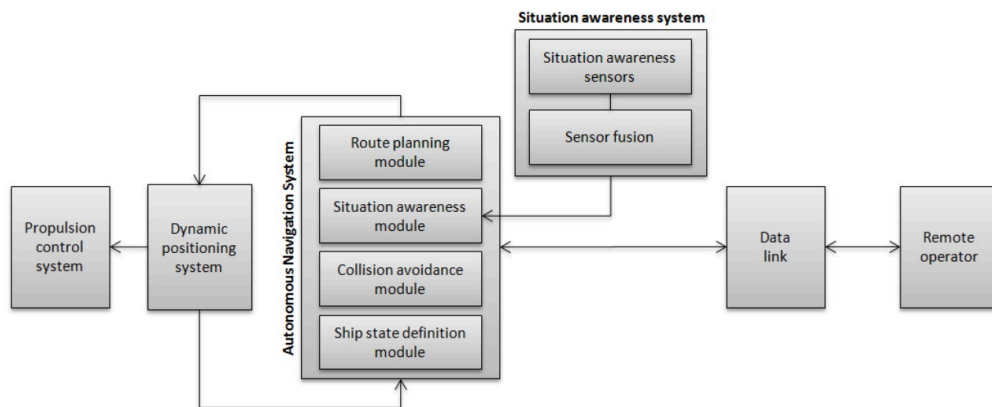


Figure 2. Autonomous Navigation System (ANS) architecture.

図 2-10 Autonomous Navigation System[7]

また SAE J3016[16]は、Operational Design Domain (ODD)というコンセプトを提唱している。これは、システムにおいて、制御すべき機能をコントロールし監視することができる手法の全ての解空間を意味する。つまり、システムは ODD で定義したよりも複雑な事象に対処することは不可能である。ここで Dynamic Navigation Task (DNT)というコンセプトが定義されており、船舶の自律化システムまたは人間によって制御・遂行されるべき全ての処理・作業の総和を指す。図 2-11 は、DNT と ODD の関係を示したものである。Automatic DNT とは自律化システムに割り当てられる作業である。Operator Exclusive DNT とは、Operator を必要としない作業である。船舶の運航は常に ODD の条件下で行われるとは限らない。ODD の範囲を超えた例外事象が、運航中に起こる場合もあり、このような事象を処理するために DNT Fallback が定義される。DNT Fallback は陸上のオペレータによって処理される。

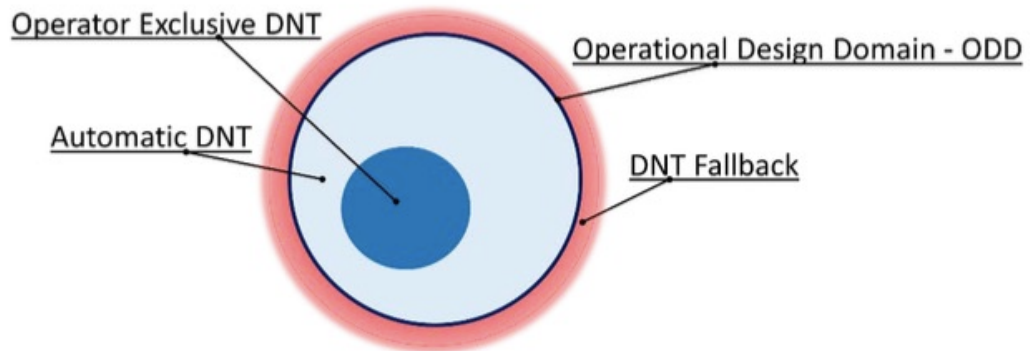


図 2-11 Illustration of relationships between ODD, DNT and DNT Fallback[12]

2.3.6 自律船の機能の分解に関する研究

MUNIN は自律船の機能を 10 の大きなグループと 40 の小さなグループとに分解している。その内訳を表 2-4 に示す。”Use”の列はその機能がどの対象に対して適用可能かを示す。US(Unmanned ship)なら自律船、SCC は Shore Control Center(2.4.4.5 に詳細)、n/a なら自律船に適用不可能であることを示す。

表 2-4 MUNIN Main function groups and sub-groups[12]

Main group	Sub-group	Use	Description
1. Voyage			
1.1	Plan	SCC	Create and maintain a voyage plan based on instructions from shore and known sailing constraints, including planning for port calls and other events.
1.2	Nautical information	SCC	Keep track of information related to voyage, nautical publications, weather forecasts, tide tables, port instructions, legislative documents etc.
1.3	Location	US	Determine where the ship is and where it is moving in relationship to its voyage plan.
1.4	Economize	US	Monitor and assess the Operational and economical parameters of a voyage, including fuel consumption, late arrivals etc. Determine corrective measures.
2. Sailing			
2.1	Maneuvers	US	Control the ship during passage to compensate for external conditions, including weather, traffic regulations, other objects. May also include dynamic positioning.
2.2	Interactions	US	Manage direct interactions with other ships, pilot boats, tugs, berths, locks etc.
2.3	Nautical communication	US	Communicate with other ships and shore, e.g., reporting areas or VTS. Including updates to MetOcean.
2.4	Anti-collision	US	Detect and avoid other objects in the vicinity that may be a danger to the ship. Use COLREGS where applicable.
2.5	Anti-grounding	US	Avoid groundings by keeping to safe channels with sufficient air and sea draft and sufficient distance to land.
3. Observations			
3.1	Weather	US	Assessment of weather related environmental factors that can impact the ability to execute voyage plan and to manoeuvre, including, e.g., icing and ice.
3.2	Visibility	US	Assessment of factors that impact the possibilities to detect other ships, objects, waves, land, aids to navigation etc. Also linked to anti-collision functions.
3.3	Objects	US	Detect and observe objects that are important for other ships and services, such as dangerous floating objects, life saving devices, signal flares, man over board etc.
4. Safety / emergencies			
4.1	Safety communication	US	Monitor GMDSS, communicate with ships in distress. Send emergency messages; communicate with MRCC and ships, EPIRBS, portable radios.
4.2	Onboard communication	n/a	Public Announcement (PA), General Alarm (GA), UHF radios.
4.3	Emergency	n/a	Distress team, response groups, fire-fighting, smoke divers, first aid etc. Includes man

	management		over board (MOB)
4.4	Emergency preparedness	n/a	Drills, training, maintain hospital, fire prevention, fire patrols, life saving devices, escape routes, lifeboats etc.
4.5	Technical safety	US	Fire detection, fire doors and dampers, watertight doors, extinguishing systems.
4.6	AOS	n/a	Assistance other ships or persons in distress.
5. Security			
5.1	ISPS	US	Monitor access to ship and interactions with entities that can endanger ship's ISPS status.
5.2	Onboard security	US	Access control for crew and passengers, network firewalls and data protection etc.
5.3	Antipiracy	US	Monitor and control attempts to board or otherwise interfere with ship operations.
6. Crew / Passenger			
6.1	Passengers	n/a	Monitor and manage passengers on-board and services for these.
6.2	Life support	n/a	Maintain good working and living conditions for the crew and passengers. Ventilation, heating, AC, black/grey water, drinking water, supplies etc.
7. Cargo / stability / strength			
7.1	Stability	US	Detect dangers and maintain ship stability and trim. Operate stabilizers, use ballast systems.
7.2	Integrity	US	Observe and maintain water and weather integrity of ship, including ship strength and damage integrity. Monitor and operate hatches and doors.
7.3	Load and discharge	n/a	Monitor and manage the loading, stowage, securing and unloading of cargoes.
7.4	Bunker management	US	Monitor and manage bunkers and bunker tanks.
7.5	Cargo condition	US	Observe and control cargo condition for safe transport during passage.
7.6	Pollution prevention	US	Observe and control cargo and ship supplies to avoid and manage discharges and possible pollution, including ballast water handling. Handle dangerous or noxious substances safely.
8. Technical			
8.1	Environment	US	Monitor and optimize ships environmental impacts from energy systems and hull in terms of emissions to sea or air including, when applicable, sound emissions.
8.2	Propulsion	US	Maintain propulsive functions and efficiency based on available power from engines.

8.3	Main energy	US	Produce required energy on shafts to propeller and generators.
8.4	Electric	US	Convert and distribute electrical power from generators and other systems.
8.5	Auxiliary	US	Control and manage boilers, incinerators and other technical systems not covered elsewhere.
8.6	Hull equipment	US	Access, anchoring, lifting, ladders etc.
9. Special ship function			
9.1	Other	n/a	Must be expanded for special ships, e.g., offshore intervention, tugs, dredgers, cable layers etc.
10. Administrative			
10.1	Operational communication	SCC	Communicate with ship owner, charterer, cargo owner, ports and agents, weather routing companies or others that may send instructions to ship or require status updates. Including port logs, noon at sea and other reports.
10.2	Manning	SCC	Consider the number of, tasks for and working ability of ship crew (STCW)
10.3	Logs	US	Keeping mandatory logs on actions taken on board.
10.4	Mandatory reporting	SCC	Send mandatory reports to ship reporting systems, port state authorities, ports or other entities.
10.5	Documents	SCC	Keep non-nautical ship documents updated: Certificates, ISM documents, manuals ...

2.4 自律船の要素技術に関する研究

運転行動は、「認知・判断・操作」の3つの段階から成り立っていると言われる[17]。ここではそれらの段階に沿い、自律船実現時に関連が深いと考えられる技術を紹介する。また、運転時以外においても自律船に関して必要とされる技術についても説明する。

2.4.1 周囲の環境の把握・認識(認知)

2.4.1.1 Radar

船舶の運航において Radar は古くから用いられてきた。Radar は自ら電波を発射し、その反射波をとらえることで、海上の他船やブイ、鳥などの物標をとらえることが可能である。波長の短いマイクロ波を使用するため、キャッチした物標までの距離と方位を正確に測定すること

ができる[18]。

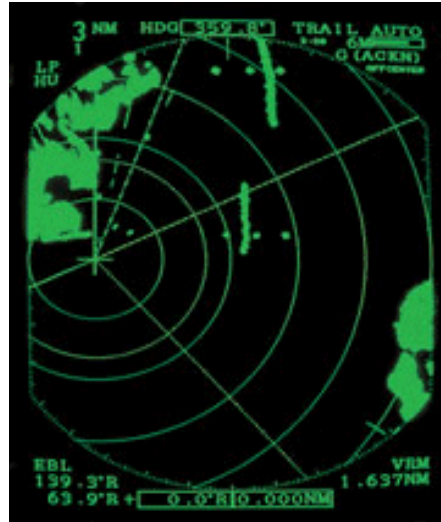


図 2-12 Radar の画面[18]

しかしながら、Radar には天候や海象などの影響により誤差が発生する。船首尾方向と正横に誤差を分割し、AIS データと比較した場合に、最大で船首尾方向に 30.7m の誤差が発生するという報告も存在する[19]。対象とする船舶の大きさや、海域の状況により誤差は変化するが、高い安全性が求められる幅員海域などにおいてはより高性能な Radar を開発する必要があるといえる。

自動運転車の研究においては Ka バンドと W バンドを使用した新たな Radar が開発されており、この Radar は自律船においても有効だと考えられている。この Radar は、特に近距離の物体の感知・認識に優れており、角度と距離について既存の船舶用 Radar よりも、高精度で物体の感知・認識が可能である[20]。

2.4.1.2 LIDAR

LIDAR(Light Detection And Ranging)は、光を用いたリモートセンシング技術であり、より精度の高い測定を可能にする。ASV: Autonomous Surface Vessel において、LIDAR は他船との衝突回避などのために、障害物との距離を正確に測定するセンサーとして研究が行われている[21][22]。図 2-13 は 3D レーザスキャナ(Velodyne HDL-64E)で、トリマラン船を含む停泊中のボート、ヨット、パワーボートを撮影したものとカメラで撮影したものとの比較である。レーザスキャナの計測結果より、船種が容易に判別できることがわかる。またおよそ 90m の距離にある遠距離のボートでも鮮明ではないが、計測は可能であった。

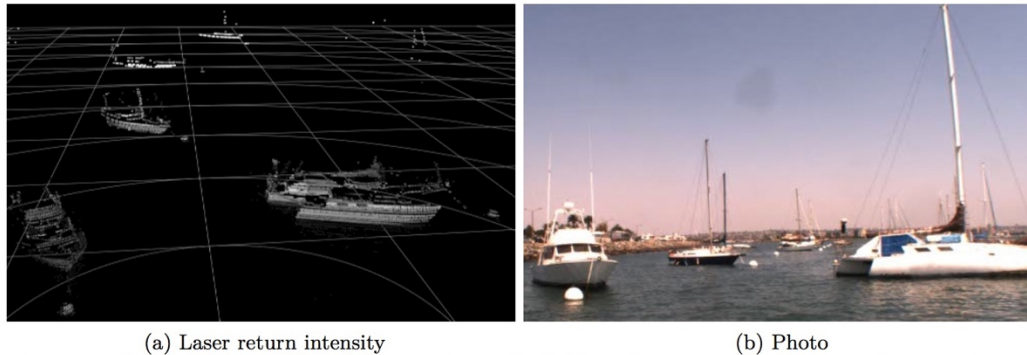


Figure 1: Intensity imaging quality of moored boats including trimaran sailboat, power boat, and mono-hull sailboats.

図 2-13 3D レーザスキャナとの比較[22]

2.4.1.3 カメラ

見張りを代用するものとして、カメラを使用することが検討されている。しかしながら、一般のカメラは夜間や霧などの悪天候による視界不良に弱い。そこで監視カメラなどに使用されている NIR(Near-Infrared: 近赤外線)センサーや、より高性能で真夜中でも画像を取得できる LWIR(Long Wave Infrared Range: 長波長赤外線)センサーを搭載したカメラの使用が検討されている。LWIR 領域に存在する赤外線はすべての物体から放射されるため、画像の取得が容易であり、一般に認識が難しいと言われる昼間においても、物体認識が可能な画像の取得が可能である(図 2-5)。その中でも Microbolometer-based LWIR と呼ばれるセンサーを搭載したカメラが、低温冷却を必要としないためもっとも現実的であるが、高解像度のセンサーは高価であるという問題がある[7]

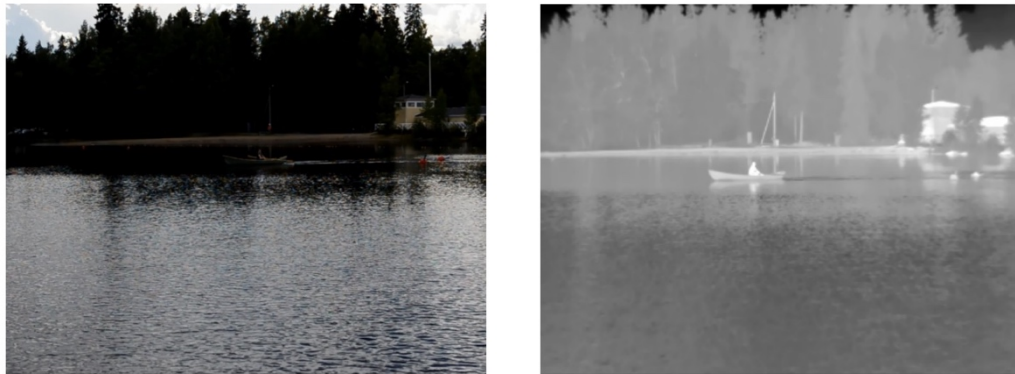


Figure 3. Daylight Scene captured with a normal camera and a thermal camera.

図 2-14 Camera

近年では、無人飛行機分野において、赤外線カメラに使用するセンサーとして SWIR(Short Wave Infrared Range)センサーと言われるものについて研究と応用が進められている[23]。無人飛行機においては、デジタルカメラや赤外線カメラが広く使用されてきた。SWIR は霧やもやなどに強いが、完全な暗闇では使用できないという特徴がある。

2.4.1.4 AIS

AIS(Automatic Identification System: 船舶自動識別装置)とは、船舶同士が安全に航海できるよう国際 VHF を利用して船舶を自動識別する装置である。

AIS の運用の目的は(1)船舶を識別すること、(2)目標物の追跡を支援すること、(3)航海情報の交換を容易にすること、(4)衝突防止に役立つ情報を提供すること、(5)無線電話による船舶通報を減らすことである[24]。

AIS で伝達可能な情報は静的な情報、動的な情報、航海に関する情報、安全を担保するためのショートメッセージの 4 つに分けられる[25]。その詳細は以下である。

【静的な情報】

MMSI(海上移動業務識別コード)

船舶の名称

船舶の種類(客船、タンカー、etc...)

船長とビーム

位置情報を送信するアンテナ(GPS や DGPS)の位置

【動的な情報】

誤差を含んだ船舶の位置(例: 最低でも 10m のズレ)

UTC でのタイムスタンプ

地表針路: Course over ground(COG)

対地速度: Speed over ground(SOG)

方位

操作状況(例: 操作不可能な状態、喫水による制限を受けている状態)

回頭速度: Rate of turn

ヒール角

ピッチとロール

【航海に関する情報】

喫水

荷物の種類

目的地と予想到着時間

予定航海経路とウェイポイント

乗組員の数

【安全を担保するためのショートメッセージ】

別のウィンドウに航海上の安全を担保するために、テキストでのショートメッセージが表示される

AIS の通達距離はおよそ 20NM(37km)である。VHF 電波は遠距離への伝播が期待できないため、使用エリアは限られている。日本の AIS は東京湾内をはじめとして、房総から駿河湾までをカバーしている。

2008 年 7 月 1 日以降、300 総トン以上の国際航海する船舶、500 総トン以上の非国際航海の船舶、国際航海の全旅客船について AIS の搭載が義務付けられている。すべての船舶に AIS が搭載されている訳ではないため、AIS だけから周囲の状況を把握することは危険である。また、海上自衛隊の護衛艦や海上保安庁の巡視船は、職務遂行時には AIS を停止していることが多い。また操業中の大型漁船が漁場の秘密を保持するために AIS を停止することも可能である。このようなことから、AIS により表示されている位置と実際の位置が異なることもありうる。

2.4.1.5 ECDIS

ECDIS(Electronic Chart Display and information System: 電子海図情報装置)は、ENC(Electronic Navigational Chart: 航海用電子海図)の海図データを読み込み、そのデータを航海センサーからの位置・針路・速力等の情報とともに表示する航海情報システムである。ECDIS の構成要素を下図に示す。ENC の海図データは、コンピュータに読み込まれ、ECDIS 内部の機械言語フォーマット SENC(System Electronic Navigational Chart)に変換され、画面上に表示される。

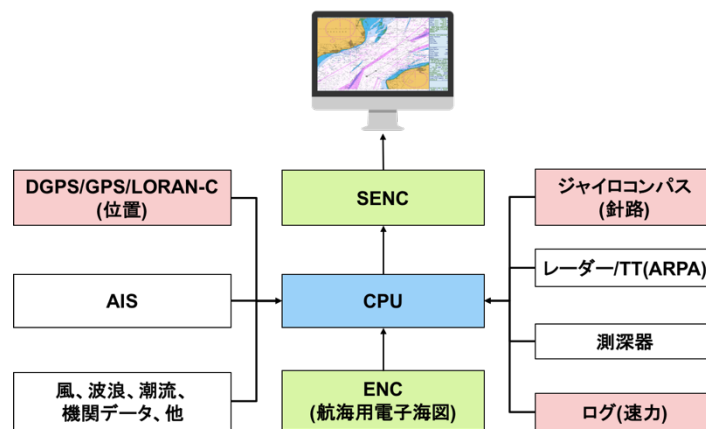


図 2-15 ECDIS の構成要素([26]より著者が作成)

2012 年から 2018 年にかけて、国際航海に従事する 500 トン以上の旅客船、3000 トン以上のタンカー、貨物船に対し段階的に ECDIS の搭載が義務化されている。ECDIS は紙海図に比べ、以下のような利点がある[26]。

1. 常に自船の船位・針路・速力が表示される
2. レーダー映像、ターゲット・トラッキング、AIS などの情報を重畳表示できる
3. 状況に応じて、様々な海図情報を表示/非表示できる
4. 船位に応じて SENC が自動的に選択されるので、手動で SENC を切り替える必要がない
5. 昼・夜・薄明時に応じた表示モードがあるので、船橋の前面に ECDIS を設置して航海当直が可能である
6. 航路計画において、設定した航路幅の中に危険物があれば警告表示が出されるので、安全な航路が計画できる
7. 航行監視において、前方監視エリアと安全等深線等を設定することにより、座礁予防が

できる

8. アップデート CD のデータを読み込ませるだけで、SENC の改補が自動的に行える

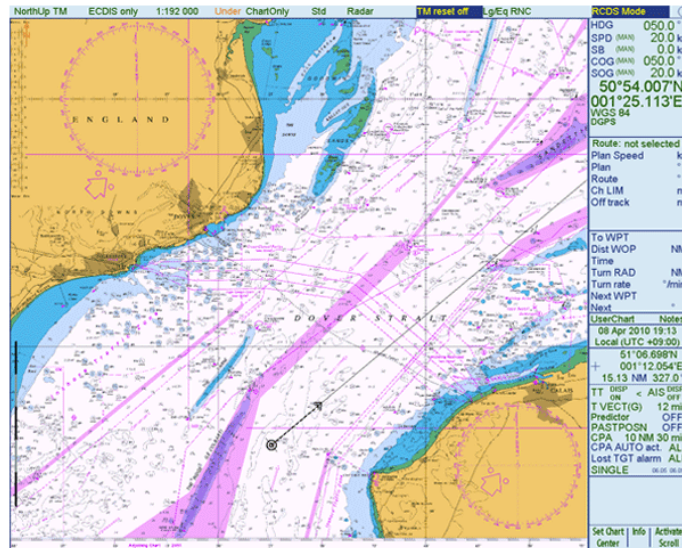


図 2-16 ECDIS のディスプレイ表示[27]

2.4.1.6 センサーの組み合わせ

各センサーはそれぞれにメリットとデメリットをもつ。例えば、レーダーは距離情報は測定できるが、空間情報を取得することはできない。カメラは物体の色や形の認識には優れているが、距離の測定には不向きである。図 2-17 は各センサーの比較である[7]。自律船を設計するためには各センサーの得意な部分と不得意な部分を把握し、うまく組み合わせることが必要不可欠である。

Table 1. Comparison of different marine SA sensors.

	Visual HD cameras	IR cameras	Ship radar	Short-range radar	LIDAR	Sound
Spatial Accuracy	++	+	--	-	++	--
Field of view	+	-	++	-	+	++
Distance measurement	-	-	++	++	++	--
Object identification	++	+	--	--	+	+
24H, all weather operation	--	+	++	++	+(?)	-(?)
Computational load of analysis	--	-	++	++	--	+
Marine robustness	++	++	++	+(?)	(?)	(?)
Price	++	-	+-	++	--	+

図 2-17 センサーの組み合わせ[7]

2.4.2 状況に応じた動作の判断(判断)

2.4.2.1 避航時の判断

避航操船の判断の指標として、最接近点(Closest Point of Approach: CPA)による方法が最も有名である[28]。最接近距離(Distance of Closest Point of Approach: DCPA)と最接近点に至るまでの時間(Time of Closest Point of Approach: TCPA)を判断基準として用いる。CPA とは自船と他船の 2 隻の船舶が存在した時に、現在の方角で現在の速度のまま進行した時に、もっとも近づく点のことである。自船からみた他船の相対速度を V_r とした時、TCPA と DCPA を表現したものを図 2-18 に示す。TCPA と DCPA が小さければ小さいほど、衝突の危険性が大きく、避航の必要性が生じる。

この TCPA・DCPA は避航の判断となる指標であるが、どの程度小さければ、避航すべきかはわからない。そこで、TCPA・DCPA における避航基準を Fuzzy 推論により求める方法[28]やエキスパートシステムにより事前に決定しておく方法[29]が知られている。

また近年では、相手船による妨害ゾーン(OZT)による避航操船の方法[30]などが提案されている。

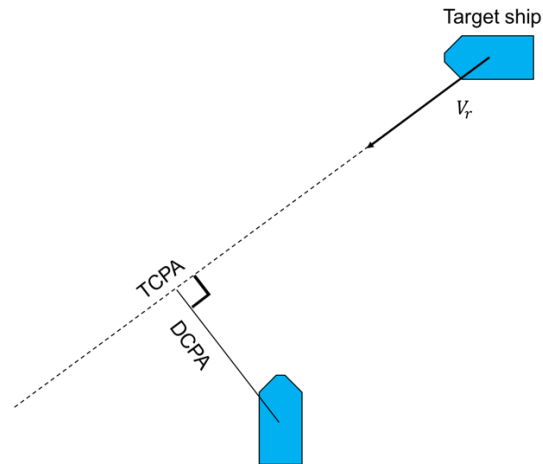


図 2-18 TCPA・DCPA について

2.4.2.2 ウェザールーティング

ウェザールーティング (Weather Routing: WR) とは、船舶が航海中に遭遇する気象や海象を予測し、船舶の状態や性能、到着時間などを考慮して、安全性・快適性・燃料消費量・最短航海時間などの項目一つあるいはそれらの組み合わせられた評価基準により最適な航路を設定することである[31]。ウェザールーティングは、ダイクストラ法などを用いて最短時間経路問題を解くことにより、実現される。正確なルーティングのためには、高精度の船舶の性能推定や、気象・海象・海流データの高精度な収集・予測が必要になる。

2.4.3 実際の操作(操作)

2.4.3.1 オートパイロット

システムの制御は一般に大きく分けて、1. システムの出力をあらかじめ与えた一定の目標値に一致させる制御法を求めるレギュレータ問題と 2. 目標値が変化する場合において目標値に正確に追従する制御法を求めるトラッキング問題がある[32]。船舶の制御システムにおいては、船首方位を希望する針路に保持させる自動針路制御システム(Autopilot System)や、主機関のプロペラの速度を一定にする調速(ガバナ)システム(Governor System)が前者のレギュレータ問題にあたる。後者のトラッキングシステムとしては与えた航路に沿って船舶を移動させる航路追従システム(Ship's Tracking System、トラッキング制御)がある。

自動操舵装置(オートパイロット: Autopilot)は Sperry 社、Anschütz 社が開発し、1980 年代までは PID 制御が用いられてきた。今日においては、粒子フィルタやカルマンフィルタによる

制御方法が主流になってきている。また GPS や AIS をはじめとする情報機器の進歩により位置情報を得ることが簡単になり、オートパイロットも発展している。

田丸ら[33]は、船内の計測機器により計測されたデータ、AIS、GPS 情報を用いた船舶のトラッキング制御を提案している。船舶の運動を野本の一次系モデル、いわゆる KT モデルにより近似し、最適レギュレータを用いて制御問題を解き、東京海洋大学練習船汐路丸において実験を行なっている。実験の結果、GPS 情報のみを使用した場合は、1~2sec の間隔で信号を受信できるが、船首方位の情報を得ることができないため制御が不安定となる場面があった。AIS 情報を使用した場合は、より詳細な情報が取得できるため制御の精度は上昇するが、AIS 情報の不連続性のために、実航海で運用するにはまだ問題があると結論づけている。

2.4.4 運転時以外に必要とされる技術

2.4.4.1 船体構造モニタリング

船舶は 20~30 年という長期間において運航されるために、船体において経年劣化が生じる。経年劣化の結果、船体に生じる損傷・破損は運動性能を損なうのみならず、重大な事故につながる恐れがある。このような損傷の早期発見のための手段として船体構造モニタリングが注目されている。日本海事協会(ClassNK)は疲労センサを開発した[34]。疲労センサを船体構造の部材に一定期間貼付することで、蓄積された疲労損傷度を読み取り、部材の疲労寿命を求めることができる。また、平成 28 年に、国土交通省によって、船体構造モニタリングは「海事産業の生産性革命(i-shipping)の推進に向けた先進船舶技術研究開発支援事業」に選定されているため、今後開発がさらに進められると予想される。

2.4.4.2 船用機器モニタリング

従来、船用機器の交換は定期交換によって行われて来た。しかしながら、船用機器の寿命の見積もりに大きな不確実性が備わっているために、その交換の時期が早すぎたり、遅すぎたりすることが多々あった。そのため、船用機器をモニタリングし、適切な交換時期を把握・予測するという試みが行われるようになった[35]。Manno ら[36]は統計データを用いて、主機が重大な事故の原因となる故障の最も大きな要因であることを明らかにしている。そのため主機には一般に、温度計・圧力計・振動測定器などのセンサーが取り付けられ、モニタリングが行われている。加えて、その他の推進系のシステム、ギヤや軸受、プロペラなどにもコンディ

ションモニタリングの範囲は広げられている。

コンディションモニタリングの手法は、Manno ら[37]によれば、**model-based Approach** と **data-driven Approach** に区分できると言われている。**model-based Approach** は物理モデルに従って、故障を予測する手法である。**data-driven Approach** は、過去の故障データを収集しパターン認識やニューラルネットワークなどの手法を用いて、故障を予測する手法である。**model-based Approach** と比較して、物理モデルを作成する必要がないため、物理現象を数式化できない複雑なシステムなどへの応用が可能である。

DNV-GL は **Real-Time Risk Based Approach** というコンセプトを提案している[35]。そのイメージを図 2-19 に示す。システムレベルにおいて個別の機器の信頼性とリスクを、運航中に即時に計算し、修理・修正する必要のある機器を順位付けして、リアルタイムに導出するアプローチである。

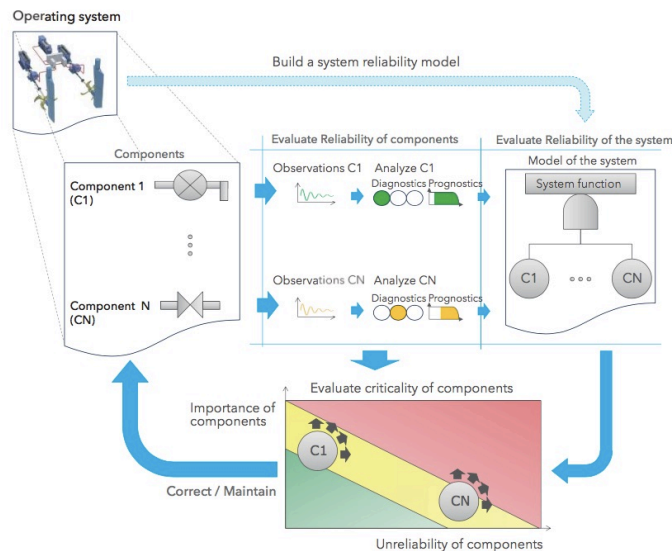


図 2-19 Real-Time Based Approach のコンセプトイメージ[35]

ClassNK は、ビッグデータを用いて船用機器の自動異常診断、自動状態診断、トラブルシュートを行う船内完結型システムである「ClassNK CMAX LC-A」と機器データだけでなく気象データとも結びつけ主機の異常診断を行う「ClassNK CMAX e-GICSX」が開発されている[38]。ここではニューラルネットワークや異常検知技術が用いられている。

2.4.4.3 荷役作業の自動化・遠隔化

IoT の活用による荷役作業の自動化について、海事産業全体として研究・開発が進められ

ている[39]。名古屋港埠頭株式会社は、日本で初めて自動化コンテナターミナルを開発した[40]。船舶に積み込むコンテナをトラックで輸送し、トラックはインゲートを通る。受付を済ませ、荷役レーンへの進入をセンサーで確認すると、作業員が遠隔操作室より、リアルタイム画像データを確認しながら荷役作業を行う。荷役作業が終わると、その後の荷物の荷役エリアから保管エリアへの移動は自動運転によって行われる。荷役作業時には、災害が多く、省人化によって、現場で働く作業員の安全性が向上することが予想される。

2.4.4.4 大容量ネットワーク

自律船の開発に向けて、大容量ネットワークの必要性が指摘されている[41]。現在の洋上における通信速度は陸上の固定回線と比較して 1/10~1/数百程度と低速であり[42]、ストリーミング動画などを見ることができない。今後は自律船の実現に向けて、遠隔からの船舶の画像による監視などの作業が予想されており、現在のネットワーク速度では支障をきたすことが考えられる。そのため、洋上通信で主に使われる既存の L バンド(1.6/1.5GHz)の海事衛星通信に加え、新たに Ka バンド(30/20GHz)のものを開発・実用化することや、その組み合わせを検討することが行われている。

2.4.4.5 Shore Control Center(SCC)

MUNIN や AAWA は、陸上から自律船をコントロールする設備: Shore Control Center(SCC)が必要だと述べている。SCC は自律船が自動運航できなくなった際のバックアップとして機能する。つまり、海上交通量が多く複雑なため判断が難しい状況や、視界不良などによる安全航行が難しい環境において SCC は機能する。具体的には VHF による指示や、船橋の状況認知・判断、燃料の管理、コンディションモニタリングとメンテナンス計画の作成などである。

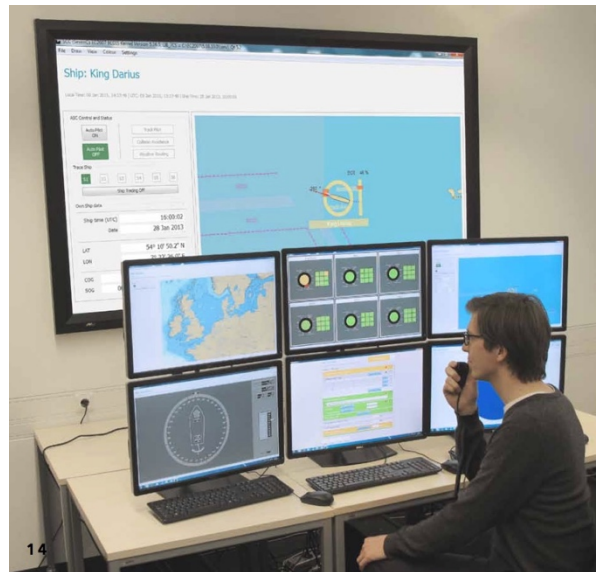


図 2-20 SCC のイメージ図[8]

2.5 自律船に関する法制度についての研究・調査

2.5.1 現在の海上法の概要

海上法(Maritime law)は、船舶やその運航に関する規定を定めた法律やそれに準ずるものの総称である。現在の海上法は、適用する地域やその内容に従い、表 2-5 のように分類できる[7]。

UNCLOS(United Nations Convention on the Law of the Sea: 海洋法に関する国際連合条約)は、領海、接続水域、排他的経済水域、環境保全などに関する包括的な制度を規定したものである。この条約下では、“ships”と“vessels”という2種類の船舶に関する用語が用いられているが、条約ではこの2つに関して明確な定義はない。また、船舶の自律化に関して、船員がいる・いないに関する船舶の定義は存在しない。今後は自律船や無人船が“ships”または“vessels”、どちらの категорияに分類されるのか、また新たなカテゴリーを定義する必要があるのか焦点になってくる。

表 2-5 Summary of the different layers and substantive branches of maritime law[7]

	Jurisdictional rules (main target: states)	Technical req. and standards (main target: flag states)	Private law issues (shipowner and other commercial partners)	Other rules (Criminal, social, commercial, public law etc)
Global(UN)	UNCLOS			
Global (IMO&ILO)		SOLAS, MARPOL, STCW, COLREGS, MLC		
Global(IMO, UNCITRAL, CMI, etc.)			Private law conventions on e.g. liability, limitation, arrest, carriage of goods, salvage, etc.	
European Union		Ship safety directives & regulations Limitations on exemptions	Product liability rules, insurance requirements Rules on competent jurisdiction and applicable law	Several issues covered by EU Treaty & legislation
Nordic states			Nordic Maritime Codes, Nordic marine insurance terms	The entire legislation applies a priori for ships flying its flag

2.5.2 IMO の動向

IMO(International Maritime Organization)によって 2017 年 6 月に開催された MSC98 において、デンマーク・エストニア・フィンランド・日本・オランダ・ノルウェー・韓国・イギリス・アメリカの合同の提案により自律船について検討を開始することが合意された[43]。審議の結果、初期段階の検討作業として、自律船の定義及び自律化レベルを検討することと、既存の要件について自律船に適用される要件と適用されない要件に分類することが合意された。しかしながら、具体的な内容についてはまだ詰められていない。今後は人間系と機械系の共存する洋上で、どのようにその関係性を考慮していくかが、問題の焦点になってくると述べている。

2.5.3 自律船実現に向けて考えるべき事項

Hooydonk[44]は自律船実現に向けて、考えるべき法制度について言及している。彼が提言しているものは次の通りである。

- 自律船・無人船は船舶に分類されるか
- 自律船・無人船は旗国に結びついているべきか
- 船員・操縦士に関する法律は現状とどう変わるか
- 自律船に関する責任問題

第3章 Systems Approach のツール

3.1 SYSTEMS APPROACH と SYSTEM THINKING	37
3.2 FORM, FUNCTION, NEEDS, INTENT, CONCEPT.....	37
3.3 ILITY	38
3.4 STAKEHOLDER VALUE NETWORK.....	38
3.5 OBJECT PROCESS METHODOLOGY	40
3.5.1 Object Process Methodology とは	40
3.5.2 OPM の書き方について	42
3.6 MORPHOLOGICAL MATRIX.....	43
3.6.1 Morphological Matrix とは	43
3.6.2 MM における制約の表現	45
3.6.3 MM を用いた定量的評価	45
3.6.4 MM の作成と評価軸の選定について	46
3.7 ツールの組み合わせに関する研究	47
3.8 本研究の位置付け	48

3.1 Systems Approach と System thinking

初めに、“System”の定義について述べる。System について Crawley らは[45]、“*A system is a set of entities and their relationships, whose functionality is greater than the sum of the individual entities.*”と定義している。つまり、集合になった時に、単一のものを集めたものよりも、その機能が大きくなっていることが重要である。

System thinking について Crawley らは[45]、“*System thinking is, quite simply, thinking about a question, circumstance, or problem explicitly as a system – a set of interrelated entities. System thinking is not thinking systematically.*”と定義している。

Systems Approach について中野は[5]、社会科学の分野で発展した考え方であり、複雑性のある問題に対して事象全体をシステムとして認識することで問題解決を図る方法論のことと述べている。

以上から、本研究では Systems Approach について、System thinking とそれに基づくツールの集合と定義することにする。具体的には以下のツール・考え方を指す。

- Form, Function, Needs, Intent, Concept
- ility
- Stakeholder Value Network
- Object Process Methodology
- Morphological Matrix

3.2 Form, Function, Needs, Intent, Concept

以下は Crawley らの定義である[45]。

Form とは、System において物理的、または情報的に存在する事物である。Form とは状態を持つ場合があり、その状態の遷移は Function によって達成される。Form は Function を実現するための道具である。Form は別の Form や Form 同士の関係を包含する場合がある。Form は Function が実行される前に存在している。例) 冷蔵庫、ガラス、法律

Function とは、パフォーマンスに影響を及ぼす、行動、操作、変換を指す。設計された System において、Function は System が存在するために行われるものであり、究極的には価値の達成、便益の実現を目指している。Function は Form により実現される。Function は Function 同士の繋がりや関係性から生まれることがある。例) 冷やす、移動する、消費する

Needs とは、「必要性、要求、不足しているものへの望み」と定義される。Needs は受益者が (潜在的に)持っている要求であり、曖昧にまたは一般的な言葉により表現される。Needs は受益者によって、表現されない、または認知されない場合もある。Needs はサービスの提供者が持っているものではなく、サービスの受益者が持っていることに注意する。

Intent とは、便益を表現するための変数の定義と、(対象の変数を変化させる)変換プロセスである。変数については Solution-neutral operand、変換プロセスについては Solution-neutral function で表現される。具体的にはポンプというシステムがあった場合、Solution-neutral operand は「流体」、Solution-neutral function は「移動させること」である。Solution-neutral operand として「水」や「海水」などを選択すべきではない。また Solution-neutral function として「気圧変化による移動」や「電力による移動」など具体的な解法を指定した Function を選択すべきではない。

Concept とは、Function を Form に変換する、考え方・理念である。本研究の「コンセプト設計」とは Function を実現する Form として何をどのように選べば良いかという意味で用いる。

本節で説明した Form、Function、Needs、Intent、Concept は、後の 3.5 で説明する Object Process Methodology を使用する際のデザインパターンとして用いる。具体的な使用方法については第 4 章で解説する。

3.3 ility

以下は de Weck らの定義である[46]。

ility とは、System に要求される非機能要件である。例として、Flexibility や Maintainability などが挙げられ、“ility”という接尾語で終わることが多いことから、このように名付けられた。非機能要件とは、System が果たすべき機能を達成したあとで発生する、その System の付加価値を向上させる要件である。

3.4 Stakeholder Value Network

初めに、Stakeholder について Freeman[47]は“any group or individual who can affect or is affected by the achievement of the organization’s objectives”と定義している。Stakeholder Value Network (以下 SVN) はその Stakeholder と Stakeholder 間の Value の流れを明示的に図示したものである。図 3-1 に示すように各 Stakeholder を長方形として図示し、

Stakeholder 間の価値の流れを矢印として表現したものである。

Sutherland[48]は Qualitative な SVN と Quantitative な SVN の 2 種類を説明・提案している。本節では Qualitative な SVN について述べる。

SVN を作成する目的について、以下の二つが挙げられる[48]。

1. ディスカッションや文献調査を通して、各 Stakeholder のゴール・目的・ニーズを明確することで、Stakeholder について理解を深める
2. 各 Stakeholder の詳細なインプットとアウトプットを記述することで、全 Stakeholder に関係する重要な関係性を明らかにする

SVN の作成手順は以下の 5 ステップを経る。

1. Stakeholder の認識
2. SVN への Stakeholder のマッピングと可視化
3. Stakeholder の目的、Needs の探索
4. Stakeholder 間の関係、Value の流れの把握
5. SVN への Value の流れのマッピング

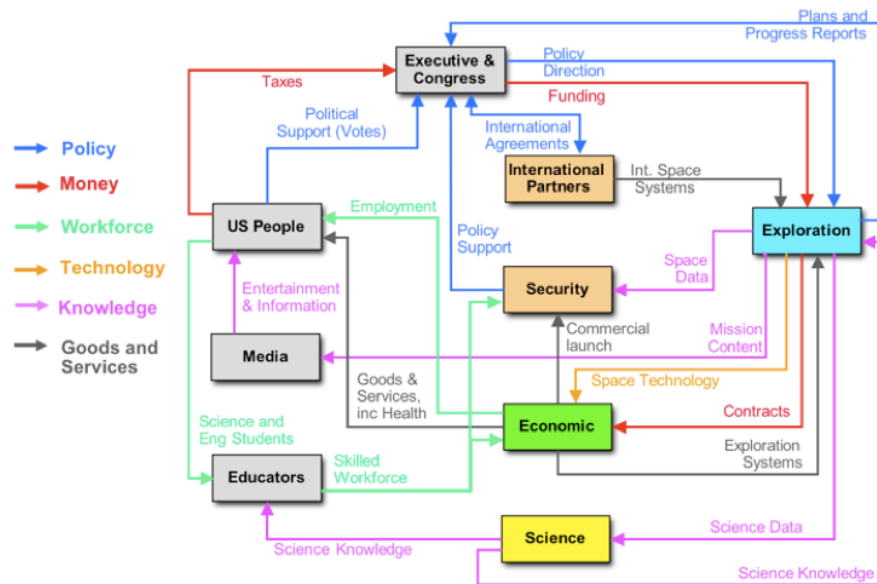


図 3-1 SVN の例[48]

3.5 Object Process Methodology

3.5.1 Object Process Methodology とは

Object Process Methodology (OPM) は、イスラエル工科大学の Dori らによって考案された[49]、システムの概念モデリングに優れた言語である。図 3-2 で示すように、OPM は物事を長方形の Object と楕円の Process で表現する。

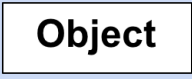

Name	Symbol	Description
Object		物理的、または情報的に存在する事物。状態をもつ。
Process		Objectを変化させる表現。Processのみでは存在せず、必ず一つまたはそれ以上のObjectと結びつく。

図 3-2 Object と Process

Object 間、Process 間、Object と Process 間の関係性はリンクで表現される。Structual link について図 3-3 に示した。左側の黒塗りの三角形のリンクは、集合と要素を表現するリンクである。右側の白塗りの三角形のリンクは、一般化と具体化を表現するリンクである。中央花壇の白塗りの三角形の中に黒塗りの三角形が内包されるリンクは、事物と特徴を表現するリンクである。また、Procdural enabling link について図 3-4 に示した。左側は Agent link であり、Process の実行者と Process をつなぐ。右側は Instrument link であり、Process で用いる道具と Process をつなぐ。また、Proceduaral transforming links については図 3-5 に示した。左から Comsumption link、Result link、Effect link である。Consumption link は消費されるものを矢印の出発点に書き、消費行動を矢印の終着点に書く。Result link は生み出す行動を矢印の出発点に書き、生み出された結果を矢印の終着点に書く。Effect link は相互に影響を及ぼすことを表現する。

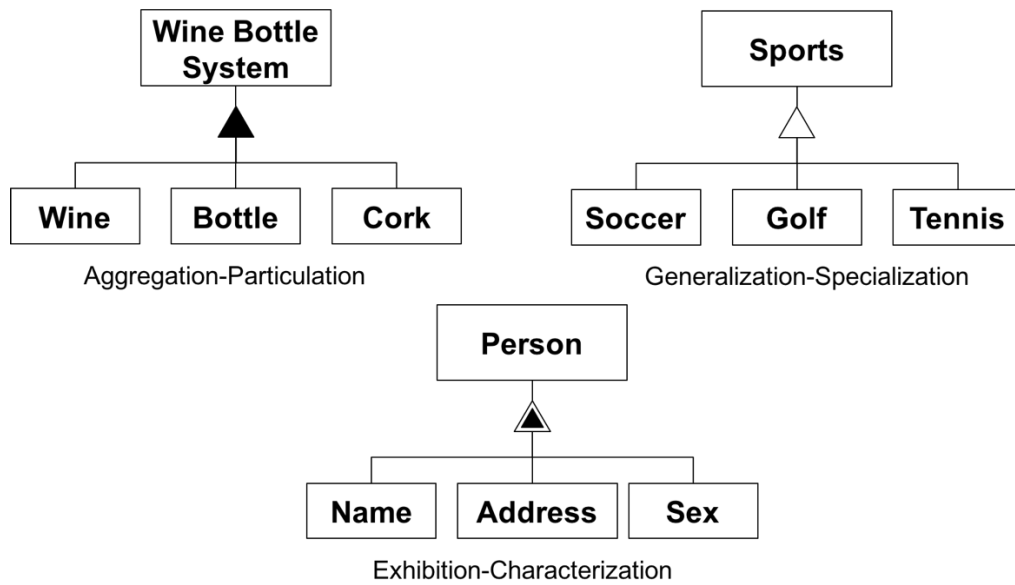


図 3-3 OPM structural links

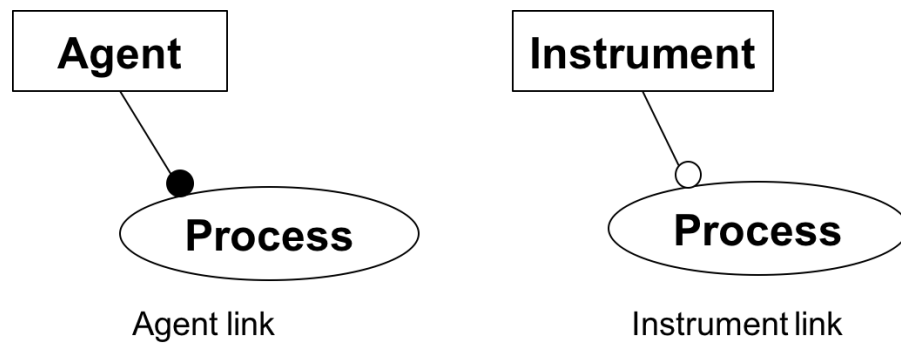


図 3-4 OPM procedural enabling link

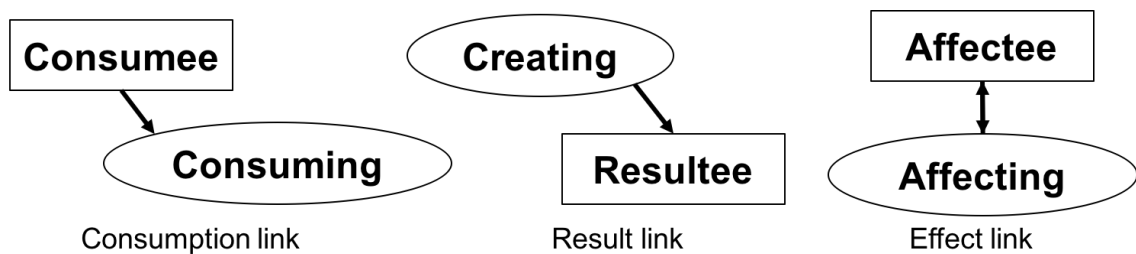


図 3-5 OPM procedural transforming link

3.5.2 OPM の書き方について

OPM の書き方については、属人性が大きい。また OPM でどこまでシステムを細かく記述するかという粒度についても曖昧さがある。2017 年冬に、東京大学新領域創成科学研究科において、海事産業で働く従業員を集めてワークショップを行った。そのワークショップにおいて、OPM を用いて海運サービスについて分析を行った。1 チームあたり海事産業の従業員 1 名と学生 3~4 名で構成され、約 2 時間かけてモデリングを行った。図 3-6、図 3-7 にある Team1 と Team2 が作成した OPM について示す。図から見て取れるように、同じシステムを対象としているにもかかわらず、その書き方は大きく異なる。まず、Team1 は Transporting、Stowing、Sailing、Communicating という Process をまず記入し、それらに対して関連する Object を記入している。一方、Team2 は Transporting を中心に、その機能の分解を行なっている。Team1 と異なり、Exhibition-Characterization link を使っていることも特徴である。

この OPM の書き方については第 4 章において、より深く議論を行うこととする。

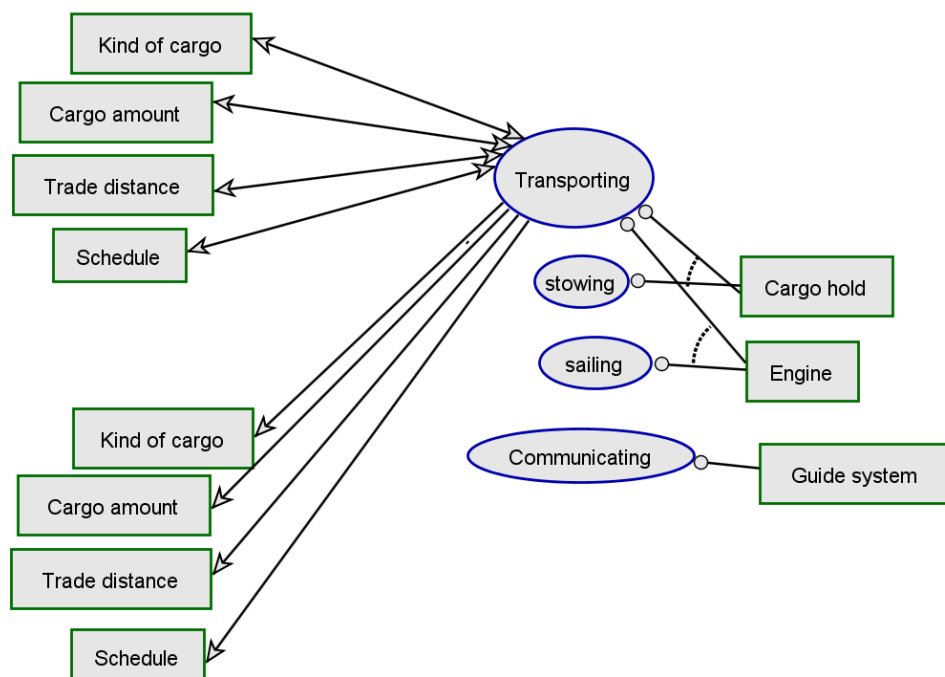


図 3-6 Team1 の海運サービスの分析

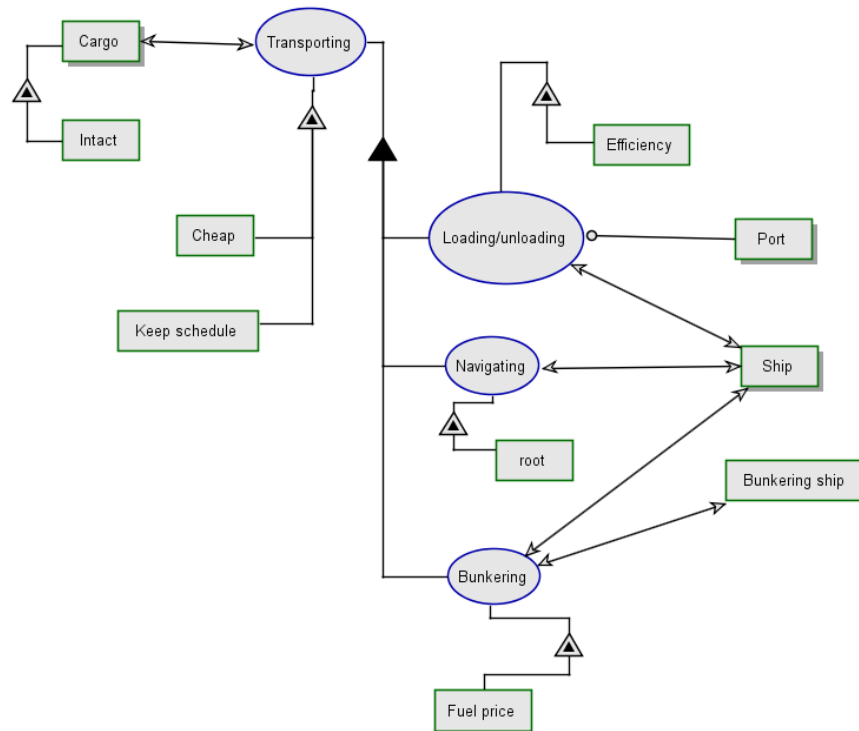


図 3-7 Team2 の海運サービスの分析

3.6 Morphological Matrix

3.6.1 Morphological Matrix とは

Morphological Matrix (MM)とは、マトリクス形式で意思決定項目を図示する手法であり、Zwicky[50]が初めに定義した。以降、Pahl[51]や Buede[52]などによって一般的な手法として広められた。意思決定項目は些細なものまで含めると膨大な数になる上に、些細な意思決定項目は重要な意思決定項目に大きく左右される。よって MM に記述する意思決定項目は Architectural Decision である必要がある。Architectural Decision とは[45]、最も重要な意思決定項目の集合であり、Form に変化を及ぼすような意思決定項目である。Architectural Decision は、システムのパフォーマンスに影響を与え、コストを強く決定する。

図 3-8 に NASA の Apollo project における MM の例を示す[45]。行は意思決定項目を表現し、選択肢は alt A、alt B で表現される。例では意思決定の選択肢は 2 つであるが、3

つでも4つでも幾つでも構わない。Apollo project における一つの設計案は、各行において一つの意味決定項目を選択することによって得られる。よって図 3-8 の場合には、 $2^5 = 32$ 通りの設計案が存在することになる。

また図 3-9 に意味決定項目を図として解説したものを掲載した。EOR は地球の外周上で宇宙船のランデブーを行うか否かという意味決定を指す。ランデブーとは宇宙空間において2機以上の宇宙船、または宇宙ステーションが速度を合わせ、同一の軌道を飛行し、互いに接近する操作のことである。earthLaunch は宇宙船が一度地球の外周を周回してから月に向けて出発するのか、それとも直接出発するのかという意味決定を指す。LOR は月の外周上で宇宙船のランデブーを行うか否かという意味決定を指す。moonArrival は月面への着陸時に、一度月の外周を周回するのか、それとも直接着陸するのかという意味決定を指す。moonDeparture は離陸時に、一度月の外周を周回するのか、それとも直接地球に向けて出発するのかという意味決定を指す。

shortID	Decision	alt A	alt B
EOR	Earth Orbit Rendezvous	no	yes
earthLaunch	Earth Launch Type	orbit	direct
LOR	Lunar Orbit Rendezvous	no	yes
moonArrival	Arrival At Moon	orbit	direct
moonDeparture	Departure From Moon	orbit	direct

図 3-8 Apollo project の MM[45]

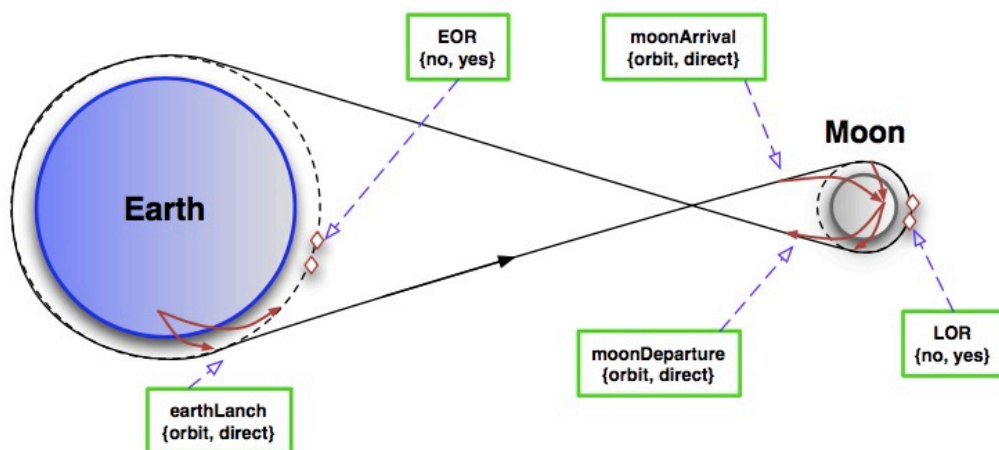


図 3-9 Apollo project における意味決定項目のマッピング[45]

3.6.2 MM における制約の表現

図 3-8 の MM について、各意思決定項目は独立ではなく、互いに制約条件を持つ場合がある。制約の表現に用いる記号について表 3-1 に示す。また、その記号を用いて図 3-8 の MM についての制約を記述したものを図 3-10 に示す。図 3-10 からわかるように、重要な意思決定項目は LOR である。LOR が yes ならば、月への離着陸(moonArrival と moonDeparture)は直接行(直接)ことは不可能である。

表 3-1 Syntax of logical constraints[6]

symbol	definition	symbol	definition
==	logical equivalence	>	logical greater than
	logical or	<	logical less than
&&	logical and	>=	logical greater than or equal to
!=	logical not equal	<=	logical less than or equal to

Id	Name	Scope	Equation
a	EORconstraint	EOR, earthLaunch	(EOR==yes && earthLaunch==orbit) (EOR==no)
b	LORconstraint	LOR<moonArrival	(LOR==yes && moonArrival==orbit) (LOR==no)
c	moonLeaving	LOR, moonDeparture	(LOR==yes && moonDeparture==orbit) (LOR==no)

図 3-10 Apollo project の constraint[45]

3.6.3 MM を用いた定量的評価

図 3-8 の MM は 32 通りの設計案をもつ(正確には制約条件によってとることのできない設計案があるため実際は 32 より少ない)。この設計案を定量的に評価するためには、評価軸と計算方法を決定する必要がある。決定された評価軸ごとに各セルに特性値を入力し、設計案ごとに総和・総積する手法が Simmons[6]により提案されている。

図 3-11 に、評価軸として Metrics A と Metrics B を選定し、MM の特性値を付与したものを示す。type の欄は計算方法を示している。add の場合は総和し、mult の場合は総積をす

る。例として、全ての意思決定項目において alt A を選択した場合、その設計案における Metrics A, B の値はそれぞれ式(3.1)(3.2)のように計算される。

$$\text{Value of Metrics A} = 1 + 2 + 0 + 5 + 1 = 9 \quad (3.1)$$

$$\text{Value of Metrics B} = 0.98 * 0.95 * 0.88 * 0.96 * 0.99 = 0.778 \dots \quad (3.2)$$

CAT	shortID	Decision	type	alt A	alt B
decision	EOR	Earth Orbit Rendezvous	none	no	yes
prop	Metrics A		add	1	5
prop	Metrics B		mult	0.98	0.91
decision	earthLaunch	Earth Launch Type	none	orbit	direct
prop	Metrics A		add	2	3
prop	Metrics B		mult	0.95	0.98
decision	LOR	Lunar Orbit Rendezvous	none	no	yes
prop	Metrics A		add	0	4
prop	Metrics B		mult	0.88	0.90
decision	moonArrival	Arrival At Moon	none	orbit	direct
prop	Metrics A		add	5	2
prop	Metrics B		mult	0.96	0.95
decision	moonDeparture	Departure From Moon	none	orbit	direct
prop	Metrics A		add	1	2
prop	Metrics B		mult	0.99	0.98

図 3-11 MM の特性値の設定

3.6.4 MM の作成と評価軸の選定について

MM を作成する作業においては、問題領域の把握と意思決定者がコントロールできる領域の把握を必要とする。そして Architectural Decision のみを抽出しなければならない。よって MM の作成自体が難しく、その困難さは Ritchey によっても指摘されている[53]。

Crawley らは MM の作成と評価軸の選定について、3 つのヒューリスティックな方法を用いる手段を提案している[45]。1 つ目のヒューリスティックな方法は、「注意深く設計領域を設定すること」。2 つ目は、「評価軸に対し、大きく影響を及ぼすような意思決定項目を選択すること。もしくは意思決定項目に対し、大きく影響を及ぼすような評価軸を選定すること」。3 つ目は「Architectual decision(設計において Form を変えるような意思決定)のみを選択すること」

である。

3.7 ツールの組み合わせに関する研究

Hiekata らは、高齢者の見守りサービス設計を対象として、SVN と MM を組み合わせた手法を提案している[54]。図 3-12 に提案手法の概要図を示す。見守りを依頼する人 (Subject)、状態を観察する人 (Watcher)、見守られる人 (Target) の「見守り三者モデル」についての検討を MM を用いて行った。MM の設計案ごとに特性値を設定し、各設計案についてパレート最適解を計算することにより、優れた見守りサービスの設計案を算出している。この MM を作る際に、事前に SVN を作成することで、Subject や Watcher を特定することができる。また SVN を参考にしながら、特性値を設定するとしている。

しかしながら、この手法は MM における意思決定が Stakeholder の選択に関連するものであれば、有効であるが、それ以外のケースには対応できない。

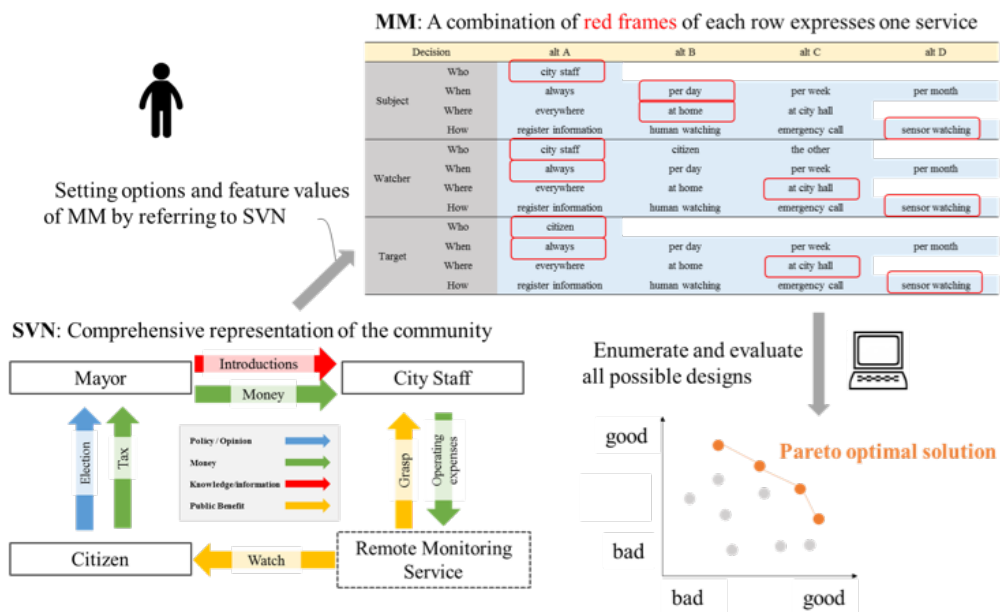


図 3-12 Hiekata らの提案手法の概要図[54]

3.8 本研究の位置付け

本章では、本研究で用いる Systems Approach の定義と、Systems Approach のツールまたその組み合わせに関する研究について説明した。

Systems Approach を用いて、設計問題を解く際には、設計者が適切なツールを組み合わせ、問題を解ける形に整形する必要がある。この作業は非常に難しく、MM を作成する際にどの意思決定項目を考慮するかという点などで、属人性が高く経験に依拠している。3.7 に示した研究はその問題に取り組んだ例であるが、これを自律船のコンセプト設計問題にそのまま適用することはできない。これを踏まえ、本研究では自律船の設計に適用できるように、修正を行う。

また、第 2 章で示したように、すでに MUNIN や ReVolt などの自律船のコンセプトが存在する。しかしながら、自律船に要求する性能が海事クラスター内の利害関係者ごとに異なるため、MUNIN や ReVolt のコンセプトは必ずしも適切ではない可能性がある。以上を踏まえ、本研究の新規性は以下である。

- Systems Approach を用いて自律船の設計問題を解けるように修正する
- 海事クラスター内の利害関係者に応じた自律船の設計

第4章 自律船の設計フロー

4.1 概要	50
4.2 利害関係者の分析と評価軸の選定	51
4.2.1 利害関係者の分析	51
4.2.2 評価軸の選定	52
4.3 OPM による既存船舶の機能の分析	52
4.4 MM の作成	53
4.5 評価軸に対応した評価値の計算	54
4.6 パレート最適解の計算	54

4.1 概要

自律船のコンセプト設計は複雑な問題である。この問題を解くには、幅広い領域の問題を考慮する必要がある。例えば、自律化による既存船舶システムの変更は予測できない影響を海事関係者の利害関係者に及ぼす。このような影響は、期待される便益を損なう恐れがある。このような問題は、技術システムと社会システムが融合した **Sociotechnical System** という文脈において発生している。

本研究においては、**Systems Approach** を用いて **Sociotechnical System** を解くことを考える。先行研究[6][54]を参考に、自律船のコンセプト設計に使えるように修正する。具体的なツールとしては **SVN**、**OPM**、**MM** を用いる。

図 4-1 は自律船設計フローの概要図である。自律船設計フローは 5 つの段階をもつ。

1. 利害関係者の分析と評価軸の選定
2. OPM による既存船舶の機能の分析
3. MM の作成
4. 評価軸に対応した評価値の計算
5. パレート最適解の計算

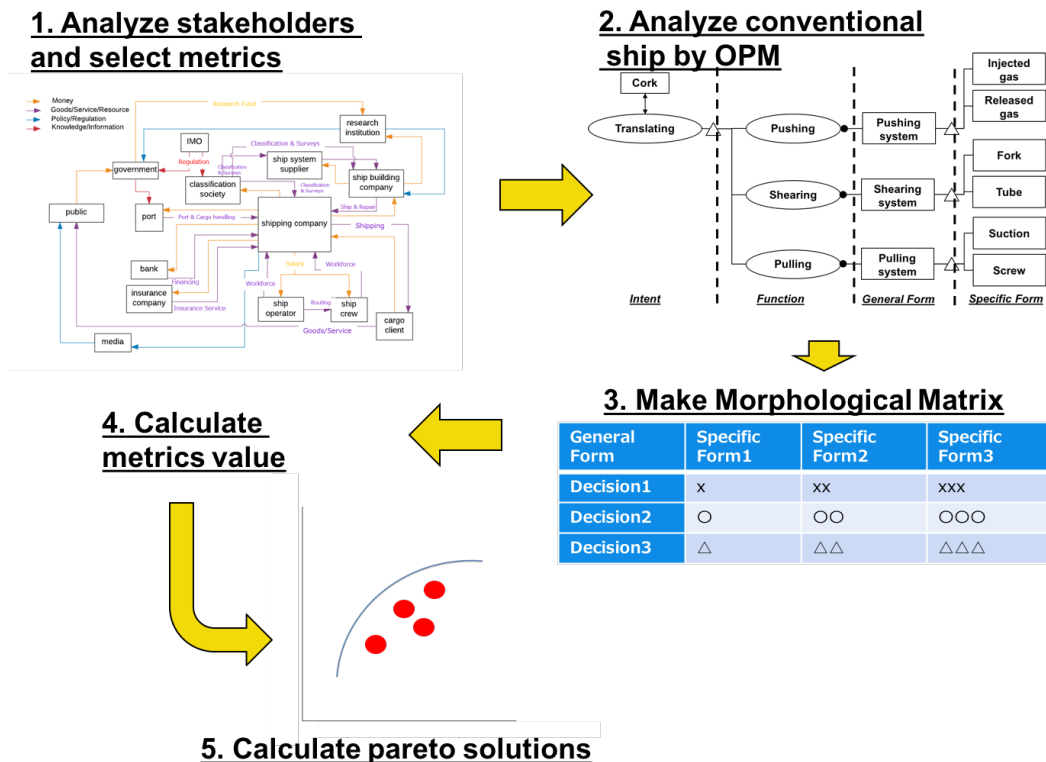


図 4-1 自律船設計フローの概要図

4.2 利害関係者の分析と評価軸の選定

第一段階は、二つのステップをもつ。利害関係者の分析と評価軸の選定である。この段階のアウトプットは、対象とする海事関係者のニーズとそのニーズの達成度を測るための評価軸である。

4.2.1 利害関係者の分析

第一のステップは、自律船に関する利害関係者を SVN を用いて分析することである。自律船プロジェクトは幅広い利害関係者に影響を与える。各利害関係者はそれぞれに異なるニーズを持ち、いくつかのニーズは各利害関係者において共通するが、共通しないものも存在する。またいくつかのニーズは自律船により達成可能であるが、達成不可能なもの、また自律船により阻害されるニーズもある。このようなニーズは、各利害関係者について暗黙的・ま

たは経験的に把握されることが多く、ニーズの共有は省略されがちであった。そのため、各利害関係者で認識の齟齬が生じることがあった。

そこで本研究では SVN を用いて、自律船に関わる利害関係者とその周りの価値の流れ(ニーズ)を可視化する。可視化することにより、利害関係者とニーズを明確化する。その後、本研究が対象とする、自律船に関する意思決定者、第一受益者、意思決定者に関わる一次的な利害関係者を決定する。意思決定者を決定することで、意思決定者がコントロールできる範囲に応じて自律船の設計領域が決定できる。第一受益者を決定することで自律船プロジェクトがどのニーズに対して貢献するのかを決定できる。意思決定者に関わる一次的な利害関係者を決定することで、自律船プロジェクトを各利害関係者の観点から分析することを可能にする。

4.2.2 評価軸の選定

第二のステップは、第一受益者のニーズや意思決定者に関わる一次的な利害関係者のニーズから設計した自律船を評価するための評価軸を決定することである。評価軸の決定では、3.3 で説明した”ility”という概念を採用する。このステップでは各ニーズの達成度を評価するための ility を列挙し、その ility の中より、評価軸として相応しいものを選定する。

4.3 OPM による既存船舶の機能の分析

第二段階は OPM を用いて既存船舶の機能を分析する。OPM の書き方は Crawley ら[45]の表現を参考にし、MM の作成が容易になるよう修正した。

自律船が寄与するニーズを Intent として記述し、その Intent を達成するための Function を文献やインタビューなどを通して書き下す。次に、各 Function を実行するための General Form を記述し、その General Form としてどの Specific Form を選ぶべきかを次節で作成する MM において考える。

図 4-2 は Pump システムの例である[45]。Crawley らによれば、Process と Object は Intent, Function, General Form, Specific Form に分割が可能である。この書き方では、Form を一般的な General Form と具体的な Specific Form に分割して表す。Pump システムの Intent は”moving fluid”であり、これは”Pressurizing”, “Accelerator”, “Displacing”, “Blowing”などの Function からある一つを選択することで達成可能である。各 Function は、それぞれにその

Function を達成するエージェント (General Form) を持っており、“Pump”や“Fun”などが考えられる。General Form は“Centrifugal pump”のような一つの Specific Form を選択することにより達成できる。

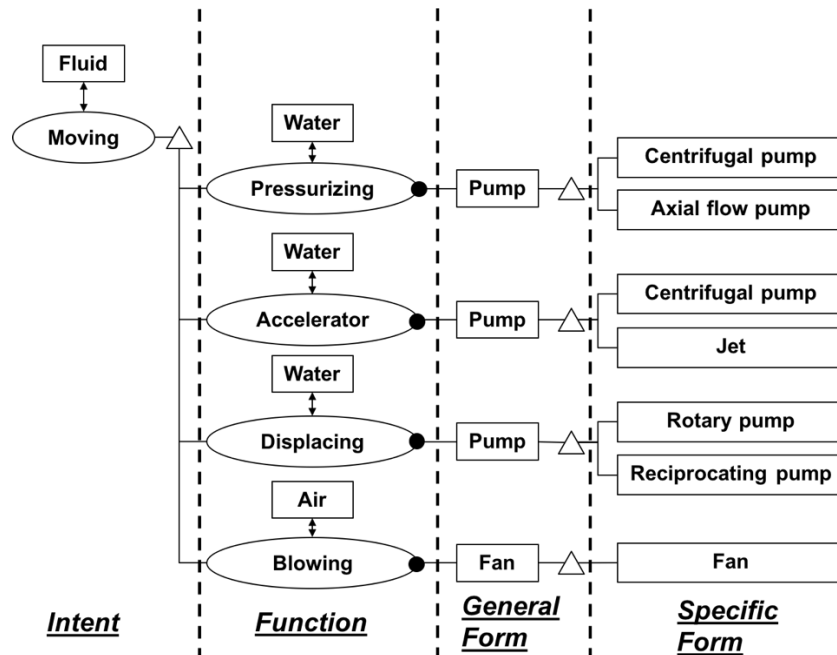


図 4-2 OPM の例[45]

4.4 MM の作成

第三段階は、意思決定事項をマトリクス形式で網羅的に表現できるMMを用いて表現することである。この段階でのアウトプットは自律船の設計案の候補を表現したMMである。MMを作成することは、一見簡単そうに見えるが、その作業は難しく、Ritcheyら[53]によっても指摘されている。そこで、本研究では4.3で作成した既存船舶のOPMによるモデリング結果を用いる。自律船の設計問題について、図4-3に示すように、各General Formとして、どのSpecific Formを選択するかという問題に置き換える。MMの各行において一つのSpecific Formを選択すれば良い。自律船の設計案の候補は図の場合 $3^3 = 27$ 通りの候補をもつ。

GF	SF1	SF2	SF3
GF1	x	xx	xxx
GF2	○	○○	○○○
GF3	△	△△	△△△

図 4-3 作成する MM (GF は General Form、SF は Specific Form を表す)

4.5 評価軸に対応した評価値の計算

第四段階は、評価軸に対応した評価値の計算である。評価軸は、「1. 利害関係者の分析と評価軸の選定」で選定した評価軸を用いる。評価値の計算にはいくつかの方法が考えられる。3.6.3 に記述したように、MM の各セルに評価値を設定し、全ての行において評価値を総和、または総乗するののも一つの計算方法である。また、より正確な計算結果を算出したい場合には、評価軸に従ってシミュレータを作成し、シミュレータを使って評価値を計算することも可能である。本段階では、選定した評価軸に適切な計算方法を用いて評価値を計算する。

4.6 パレート最適解の計算

第五段階は各設計案の候補について、評価軸に沿ってパレート最適解を算出することである。パレート最適解とは、評価値のいずれかを改善しようとした時に、他の評価値が改悪される解のことである。図 4-4 に評価軸が 2 軸の場合の各設計案をプロットしたもののイメージを示す。

パレート最適解の計算の仕方について説明する。総数 N の設計案があるとし、評価軸の数は n 軸とする。その時のデータ構造を図 4-5 に示す。例えば、 v_{1_1} は設計案の ID1 の評価軸 1 の値を表す。まず、ID1 がパレート最適解であるかどうかについて考える。 v_{1_1} を基準とし、ID1 を除いた全ての設計案において Metrics 1 の値が、 v_{1_1} よりも優れている設計案を抽出し、リストとして保存する。次にそのリストから v_{1_2} を基準とし、リスト内の設計案において Metrics 2 の値が、 v_{1_2} よりも優れている設計案を抽出し、新たにリストとして保存する。この作業を全ての n 軸の評価軸で繰り返す。結果として、保存されたリストが空ならば、ID1 はパレート最適である。空でなければ、ID1 はパレート最適ではない。これを総数 N の設計案で繰り返す。つまりは、評価値のいずれかを改善しようとした時に、他の評価値が改悪される解を

探している。

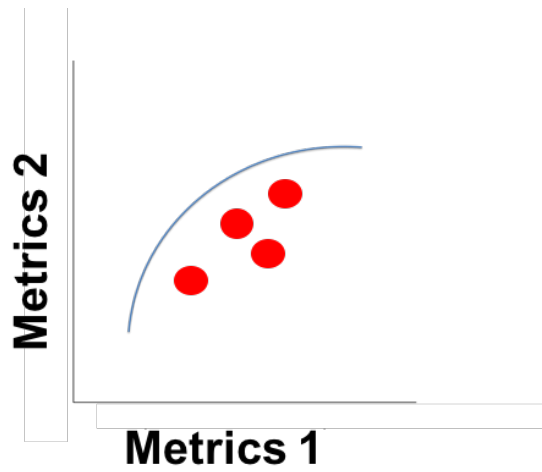


図 4-4 設計案のプロットイメージ（評価軸が 2 軸の場合）

ID	Metrics 1	...	Metrics n
1	v_1_1	...	v_1_n
...
N	v_N_1	...	v_N_n

図 4-5 各設計案のデータ構造

第5章 ケーススタディ

5.1 はじめに.....	57
5.2 利害関係者の分析と評価軸の選定	57
5.2.1 利害関係者の分析	57
5.2.2 評価軸の選定.....	60
5.3 OPM による既存船舶の機能の分析	63
5.4 MM の作成	65
5.5 評価軸に対応した評価値の計算.....	67
5.5.1 Economy の計算	67
5.5.2 Operational safety の計算	69
5.5.3 Reliability ・ Flexibility ・ Uncertainty ・ Modularity ・ Maintainability の 計算	71
5.6 パレート最適解の計算	72
5.6.1 海運会社の場合	73
5.6.2 造船会社の場合	74
5.6.3 船級協会の場合	75
5.6.4 港湾局の場合	78
5.6.5 保険会社の場合	79
5.6.6 船用機器メーカーの場合	81
5.6.7 まとめ	82

5.1 はじめに

ケーススタディは自律船の設計フローで示した 5 つの段階に従って行う。ケーススタディの目的は提案するフローを用いて自律船の設計について、著者らが考察した一例を示すことにより、提案する設計フローを用いて自律船が設計できるかを確認することである。対象とする船舶は SR108 コンテナ船である。

5.2 利害関係者の分析と評価軸の選定

5.2.1 利害関係者の分析

第一のステップは利害関係者の分析である。

稗方ら[55]の作成した SVN や、海事関係の研究者、海運会社・造船会社・船級協会の従業員との議論を参考に、自律船プロジェクトの利害関係者となりうる存在を図 5-1 に列挙した。これは粒度や業界などを考えず、考えられるものを挙げた。

海運会社	荷主	メディア	警察
船長	エネルギー企業	大学	海上自衛隊
船員	自動車会社	民間研究機関	航空会社
事務員	商社	政府研究機関	傭船社
船主	建設会社	国土交通省	鉄鋼メーカー
造船会社	運送会社	政府	情報通信企業
造船作業員	銀行	IMO	商船高等専門学校
舶用機器メーカー	保険会社	水先案内人	経済界
船級協会	IT企業	裁判員	市場
港湾局	国民	司法局	

図 5-1 自律船プロジェクトの利害関係者となりうる存在の列挙

次に図 5-1 で記述した利害関係者を抽象化する。抽象化を行った結果として、以下の 13 の利害関係者を定義した。

- 海運会社 (Shipping company)
- 船級協会 (Classification society)
- 造船会社 (Shipbuilding company)
- 船用機器メーカー (Ship system supplier)
- 港湾局 (Port)
- 荷主 (Cargo client)
- 銀行 (Bank)
- 保険会社 (Insurance company)
- 国民 (Public)
- メディア (Media)
- 研究機関 (Research institution)
- 政府 (Government)
- IMO

次に、各利害関係者のニーズを定義し、それを図 5-2 にマッピングした。本ケーススタディでは海運会社(Shipping company)を意思決定者に、荷主(Cargo client)を第一受益者に決定した。海運会社は海上輸送サービスを荷主に提供し、荷主はその見返りとして運賃を海運会社に支払う。よって第一受益者である荷主のニーズは「良い」海上輸送サービスを受けることである。よって自律船プロジェクトは主に「良い」海上輸送サービスに寄与すると考える。この 5.2.2 において、「良い」の基準について考察する。

また、自律船プロジェクトを各利害関係者の立場から評価するために、意思決定者・第一受益者・意思決定者に関わる一次的な利害関係者を抽出し、図 5-3 に記述した。

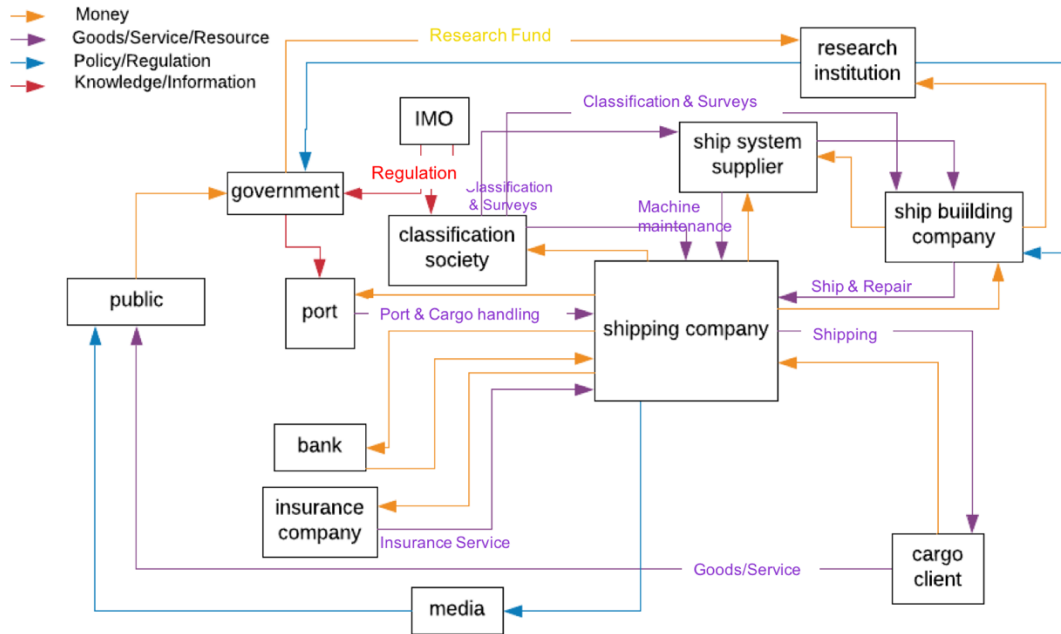


図 5-2 自律船プロジェクトの SVN

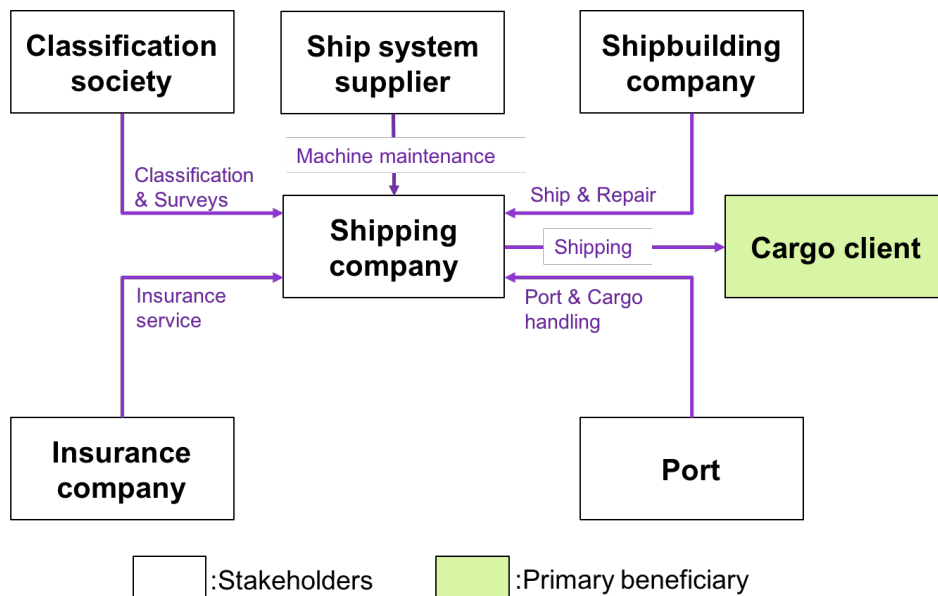


図 5-3 意思決定者・第一受益者・意思決定者に関わる一次的な利害関係者を抽出した SVN

5.2.2 評価軸の選定

第二のステップはニーズの達成度を測るための評価軸を選定することである。つまり「良い」海上輸送サービスとはなにかを考察することである。本節では、3.3 で説明した ility という考え方を利用する。ility の候補としては、Safety, Reliability, Punctuality, Economy などが考えられる。各ニーズを評価する ility の候補を意思決定者と意思決定者に関わる一次的な利害関係者の観点から分析したものを表 5-1 に示す。評価軸は多すぎるとパレート最適解が多数算出され[56]、設計案の絞り込みができない。また 4 軸以上になると、可視化ができない。故に、本ケーススタディでは、最大で 3 軸までの評価軸を選定する。

表 5-1 ニーズを評価する ility の列挙

ニーズ	Stakeholder	Beneficiary	自律船に関する考えられる ility
Shipping	海運会社	荷主	Operational safety, Reliability, Punctuality, Economy, Flexibility, Acceptability
Ship & Repair	造船会社	海運会社	Reliability, Maintainability, Economy, Modularity, Repairability, Simplicity
Classification & Surveys	船級協会	海運会社	Flexibility, Uniformity, Reliability, Safety
Port & Cargo handling	港湾局	海運会社	Efficiency, Loading safety, Accuracy, Flexibility
Insurance Service	保険会社	海運会社	Operational safety, Clarity, Reliability, Immediacy
Machine maintenance	船用機器メーカー	海運会社	Reliability, Maintainability, Repairability, Modularity, Economy

まず、初めにニーズ「Shipping」を評価するための評価軸の選定をする。これは海運会社 (Shipping company) の立場から、自律船について考察した時に、どのような評価軸で判断すべきかを考えるものである。国土交通省は、2017 年 6 月に海事産業の生産性革命(i-shipping)の推進に向けて 7 件の先進安全船舶技術研究開発支援事業を採択した。表 5-2 にその内容を示す。自律船の実現に向けては、国家としても安全性を重要視していることがわかる。そこで本ケーススタディでは「Shipping」の評価軸として Operational safety(航行安全性)を選定する。また、実現可能な自律船の設計には、経済合理性が不可欠である。自律化

に関わるコストが許容範囲を超えた場合には、Operational safety が向上したとしても、実現性は低い。よって、本ケーススタディでは「Shipping」の評価軸として Economy (経済性)を選定する。

表 5-2 先進安全船舶技術研究開発支援事業

分野	案件概要
動揺・操船シミュレータ による避航支援	船舶の衝突リスク判断と自律操船
	海上気象観測の自動観測・自動送信システム
	船体特性モデル自動補正機能による解析精度高度化
	船陸間通信を利用した LNG 安全運搬支援
船体モニタリングによる 安全設計	大型コンテナ船における船体構造ヘルスマニタリング
舶用機器・システムの 予防保全	ビッグデータを活用した船舶機関プラント事故防止
	貨物船・ばら積み貨物船向け甲板機械の IoT 化

次に、ニーズ「Ship & Repair」を評価するための評価軸の選定をする。これは造船会社 (Shipbuilding company) の立場から、自律船について考察した時に、どのような評価軸で判断すべきかを考えるものである。造船会社は想定した環境下においてシステムが正しく動作するような船舶を建造する必要がある。つまり、故障や不具合が発生しづらいことを念頭に船舶を建造すべきである。よって、本ケーススタディでは「Ship & Repair」の評価軸として、Reliability(信頼性)を選定する。また、あるシステムに故障や不具合が発生した場合には、その影響が他のシステムに伝播せず、そのシステムのみで止まることが望ましい。加えて、船舶の運航期間中での改修などにおいて、ある構成要素を変更した際に、他の構成要素に及ぼす影響が最小限であることは重要である。よって、この性能を Modularity とし、本ケーススタディでは「Ship & Repair」の評価軸として、Modularity(モジュール性)を選定する。加えて、海運会社と同様の理由で、Economy を選定する。

次に、ニーズ「Classification & Survey」を評価するための評価軸の選定をする。これは船級協会(Classification society)の立場から、自律船について考察した時に、どのような評価軸で判断すべきかを考えるものである。船級協会は、船舶と設備の技術上の基準を定め、設計された船舶がこの基準に則しているかを検査する機関である。この基準を鑑み、本ケーススタディでは評価軸として先に同じく Reliability(信頼性)と新たに Flexibility(柔軟性)を選定す

る。

次に、ニーズ「Port & Cargo handling」を評価するための評価軸の選定をする。これは港湾局(Port)の立場から、自律船について考察した時に、どのような評価軸で判断すべきかを考えるものである。港湾局は、交通量が多く、危険性が高い、湾内での交通を管制・管理する役割がある。湾内では、他の船舶の動向や管制からの指示に従い、各船舶は柔軟に行動する必要がある。よって、本ケーススタディでは評価軸として Flexibility(柔軟性)を選定する。同様に安全性を評価するために Operational safety を選定する。

次に、ニーズ「Insurance Service」を評価するための評価軸の選定をする。これは保険会社(Insurance company)の立場から、自律船について考察した時に、どのような評価軸で判断すべきかを考えるものである。保険会社は海運会社に対し、貨物保険や船舶保険などの海上保険サービスを提供している。事故などが発生した場合には保険会社は契約者に対して保険料を支払う義務がある。これは保険会社にとっては支出であり、このような支出を防ぐためには船舶の安全性は必要不可欠である。よって本ケーススタディでは評価軸として Operational safety を選定する。また、自動運転車の分野では、自動運転実現時の責任の所在や支払いの義務が明確にする重要性が述べられている[57]。自律船実現時にも同様の重要性が認識され则认为、本ケーススタディでは評価軸として Clarity(保険料の支払い基準、責任の所在が明確なこと)を選定する。

次に、ニーズ「Machine maintenance」を評価するための評価軸の選定をする。これは船用機器メーカー(Ship system supplier)の立場から、自律船について考察した時に、どのような評価軸で判断すべきかを考えるものである。船用機器メーカーは海運会社に対し、船用機器を提供するとともに、長期にわたりそのメンテナンスを担当する。船用機器が故障しづらいことは重要な要件であるため、本ケーススタディでは評価軸として Reliability(信頼性)を選定する。また、メンテナンス時にメンテナンスがしやすいことも重要な要件である。よって本ケーススタディでは評価軸として Maintainability(メンテナンスのしやすさ)を選定する。

以上をまとめたものを表 5-3 に示す。

表 5-3 ニーズを評価する評価軸

ニーズ	Stakeholder	Beneficiary	選定された評価軸
Shipping	海運会社	荷主	Economy, Operational safety
Ship & Repair	造船会社	海運会社	Economy, Reliability, Modularity
Classification & Surveys	船級協会	海運会社	Reliability, Flexibility
Port & Cargo handling	港湾局	海運会社	Flexibility, Operational safety
Insurance Service	保険会社	海運会社	Operational safety, Clarity
Machine maintenance	船用機器 メーカー	海運会社	Reliability, Maintainability

5.3 OPM による既存船舶の機能の分析

図 5-4 は既存船舶の機能を OPM によりモデル化したものである。Intent は”Shipping”であり、”Shipping”は”Ship”と”Cargo”に影響を与える。”Shipping”は以下の Function に分割が可能である。この分割については、2.3.6 に記述した研究や、[58]を参考にし、自律船実現時に Form の変更が大きいと考えられるものを抽出した。順に、”routing”, “lookout”, “maneuvering”, “routing for avoiding hazard”, “loading cargo”, “maintaining”, “networking”, “accommodating”, “Providing power”, “Berthing・unberthing”, “IT security”, “Communicating”, “Life supporting”である。それぞれの Function はその Function を実行するエージェントである General Form を持っている。General Form としてどの Specific Form を選択すべきかを考慮するために、次節では MM を作成する。

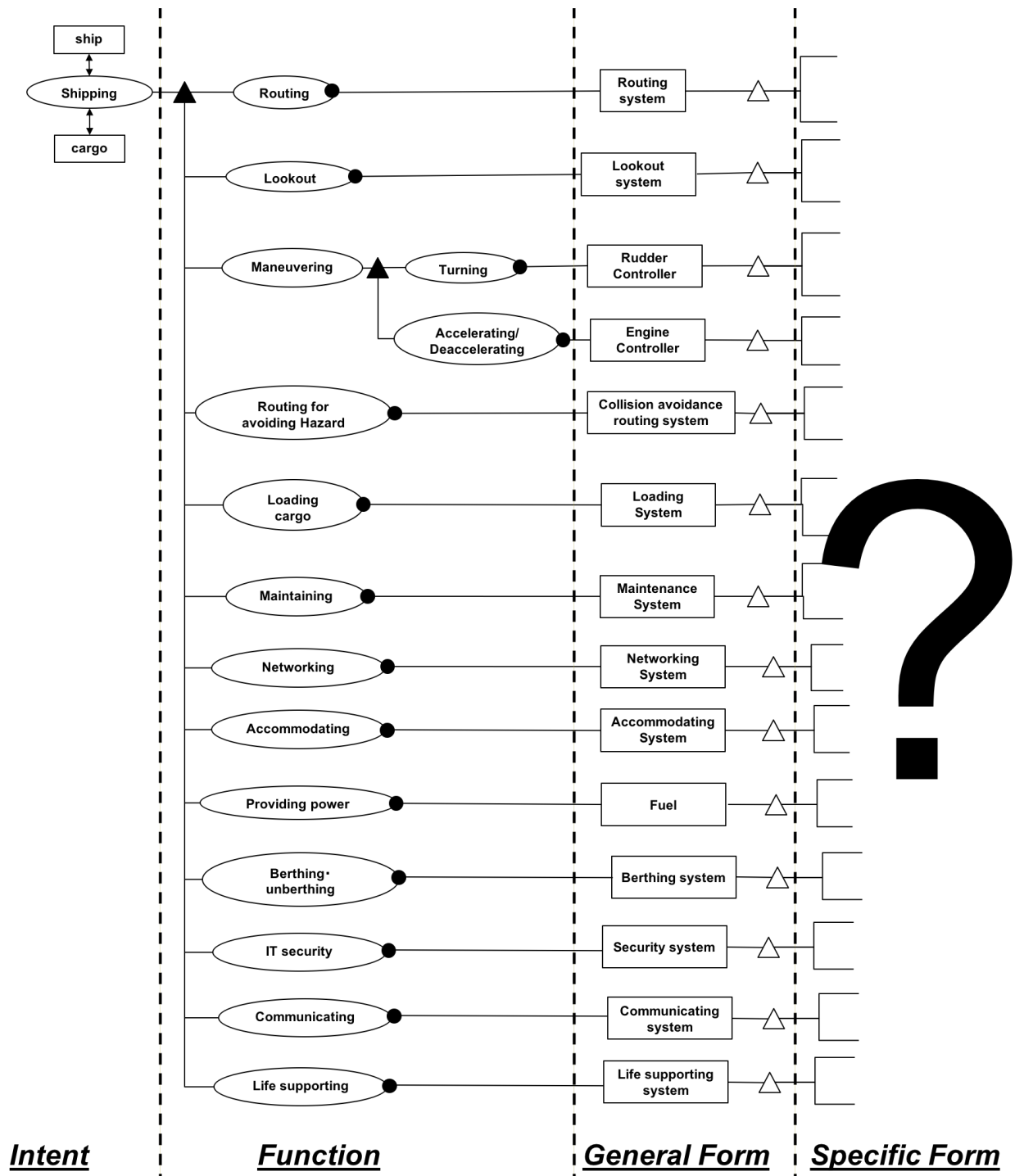


図 5-4 既存船舶の機能の OPM によるモデル化

5.4 MM の作成

図 5-5 は、Specific Form の候補を表現した MM である。MM の選択肢を作成するにあたっては 2.4 に記述した自律船の要素技術を参考にした。各 General Form において、一つの Specific Form を選択することにより、自律船の設計案を表現する。本ケーススタディでは、その中でも特に自律船に関して影響が強いと思われる Lookout system (ID = 2, 3)、Rudder controller (4, 5)、Collision avoidance routing system (8, 9)、Accommodating system (13)を考慮することとする(図 5-6)。Collision avoidance routing system にはいくつかの方法が考えられているが、本ケーススタディでは TCPA・DCPA・Fuzzy ルールにより構成されたシステムを対象とした。TCPA・DCPA・Fuzzy ルールについては Appendix に記載したので興味のある読者は参照いただきたい。

ID	GENERAL FORM		SF1	SF2	SF3
1	Routing system		Human onshore	Weather routing	
2	Lookout system	OS	Human onboard & Radar & AIS	Human remote & Radar & AIS	No human & Image recognition & Radar & AIS
3		CA	Human onboard & Radar & AIS	Human remote & Radar & AIS	No human & Image recognition & Radar & AIS
4	Rudder controller	OS	Human onboard	Human remote	Automated
5		CA	Human onboard	Human remote	Automated
6	Engine controller	OS	Human onboard	Human remote	Automated
7		CA	Human onboard	Human remote	Automated
8	Collision avoidance routing system	OS	Human onboard	TCPA・DCPA・Fuzzy	Deep learning
9		CA	Human onboard	TCPA・DCPA・Fuzzy	Deep learning
10	Loading system		Human onboard	Human remote	Automated
11	Maintenance system		Human onboard	Hull & equipment monitoring	Monitoring & auto repairing
12	Networking system		L band	Ka band	Ka & L band
13	Accommodating system		Hotel	Small hotel	No hotel system
14	Fuel		C heavy oil	LNG	
15	Berthing system		Human onboard	Expert system	Deep learning
16	Security system		High	Mid	Low
17	Communicating system		SCC	Whistle & radiotelephone	
18	Life supporting system		None	Yes	

図 5-5 作成した MM (OS: Open Sea 外洋, CA: Congested Area 輻輳海域)

ID	GENERAL FORM		SF1	SF2	SF3
2	Lookout system	OS	Human onboard & Radar & AIS	Human remote & Radar & AIS	No human & Image recognition & Radar & AIS
3		CA	Human onboard & Radar & AIS	Human remote & Radar & AIS	No human & Image recognition & Radar & AIS
4	Rudder controller	OS	Human onboard	Human remote	Automated
5		CA	Human onboard	Human remote	Automated
8	Collision avoidance routing system	OS		TCPA・DCPA・Fuzzy	
9		CA		TCPA・DCPA・Fuzzy	
11	Maintenance system		Human onboard	Hull & equipment monitoring	Monitoring & auto repairing
13	Accommodating system		Hotel	Small hotel	No hotel system

図 5-6 本ケーススタディで検討する MM

しかしながら、MM に示した各意思決定は独立ではなく、相互に制約を持つ場合がある。例えば、Accommodating system において、Hotel (船員の宿泊・生活システム) は完全無人化を達成しない以上は、なくすことはできない。これらの制約条件は、3.6.2 に示した記法を用いて、図 5-7 のように表現した。これは、Accommodating system と Lookout system、Rudder controller との制約を示したものである。Accommodating system が Hotel の場合には、Lookout system、Rudder controller は Human onboard の選択をする。Accommodating system が No hotel system の場合は、Lookout system、Rudder controller は Automated の選択をする。Lookout system、Rudder controller がそれ以外の場合には、Accommodating system は Small hotel の選択をすることを表現している。

scope	equation
dec2,dec3,dec4,dec5,dec13	(dec13==ALT1 && dec2,3,4,5==ALT1) (dec13==ALT3 && dec2,3,4,5==ALT3)

図 5-7 MM の制約条件の表現

また、比較対象として MUNIN・ReVolt の設計案を MM 上にマッピングしたものを図 5-8 に示す。赤字のものは MUNIN の設計案であり、紫色の字のものは ReVolt の設計案である。

ID	GENERAL FORM		SF1	SF2	SF3
2	Lookout system	OS	Human onboard & Radar & AIS	Human remote & Radar & AIS	No human & Image recognition & Radar & AIS
3		CA	Human onboard & Radar & AIS	Human remote & Radar & AIS	No human & Image recognition & Radar & AIS
4	Rudder controller	OS	Human onboard	Human remote	Automated
5		CA	Human onboard	Human remote	Automated
11	Maintenance system		Human onboard	Hull & equipment monitoring	Monitoring & auto repairing
13	Accommodating system		Hotel	Small hotel	No hotel system

図 5-8 MUNIN・ReVolt の設計案の MM へのマッピング

5.5 評価軸に対応した評価値の計算

5.2.2 で選択した評価軸に基づき、5.4 で作成した MM から求められるすべての自律船の設計案を評価することを考える。選択した評価軸は Economy、Operational safety、Modularity、Reliability、Flexibility、Uncertainty、Maintainability である。本ケーススタディでは、図 5-7 で示すように、MM について ID2, 3, 4, 5 と 13 には制約があり、ID2, 3, 4, 5 を決定すると 13 は自動的に決定される。また Collision avoidance routing system (ID = 8, 9)は TCPA・DCPA・Fuzzy に固定されている。よって本ケーススタディで考慮すべき自律船の設計案の候補は、 $3^5 = 243$ 通りである。

5.5.1 Economy の計算

Economy は船舶を自律化するためのコストと定義する。自律化のコストを算出するために、Stopford のキャッシュフローモデルを用いる[59]。Stopford はキャッシュフローを収益とコストに分解した。コストは Capital costs, Operating costs, Voyage costs に分割できる。本ケーススタディでは、船舶の収益は自律船と既存船舶で変動がないと仮定する。よって、以下では、自律化によってどのコストが変動するかについて考察する。

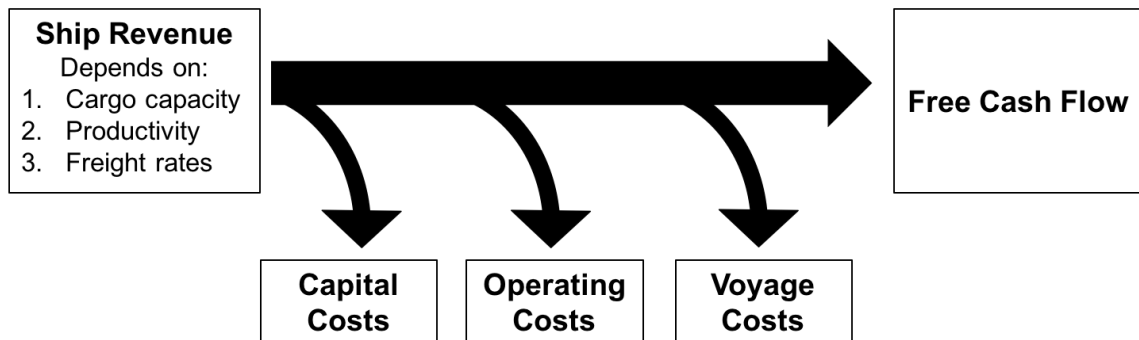


図 5-9 キャッシュフローモデル[59]

Kretschmann は自律船のコストについて考察している[60]。表 5-4 は、Operating costs, Voyage costs, Capital costs の自律化による変化を示している。本ケーススタディでは、図 5-6 における ID2, 3, 4, 5, 11 は Operating costs と Capital costs における autonomous ship technology に影響を与える。ID13 は Capital costs に影響を与える。

表 5-4 Cost changes

Operating costs	Voyage costs	Capital costs
Crew wages (-)	Air resistance (-)	Deckhouse (-)
Crew related costs (-)	Light ship weight (-)	Hotel system (-)
Shore control center (+)	Hotel system (-)	Redundant technical systems (+)
Maintenance crews (+)	Boarding crew for port calls (+)	Autonomous ship technology (+)

Stopford と Kretschmann の調査より、既存船舶と自律化とのキャッシュフローの変化は式 (5.1)により計算される。

$$\begin{aligned}
 \Delta \text{Cash flow of design} & \\
 &= \Delta \text{Autonomous ship technology cost} \\
 &+ \Delta \text{Crew wages} + \Delta \text{Hotel system development cost}
 \end{aligned}
 \tag{5.1}$$

式(5.1)の値は、表 5-5、表 5-6 に示すように設定した。表 5-5 は

$\Delta Autonomous\ ship\ technology\ cost + \Delta Crew\ wages$ の値を示しており、文献[61][62]を参考に設定した。表 5-6 は Kretschmann [60]の研究を参考に設定した。

一つの自律船の設計案の候補は各セルの値を総和することによって算出が可能である。

例えば、SF1 を ID2 から 5 まで選択し、SF2 を ID13 で選択した場合には、

$\Delta Cash\ flow\ of\ design = 0 + 0 + 0 + 0 - 175 = -175$ となる。

表 5-5 $\Delta Autonomous\ ship\ technology\ cost + \Delta Crew\ wages$ の設定値 (10KUSD)

ID	GF		SF1	SF2	SF3
2	Lookout system	OS	0	+10 -60	+20 -120
3		CA	0	+20 -90	+40 -180
4	Rudder controller	OS	0	+5 -30	+10 -60
5		CA	0	+20 -30	+20 -60
11	Maintenance system		0	+10 -30	+20 -70

表 5-6 $\Delta Hotel\ system\ development\ cost$ の設定値 (10KUSD)

ID	GF	SF1	SF2	SF3
13	Accommodating system	0	-175	-350

5.5.2 Operational safety の計算

Operational safety は、3.6.3 で説明したような、単純に MM の各セルに値を入力し線形な足し算・割り算による方法では計算することが難しいため、本ケーススタディでは開発した海上交通シミュレータにより算出された船舶の衝突数とした。シミュレータにはマルチエージェントシミュレーションを用い、各エージェントは各船舶とした。また、シミュレータは外洋(OS: Open sea)と輻輳海域(CA: Congested Area)の二海域に対して適用している。シミュレータの詳細については Appendix に記載した。

5.5.2.1 海上交通シミュレータの基本設定

表 5-7 にシミュレータの基本設定を示す。操縦性のパラメータであるK, Tは SR108 コンテ

ナ船の値を参考にした。対象船舶の長さは 175m、載貨重量は 24801 トン、喫水は 9.5m である。

表 5-7 シミュレータの基本設定

	OS: Open Sea	CA: Congested Area
Time step	2 [sec]	
Ship length	175 [m]	
Ship speed	5 [m/s] = 9.7 [knot]	
Area	正方形 (5km × 5km)	東京湾
Route	2 船の横切り	中ノ瀬航路、浦賀水道航路
D_w	2000 [m]	
R	2000 [m]	
D_s	1500 [m]	
minTCPA	720 [sec]	
minDCPA	1200 [m]	
K	0.155 [sec ⁻¹]	
T	80.5 [sec]	

5.5.2.2 自律化のシミュレータにおける考慮

MM に応じて衝突数を計算するためには、シミュレータは自律船の設計案の候補に従って、異なるアウトプットを算出できる必要がある。

本研究では開発した海上交通シミュレータに対して、新たに「見張り失敗確率: p 」と「操舵の不確実性: Z 」を導入する。シミュレータ上では、Time step ごとに各船舶において、TCPA・DCPA(2.4.2.1 参照)が計算され、その TCPA・DCPA を用いて避航の判断がされている。「見張り失敗確率: p 」とは、その TCPA・DCPA が計算されない確率である。これにより、他船の動向を把握することに失敗し、取るべき避航行動を取れない危険性が生じる。「操舵の不確実性: Z 」とは、現在の舵角に対して最大 Z 度のランダムなノイズを指す。「見張り失敗確率: p 」は Lookout system (ID = 2, 3)に関係し、「操舵の不確実性: Z 」は Rudder controller (ID = 4, 5)に関係する。

5.5.2.3 パラメータ設定と結果

Lookout system と Rudder controller に関係する「見張り失敗確率: p 」と「操舵の不確実性: Z 」は表 5-8 のように設定した。各シミュレーションは表 5-8 に応じてパラメータを変化させながら行った。シミュレーションは、作成した船舶の総数が 1000 隻になった時に終了する。結果を表 5-9 に示す。

表 5-8 パラメータの設定

ID	SF1	SF2	SF3
2: p (OS)	0	0.3	0.5
3: p (CA)	0	0.3	0.5
4: Z (OS)	0	2	5
5: Z (CA)	0	2	5

表 5-9 算出された衝突回数 (左: 外洋 / 右: 輻輳海域)

ID2	ID4	Times	ID3	ID5	Times
SF1	SF1	0	SF1	SF1	1
	SF2	0		SF2	21
	SF3	0		SF3	70
SF2	SF1	0	SF2	SF1	3
	SF2	0		SF2	63
	SF3	1		SF3	53
SF3	SF1	1	SF3	SF1	3
	SF2	1		SF2	68
	SF3	2		SF3	58

5.5.3 Reliability ・ Flexibility ・ Uncertainty ・ Modularity ・

Maintainability の計算

Reliability・Flexibility・Uncertainty・Modularity・Maintainability は下記のように設定した。

特性値の設定について、計算方法が plus の場合には、0~10 までの値で特性値を設定した。mult の場合には、0~1 までの値で特性値を設定した。表 5-5、表 5-6 の Economy までを含め、特性値を設定したものを図 5-10 に示す。この計算は 3.6.3 で説明した方法により行う。

例えば ID2~13 までの General Form として、全て SF1 に該当するものを選択した場合、Flexibility の値は(5.2)のように計算される。

$$Value\ of\ Flexibility = 0.95 * 0.93 * 0.94 * 0.90 * 0.95 * 0.98 = 0.69 \dots \quad (5.2)$$

ID	GENERAL FORM		TYPE	SF1	SF2	SF3
2	Lookout system	OS	none	Human onboard & Radar & AIS	Human remote & Radar & AIS	No human & Image recognition & Radar & AIS
RELIABILITY			mult	0.95	0.98	0.99
FLEXIBILITY			plus	10	9	5
CLARITY			mult	0.9	0.4	0.7
MODULARITY			plus	8	5	3
ECONOMY			plus	0	-50	-100
MAINTAINABILITY			plus	10	9	5
3		CA	none	Human onboard & Radar & AIS	Human remote & Radar & AIS	No human & Image recognition & Radar & AIS
RELIABILITY			mult	0.93	0.97	0.99
FLEXIBILITY			plus	9	5	3
CLARITY			mult	0.8	0.3	0.5
MODULARITY			plus	8	5	3
ECONOMY			plus	0	-70	-140
MAINTAINABILITY			plus	10	8	5
4	Rudder controller	OS	none	Human onboard	Human remote	Automated
RELIABILITY			mult	0.94	0.98	0.99
FLEXIBILITY			plus	10	9	6
CLARITY			mult	1.0	0.5	0.9
MODULARITY			plus	7	5	3
ECONOMY			plus	0	-25	-50
MAINTAINABILITY			plus	10	9	8
5		CA	none	Human onboard	Human remote	Automated
RELIABILITY			mult	0.90	0.97	0.99
FLEXIBILITY			plus	9	6	4
CLARITY			mult	1.0	0.4	0.8
MODULARITY			plus	7	5	3
ECONOMY			plus	0	-10	-40
MAINTAINABILITY			plus	10	9	8
11	Maintenance system		none	Human onboard	Hull & equipment monitoring	Monitoring & auto repairing
RELIABILITY			mult	0.95	0.97	0.99
FLEXIBILITY			plus	9	8.5	8
CLARITY			mult	0.8	0.8	0.5
MODULARITY			plus	3	6	2
ECONOMY			plus	0	-20	-50
MAINTAINABILITY			plus	5	8	10
13		Accommodating system	none	Hotel	Small hotel	No hotel system
RELIABILITY			mult	0.98	0.99	1
FLEXIBILITY			plus	0	0	0
CLARITY			mult	1.0	1.0	1.0
MODULARITY			plus	5	8	10
ECONOMY			plus	0	-175	-350
MAINTAINABILITY			plus	8	9	10

図 5-10 MM の特性値の設定

5.6 パレート最適解の計算

本節では、5.2.2 で選定した評価軸での分析を行う。

5.6.1 海運会社の場合

海運会社(Shipping company)の立場から自律船について検討を行う。選定した評価軸は Operational safety と Economy である。Operational safety の計算では ID11 Maintenance system は運行上の安全に寄与しないと考え、 $3^4 = 81$ 通りの設計案について考察した。図 5-11 に、MM から算出された 81 通りの自律船の設計案をプロットした結果を示す。縦軸はシミュレータによって算出された衝突数を示し、横軸はキャッシュフローの変化量を示す。左下 (U: Utopia point)に向かうほど、その設計案が優れた設計案であることを示す。81 の設計案から 7 つのパレートな設計案が得られた。表 5-10 にパレート最適解である A(ReVolt), B,C,D,E,F,G(MUNIN)の内訳を示す。ReVolt・MUNIN とともにパレート最適な設計案であると評価された。

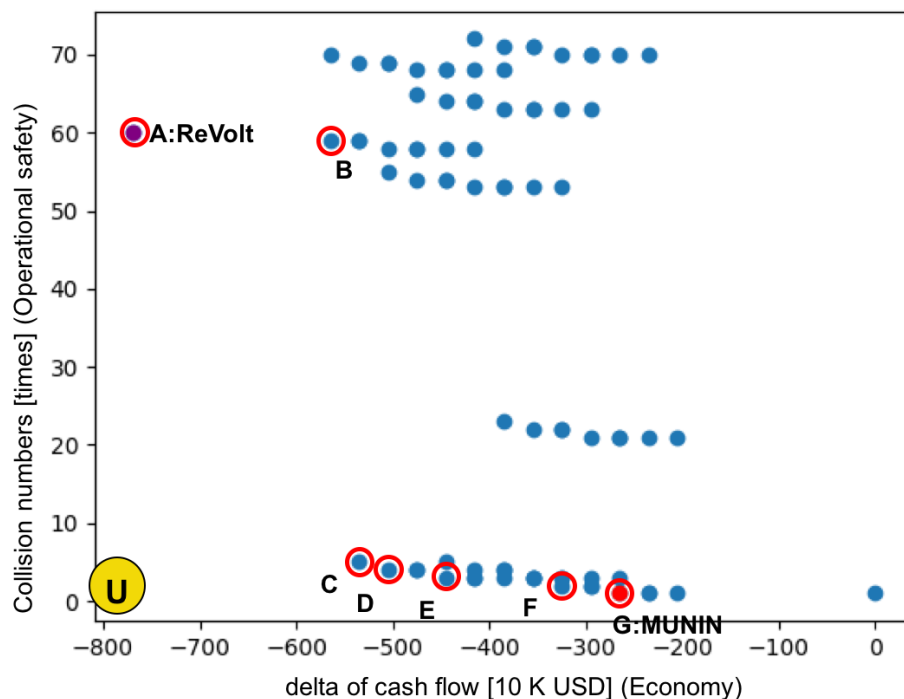


図 5-11 設計案のプロット(海運会社の場合)

表 5-10 各プロット点の内訳(海運会社の場合)

ID	ID2: Lookout system (OS)	ID3: Lookout system (CA)	ID4: Rudder controller (OS)	ID5: Rudder controller (CA)
A	SF3: No human	SF3: No human	SF3: Automated	SF3: Automated
B	SF3: No human	SF3: No human	SF2: Remote	SF3: Automated
C	SF3: No human	SF3: No human	SF3: Automated	SF1: Human
D	SF3: No human	SF3: No human	SF2: Remote	SF1: Human
E	SF2: Remote	SF3: No human	SF2: Remote	SF1: Human
F	SF3: No human	SF1: Human	SF2: Remote	SF1: Human
G	SF2: Remote	SF1: Human	SF2: Remote	SF1: Human

表 5-11 パレート最適解のうち各 Form が占める割合(海運会社の場合)

	ID2: Lookout system (OS)	ID3: Lookout system (CA)	ID4: Rudder controller (OS)	ID5: Rudder controller (CA)
SF1	0%	28.5%	0%	71.5%
SF2	28.5%	0%	71.5%	0%
SF3	71.5%	71.5%	28.5%	28.5%
計	100%	100%	100%	100%

5.6.2 造船会社の場合

造船会社(Shipbuilding company)の立場から自律船についての検討を行う。選定した評価軸は Economy と Reliability と Modularity である。自律船の設計案の候補は、5.5 で示したように 243 通り存在する。図 5-13 に設計案をプロットしたものを示す。黄色で着色された点がパレート最適な設計案であり、全部で 56 存在した。ReVolt・MUNIN とともにパレート最適な設計案であると評価された。

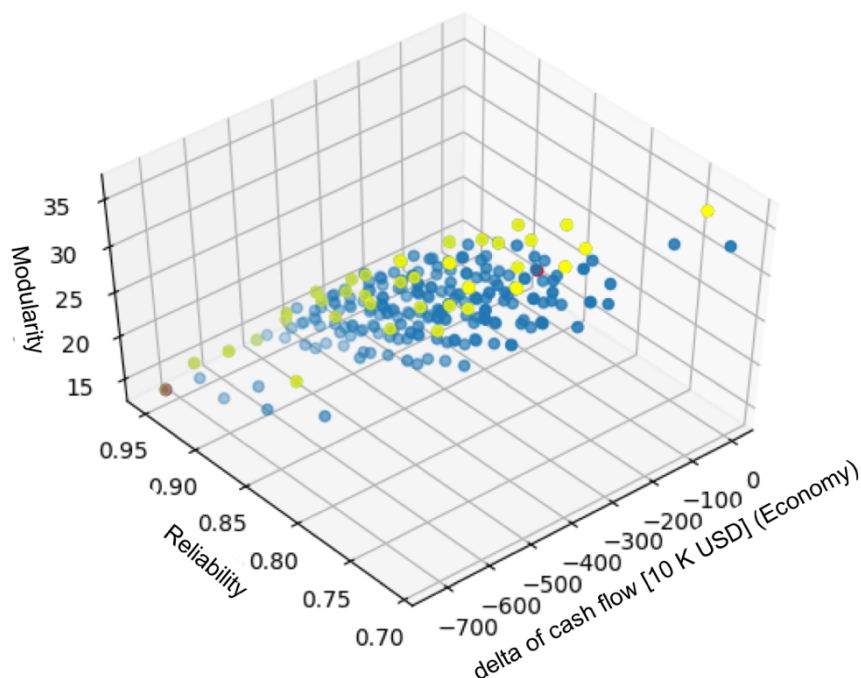


図 5-12 設計案のプロット(造船会社の場合)

表 5-12 パレート最適解のうち各 Form が占める割合(造船会社の場合)

	ID2: Lookout system (OS)	ID3: Lookout system (CA)	ID4: Rudder controller (OS)	ID5: Rudder controller (CA)	ID11: Maintenance system
SF1	21.4%	39.3%	30.4%	46.4%	55.4%
SF2	58.9%	14.3%	50.0%	35.7%	33.9%
SF3	19.7%	46.4%	19.6%	17.9%	10.7%
計	100%	100%	100%	100%	100%

5.6.3 船級協会の場合

船級協会(Classification society)の立場から自律船についての検討を行う。選定した評価軸は Reliability と Flexibility である。自律船の設計案の候補は、5.5 で示したように 243 通り

存在する。図 5-13 に設計案をプロットしたものを示す。パレート最適な設計案は全部で 18 存在する。ReVolt(R)・MUNIN(F)ともにパレート最適な設計案であると評価された。

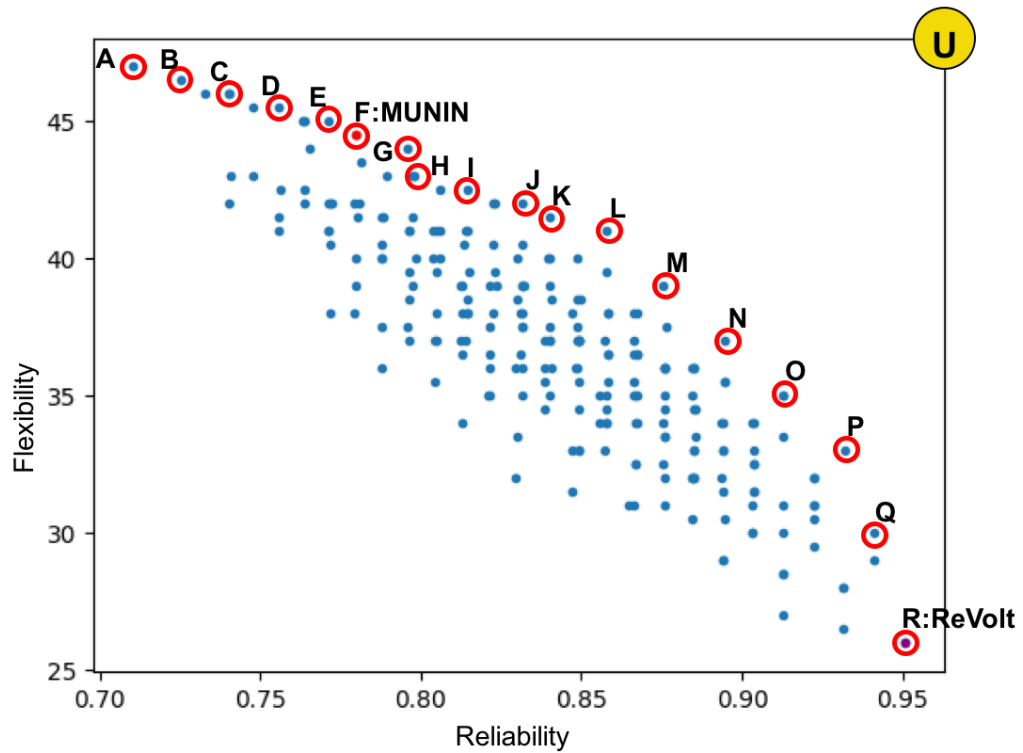


図 5-13 設計案のプロット(船級協会の場合)

表 5-13 パレート最適なプロット点の内訳(船級協会の場合)

ID	ID2: Lookout system (OS)	ID3: Lookout system (CA)	ID4: Rudder controller (OS)	ID5: Rudder controller (CA)	ID11: Maintenance system
A	SF1	SF1	SF1	SF1	SF1
B	SF1	SF1	SF1	SF1	SF2
C	SF1	SF1	SF2	SF1	SF1
D	SF1	SF1	SF2	SF1	SF2
E	SF1	SF1	SF2	SF1	SF3
F	SF2	SF1	SF2	SF1	SF2
G	SF1	SF1	SF1	SF2	SF2
H	SF1	SF1	SF1	SF2	SF3
I	SF1	SF1	SF2	SF2	SF2
J	SF1	SF1	SF1	SF3	SF1
K	SF1	SF1	SF1	SF3	SF2
L	SF1	SF1	SF1	SF3	SF3
M	SF1	SF1	SF3	SF2	SF3
N	SF1	SF1	SF3	SF3	SF3
O	SF1	SF2	SF3	SF2	SF3
P	SF1	SF2	SF3	SF2	SF3
Q	SF2	SF3	SF3	SF3	SF3
R	SF3	SF3	SF3	SF3	SF3

表 5-14 パレート最適解のうち各 Form が占める割合(船級協会の場合)

	ID2: Lookout system (OS)	ID3: Lookout system (CA)	ID4: Rudder controller (OS)	ID5: Rudder controller (CA)	ID11: Maintenance system
SF1	83.3%	77.8%	38.9%	33.3%	16.7%
SF2	11.1%	11.1%	27.8%	33.3%	33.3%
SF3	5.6%	11.1%	33.3%	33.3%	50.0%
計	100%	100%	100%	99.9%	100%

5.6.4 港湾局の場合

港湾局(Port)の立場から自律船についての検討を行う。選定した評価軸は Flexibility と Operational safety である。Operational safety の計算では ID11 Manitenance system は運行上の安全に寄与しないと考え、 $3^4 = 81$ 通りの設計案について考察した。図 5-14 に設計案をプロットしたものを示す。左上に行くほど、良い設計案であると評価される。パレート最適な設計案は 1 存在し、その内訳を表 5-15 に示した。ReVolt・MUNIN ともにパレート最適な設計案と評価されなかった。

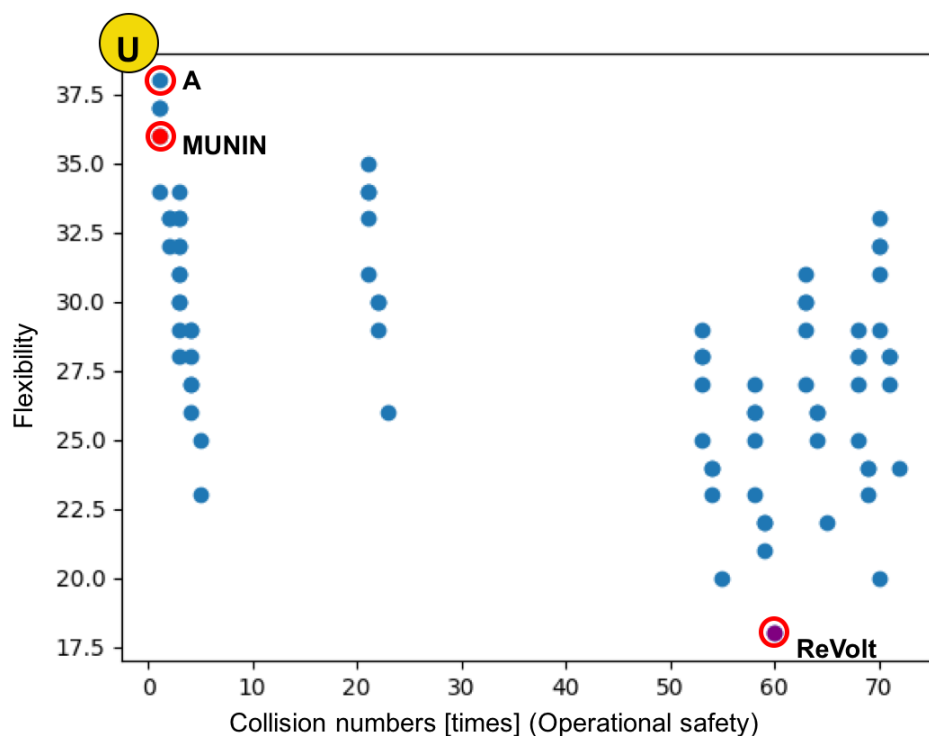


図 5-14 設計案のプロット(港湾局の場合)

表 5-15 パレート最適なプロット点の内訳(港湾局の場合)

ID	ID2: Lookout system (OS)	ID3: Lookout system (CA)	ID4: Rudder controller (OS)	ID5: Rudder controller (CA)
A	SF1	SF1	SF1	SF1

表 5-16 パレート最適解のうち各 Form が占める割合(港湾局の場合)

	ID2: Lookout system (OS)	ID3: Lookout system (CA)	ID4: Rudder controller (OS)	ID5: Rudder controller (CA)
SF1	100%	100%	100%	100%
SF2	0%	0%	0%	0%
SF3	0%	0%	0%	0%
計	100%	100%	100%	100%

5.6.5 保険会社の場合

保険会社(Insurance company)の立場から自律船についての検討を行う。選定した評価軸は Operational safety と Uncertainty である。Operational safety の計算では ID11 Maintenance system は運行上の安全に寄与しないと考え、 $3^4 = 81$ 通りの設計案について考察した。図 5-15 に設計案をプロットしたものを示す。左上に行くほど、良い設計案であると評価される。保険会社の場合には、パレート最適な設計案は 1 存在し、その内訳を表 5-17 に示した。ReVolt(A)・MUNIN(H)ともにパレート最適な設計案でないと評価された。

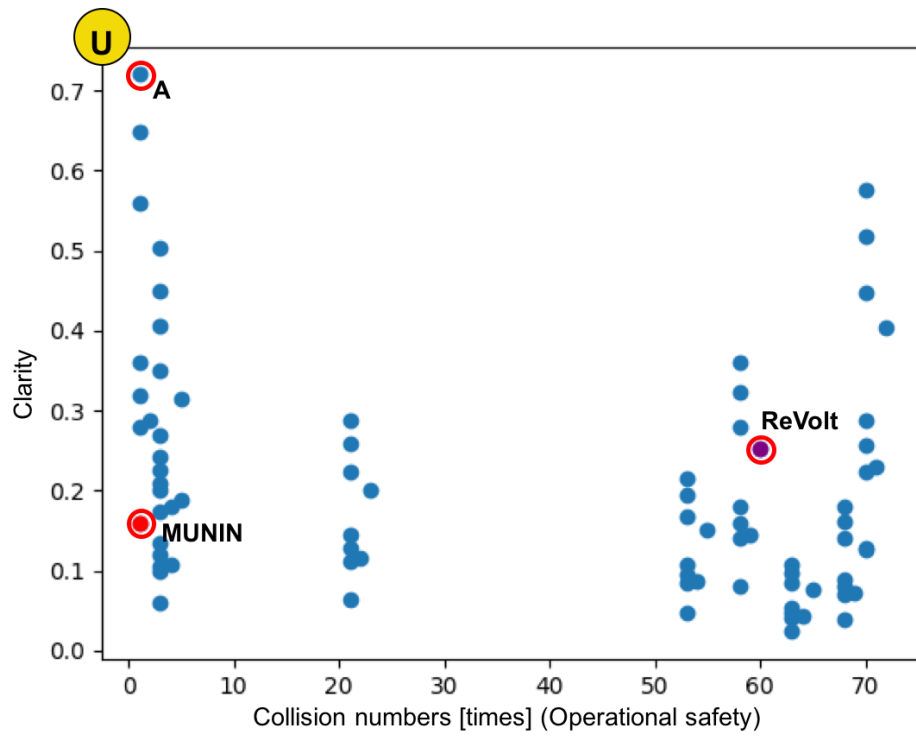


図 5-15 設計案のプロット(保険会社の場合)

表 5-17 パレート最適なプロット点の内訳(保険会社の場合)

ID	ID2: Lookout system (OS)	ID3: Lookout system (CA)	ID4: Rudder controller (OS)	ID5: Rudder controller (CA)
A	SF1	SF1	SF1	SF1

表 5-18 パレート最適解のうち各 Form が占める割合(保険会社の場合)

	ID2: Lookout system (OS)	ID3: Lookout system (CA)	ID4: Rudder controller (OS)	ID5: Rudder controller (CA)
SF1	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
SF2	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
SF3	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
計	100%	100%	100%	100%

5.6.6 船用機器メーカーの場合

船用機器メーカー(Ship system supplier)の立場から自律船についての検討を行う。選定した評価軸は Reliability と Maintainability である。自律船の設計案の候補は、5.5 で示したように 243 通り存在する。図 5-16 に設計案をプロットしたものを示す。パレート最適な設計案は全部で 17 存在する。ReVolt(L)はパレート最適解と評価されたが、MUNIN は評価されなかった。

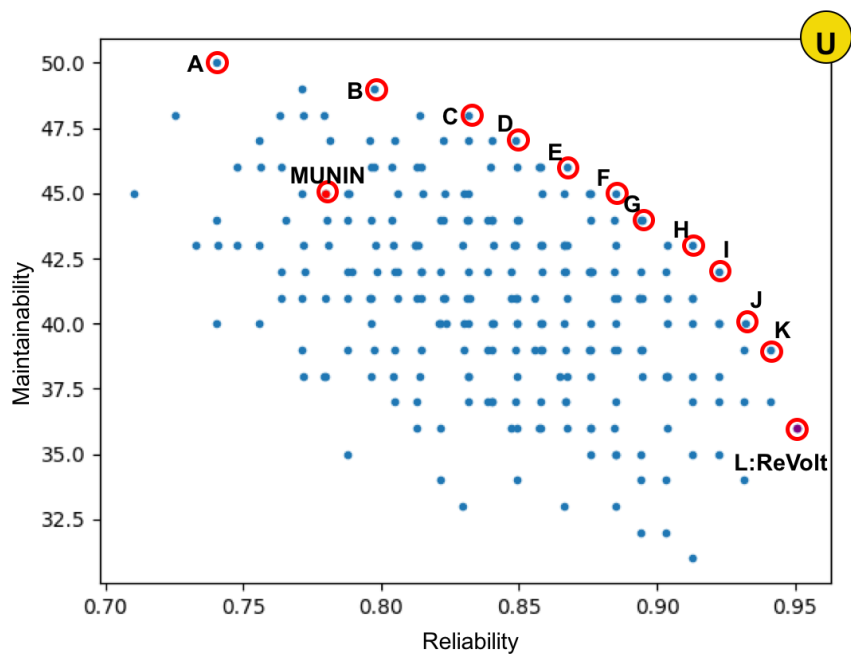


図 5-16 設計案のプロット(船用機器メーカーの場合)

表 5-19 パレート最適なプロット点の内訳(船用機器メーカーの場合)

ID	ID2: Lookout system (OS)	ID3: Lookout system (CA)	ID4: Rudder controller (OS)	ID5: Rudder controller (CA)	ID11: Maintenance system
A	SF1	SF1	SF1	SF1	SF3
B	SF1	SF1	SF1	SF2	SF3
C	SF1	SF1	SF1	SF1	SF2
D	SF1	SF1	SF1	SF2	SF2
E	SF1	SF1	SF1	SF3	SF2
F	SF1	SF1	SF1	SF1	SF1
G	SF1	SF1	SF1	SF2	SF1
H	SF1	SF1	SF1	SF3	SF1
I	SF1	SF1	SF2	SF3	SF1
J	SF1	SF2	SF2	SF3	SF1
K	SF1	SF2	SF3	SF3	SF1
L	SF3	SF3	SF3	SF3	SF3

表 5-20 パレート最適解のうち各 Form が占める割合(船用機器メーカーの場合)

	ID2: Lookout system (OS)	ID3: Lookout system (CA)	ID4: Rudder controller (OS)	ID5: Rudder controller (CA)	ID11: Maintenance system
SF1	91.7%	75.0%	66.7%	25.0%	50.0%
SF2	0%	16.7%	16.6%	25.0%	25.0%
SF3	8.3%	8.3%	16.6%	50.0%	25.0%
計	100%	100%	100%	100%	100%

5.6.7 まとめ

パレート最適と判断される設計案を算出することで、膨大な設計案の候補を絞ることができた。各利害関係者の立場から、パレート最適解の全設計案に占める割合を記述したものを表 5-21 に示す。

表 5-21 パレート最適解の全設計案に占める割合

Beneficiary	評価軸	全設計案の数	パレート最適解の数	パレート最適解の全設計案に占める割合
海運会社	Economy, Operational safety	81	7	8.6%
造船会社	Economy, Reliability, Modularity	243	56	23.0%
船級協会	Reliability, Flexibility	243	18	7.4%
港湾局	Flexibility, Operational safety	81	1	1.2%
保険会社	Uncertainty, Operational safety	81	1	1.2%
船用機器メーカー	Reliability, Maintainability	243	17	7.0%

パレート最適解の選択は意思決定者の効用関数に依存する。例えば 2 変数のパレート最適解の選択問題を考える場合には、各変数が意思決定者によってどの程度、重要視されるかを決定する必要がある。実際の選択においては、この意思決定者の効用関数を、アンケートや過去の意思決定から算出することが多い[63]。

例えば表 5-10 に示した A~G までの点のうちから一つのパレート最適解を選択する問題を考える。Economy を最重要視する意思決定者であれば、A の ReVolt の設計案を採用する。Operational safety を最重要視する意思決定者であれば、G の MUNIN の設計案を採用する。また、それ以外の効用関数をもつ意思決定者ならば、その効用関数に応じて B~F の設計案を採用すれば良い。

また、MUNIN と ReVolt の設計案は、利害関係者ごとに評価が異なることがわかる。MUNIN は外洋の航海は自動化し、輻輳海域については有人の航海を想定している。ReVolt は完全無人船舶を想定している。表 5-22 に、MUNIN と ReVolt の設計案がパレート

最適解と判定されたかどうかについての表を示す。MUNIN は港湾局と舶用機器メーカー以外の立場でパレート最適と判定された。ReVolt は港湾局以外の立場でパレート最適と判定された。港湾局においてパレート最適解と判定されなかったことについて、港湾においては、交通量が多く、安全性を求めるために、現在の自律化技術が不完全であると判断されたためである。これは 2.2.2 に記述した MUNIN の結論である「幅狭海域の利用においては、自動避航あるいは避航操船支援機能の向上が必要である。」に一致しており、港湾局の立場から、自律船の設計案が適切に判断できたと考えられる。

表 5-22 MUNIN と ReVolt の設計案がパレート最適解と判定されたか？

Beneficiary	評価軸	MUNIN	ReVolt
海運会社	Economy, Operational safety	○	○
造船会社	Economy, Reliability, Modularity	○	○
船級協会	Reliability, Flexibility	○	○
港湾局	Flexibility, Operational safety	×	×
保険会社	Uncertainty, Operational safety	○	○
舶用機器メーカー	Reliability, Maintainability	×	×

第6章 考察

6.1 はじめに.....	86
6.2 自律船の設計フローに関する考察	86
6.2.1 手続き的な部分と属人的な部分	86
6.2.2 OPM から MM の作成について.....	87
6.2.3 MM における重要な意思決定項目の抽出.....	87
6.2.4 評価軸に対応した評価値の計算について	88
6.3 海事クラスター内の利害関係者に応じた自律船の設計.....	89
6.4 自律船の設計フローの意思決定における貢献.....	89

6.1 はじめに

3.8 の本研究の位置付けで述べたように、本研究の新規性は下記のとおりである。

- Systems Approach を用いて自律船の設計問題を解けるように修正する
- 海事クラスター内の利害関係者に応じた自律船の設計

本章ではこれを踏まえ、「自律船の設計フローに関する考察」と「海事クラスター内の利害関係者に応じた自律船の設計」という観点から考察を行う。

また、自律船の設計について意思決定する際に、提案した自律船の設計フローが、どのような点で貢献できるかについて「自律船の設計フローの意思決定における貢献」という節で述べる。

6.2 自律船の設計フローに関する考察

6.2.1 手続き的な部分と属人的な部分

本研究では、自律船の設計フローを第 4 章で示した。その流れを再掲すると以下のようにある。

1. 利害関係者の分析と評価軸の選定
2. OPM による既存船舶の機能の分析
3. MM の作成
4. 評価軸に対応した評価値の計算
5. パレート最適解の計算

以上が手続き的に行うことのできる作業であるが、各作業においては属人的な部分が含まれる。以下では属人性の発生する作業について、1~5 までの段階ごとに説明する。

「1. 利害関係者の分析と評価軸の選定」では、評価軸の選定において属人性がある。

「2. OPM による既存船舶の機能の分析」では、どの Function を記述するかにおいて属人性がある。

「3. MM の作成」では、Function を達成する Form として、どの選択肢を考えるかにおいて属人性がある。

「4. 評価軸に対応した評価値の計算」では、特性値の設定方法に属人性がある。

「5. パレート最適解の計算」では、属人性はない。

このような属人性の排除は、複数の有識者との議論によって排除するのが望ましい。本ケーススタディではこのような属人性は海事関係者への有識者へのヒアリングにおいて排除した。

6.2.2 OPM から MM の作成について

本研究では MM の作成について OPM を用いた。OPM を用いて自律船に関する Function を洗い出し、それに対応する Form を選択するという問題として MM を記述した。よって設計空間を Form のみに限定し、狭めたとも言える。

自律船のコンセプト設計問題は問題空間が広く、適切に設計空間を選択することは非常に難しい。設計空間の選択は、経験やチームワークに依拠しているが、明確な基準がないために属人性や見落としが発生する可能性がある。本手法はそのような見落としを防ぐことが期待できる。

本手法の限界としては、Function 自体が選択肢となりうる場合が考えられる。そのような場合には MM で考慮する意思決定項目として Form のみならず、Function も考慮する必要がある。

6.2.3 MM における重要な意思決定項目の抽出

4.3 で作成した OPM が巨大になった場合には 4.4 で作成する MM の意思決定項目は非常に大きくなる。その場合、設計案の数は指数関数的に増加するので、パレート最適解となる設計案を見つけるのが難しい。

Simmons[6]は、重要な意思決定項目を見つける方法として、Connectivity と Sensitivity と二つの指標を提案している。Connectivity とは、その意思決定項目がどのくらい他の意思決定項目に影響を与えるかを示すものであり、定量的には、3.6.2 で示した制約条件の数によって計算できる。Sensitivity とは、その意思決定項目が評価軸に対してどの程度影響を及ぼすかをスコア化したものである。

図 6-1 に、Connectivity と Sensitivity の 2 軸から意思決定項目を構造化したものを示す。Connectivity、Sensitivity とともに値が大きいほど重要な意思決定項目である。よって (1)Sensitivity AND strongly connected に位置する意思決定項目が最も重要である。このような分析により、MM から重要な意思決定項目を抽出し、意思決定項目を少なくすることが可能である。

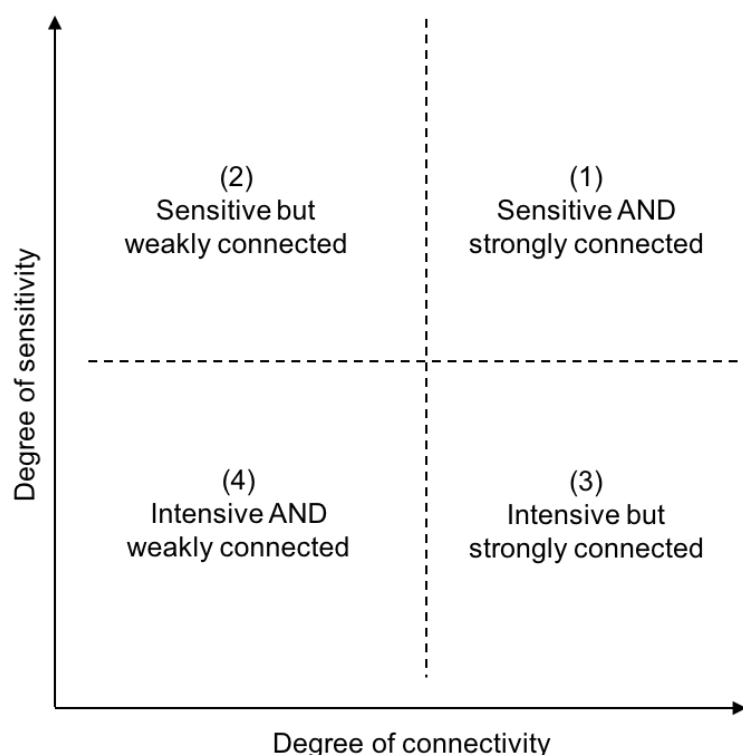


図 6-1 Connectivity と Sensitivity の観点からの意思決定項目の構造化[6]

6.2.4 評価軸に対応した評価値の計算について

本研究では2種類の評価値の計算方法について説明した。

一つ目の方法は、シミュレータによる方法である。この方法では、評価値をより正確に計算でき、属人性を低減させるというメリットがある。デメリットとしては、シミュレータの作成に手間がかかることと、MMが大きくなった時に全ての意思決定項目を考慮できるシミュレータの作成が難しいことが挙げられる。

二つ目の方法は、MMの各セルに特性値を設定し、総和または総積により計算を行う方法である。この特性値の設定には属人性があり、適切な値を設定することに難しさがある。より合理的に特性値を設定する方法としては、アンケートや階層分析法(AHP)[64]、ISM法[65]などが考えられる。

6.3 海事クラスター内の利害関係者に応じた自律船の設計

第 5 章のケーススタディを通して、各利害関係者の立場からみた適切な自律船の設計案を算出した。表 5-22 からわかるように、適切な設計案は利害関係者ごとに異なることがわかった。これを踏まえ、自律船プロジェクトはどのニーズに寄与し、利害関係者がどのような ability を求めているかを正確に把握し、それらに応じた設計をすることが重要であると言える。

6.4 自律船の設計フローの意思決定における貢献

サイモンによれば、意思決定問題に使われる手続きは以下の 3 つにまとめることができる [66]。

1. 最適な選択の代わりに満足 of いく選択を求める
2. 抽象的で大域的な目標を、観察され測定されうるような下位目標に置き換える
3. 意思決定の仕事を多くの専門家の間に分割し、それらを伝達機構と権威構造とで調整する

1 について、提案する自律船の設計フローでは、各利害関係者の立場からパレート最適解を計算し、表 5-21 に示したように、膨大な自律船の設計案の候補をパレート最適解のみに絞ることに成功している。

2 について、各利害関係者のニーズを明確にし、評価軸を定義することで、目標を測定することを可能にした。また、自律船の設計案の候補は抽象的であり、さらに大域的であるが、3.5、3.6 に示した OPM の作成により、その選択を Form のみに絞っている。

3 について、6.2.1 で示したように、手続き的な部分と属人的な部分に分割し、属人的な部分を専門家の間での議論により解決を図っている。

以上より、これら 1、2、3 の点で意思決定について支援していることが確認できた。

第7章 結論

7.1 結論	91
7.2 今後の展望	91

7.1 結論

本研究では、複数の利害関係者が自律船の設計について意思決定する際の支援として、利害関係者ごとに異なるニーズを明確に記述し、モデルベースで性能を見積もることで、優れた自律船のコンセプト設計案を検討するフローを提案した。

具体的には、Systems Approach を用いて自律船コンセプトの設計フローを提案し、実証した。利害関係者ごとのニーズを SVN を用いて明らかにし、ニーズに基づき自律船の性能を評価する評価軸を決定した。次に、ニーズから OPM を用いて既存船舶に関わる Function と Form をマッピングし、自律船コンセプト設計における意思決定項目を MM として表現した。意思決定項目の組み合わせとして表現される自律船コンセプトを、選択した評価軸に基づき評価し、パレート最適なコンセプトを算出した。MUNIN や ReVolt などの既存の自律船コンセプトを評価することで、提案する自律船の設計フローが機能することを確認した。

7.2 今後の展望

今後の展望としては以下の 2 点に取り組みたい。

- MM における重要な意思決定項目の抽出
- 評価軸に対応した評価値の計算方法の検討

1 点目においては、6.2.3 に記述した方法を用いて、重要な意思決定項目を抽出することが可能である。2 点目については、シミュレータを高度化する方法や 6.2.4 に記述した方法によって取り組みたい。

謝辞

本研究を進めるにあたって、多くの方々にご助力を頂きました。ここに感謝の意を述べさせていただきます。

指導教員である東京大学大学院新領域創成科学研究科人間環境学専攻 准教授 稗方 和夫先生には、学部4年生から大学院の2年間に渡る計3年間という長い間ご指導いただきました。先生からは、自律船に関する知識や Systems Approach といった技術的な話のみならず、論文の組み立て方や論理の展開の仕方といった今後の人生においても必要とされる考え方について学ばせて頂きました。また、先生の知識の深さ・広さ、そして応用力・発展力には驚かされました。今後は先生から教えていただいたことを糧に、さらなる飛躍を遂げて行きたいと思えます。ご指導ありがとうございました。深く感謝いたします。

東京大学大学院新領域創成科学研究科人間環境学専攻 特任准教授 Bryan R Moser 先生には、Systems Approach・Systems thinking の考え方を学ばせて頂きました。また、GTL(Global Teamwork Lab)の活動を通し、国際的な視野を広げることができ、自分の将来を考える上でも良い勉強になりました。加えて、私が学部4年生の時、マサチューセッツ工科大学(MIT)に訪問した際には、現地での生活の面倒や文化の紹介など大変お世話になりました。深く感謝いたします。

東京大学大学院工学系研究科システム創成学専攻 准教授 白山晋先生には、設計工学研究室合同輪講などご指導ご鞭撻を頂きました。自分にはなかった視点から鋭いご指摘をいただくことがあり、よい研究を進めることができました。深く感謝いたします。

東京大学大学院工学系研究科システム創成学専攻 助教 満行泰河先生には、学部の時よりきめ細やかな指導を頂きました。おそらく指導に要する時間・労力は相当なもので多忙にもかかわらず、これほど質の良い指導を受けることができた自分を幸運に思います。先生のおかげで自分の未熟さ、至らなさを実感でき、研究に対する基本的な姿勢、考え方を身に付けることができました。ご指導ありがとうございました。深く感謝いたします。

東京大学大学院工学系研究科システム創成学専攻 准教授 村山英晶先生には MTI と

の共同研究においていくつかの重要なアドバイス、ご指摘を頂きました。先生のご指導のおかげでより良い修論を書き上げることができました。深く感謝いたします。

東京大学大学院新領域創成科学研究科 非常勤講師 兼 NASA ジェット推進研究システムズエンジニア 石松拓人様には、学部4年、修士1年次に輪講やMIT訪問時にお世話になりました。普段の輪講で受けるフィードバックとは全く異なる観点からのご指摘を頂き、研究の幅を広げることができました。深く感謝いたします。

東京大学大学院工学系研究科システム創成学専攻 技術専門員 榎本晶一様には、研究室のインフラに関するサポートを頂きました。また、東京海洋大学汐路丸における乗船実習の際には、船酔いで動けない私に代わって数々の有用なデータを集めて頂きました。深く感謝いたします。

秘書の山本和子様、大塚朋子様、鮫島文子様には、研究室の事務手続きなどを行っていただき、研究に打ち込める環境を用意していただきました。時に優しく励まして頂き、皆様のお気遣いのおかげで、楽しく研究生活を送ることができました。深く感謝いたします。

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所(海空研) 理事長 大和裕幸様には、私が学部4年次には、東京大学大学院新領域創成科学研究科人環境学専攻の教授として研究活動・研究者としての心構えなど多くのご指導を賜りました。また、修士在籍時にも、講演会などでお会いする機会があり、研究状況を気にかけていただきました。先生からは研究に対する姿勢のみならず、今後の人生においても活かしていける数多くの考え方を学びました。深く感謝いたします。

株式会社MTIの安藤英幸様、石井智憲様、木村文陽様、渡邊大地様には、日々の業務でお忙しいところ、研究に関する数多くのアドバイスを頂きました。実務に携わる皆様のご指摘は参考にするとところが多く大変有用でありました。深く感謝いたします。

研究室の卒業生である孫晶鈺様、中村覚様、齋藤智輝様、廣井貴彬様、松原洸也様、上野隆治様、後藤拓矢様には、輪講でのフィードバックなどを通して、研究に対する数々のアドバイスを頂きました。また、研究室生活以外においても多くの場面でお世話になり、先輩とし

であるべき姿を学びました。孫様には、研究に関する基礎的な考え方・論の組み立て方を教わりました。中村様には、自分が行き詰まった時によく相談にのっていただきました。齋藤様にはプログラミングなど技術的な知識を教えていただきました。廣井様には、物事を粘り強く続けることの重要性を教えていただきました。松原様には、弱音を吐かない強さを教えていただきました。上野様には、他人を慮ることの大切さを教えていただきました。後藤様には、物事を正確に確実に行うことの大切さを教えていただきました。深く感謝いたします。

研究室の先輩である岡田伊策様、笈田佳彰様、和中真之介様、水林義博様、馬目信人様には、私が研究に行き詰まった時に数多くのご助言を頂きました。また、研究以外に関するプライベート面でもお世話になりました。特に自分が病気の際に、助けていただいたことは忘れません。岡田様には、差し入れなどを通して、私の研究室生活をサポートしていただきました。笈田様には、社会人としての考え方や姿勢を教わりました。和中様には、頼り甲斐のある先輩として、決断の大事さを教わりました。水林様には、普段の研究室生活ではいただけない新たな視点からのアドバイスをいただきました。馬目様には、よく相談にのっていただき、自分の進路を考える上で大変助かりました。深く感謝いたします。

研究室の同輩である岡田航太様には、普段の研究室生活において非常に良い刺激を頂きました。研究のみならず研究室に運営に関わる仕事でもお世話になりました。3年間という期間を同じ目標に向かって進めたことは光栄です。今後は別々の道に進みますが、お互いの活躍を祈念しています。ありがとうございました。

研究室の後輩である石原祥太郎様、宇野健介様、王汝佳様には、研究室運営に関わる多くの仕事を担っていただき、研究に集中できるようサポートしていただきました。また、逆に皆様から学ぶことも多く、刺激を受けました。石原様には、そのストイックな姿勢から多くの刺激を受けました。宇野様は、研究室を明るく盛り上げてくれ、おかげで楽しく研究室生活を送ることができました。王様は、私の話し相手になってくれ、おかげで楽しい時間を過ごすことができました。ありがとうございました、深く感謝いたします。

学部4年生の小沢健悟様、三浦笑峰様には、同時期に研究に取り組む仲間として数多くの刺激を受けました。お二方のおかげで、自分も良い緊張感の中で修論に取り組めたと思います。小沢様には、共通の趣味である音楽の話題ができ、楽しく時間を過ごすことができました。

た。三浦様には、持ち前の明るさで、研究室を盛り上げていただきました。深く感謝いたします。

また、神庭広希様、留学生の韩旭様、Yuling Liu 様、Nat Hengsadeeikul 様、Yuanyuan Qin 様には、研究生生活を通して、国際的な視点や考え方を教わりました。深く感謝いたします。

東京海洋大学 教授 庄司るり先生には東京海洋大学練習船汐路丸への乗船実習の際に大変お世話になりました。また、研究のために AIS データをご提供いただきました。ありがとうございました。深く感謝いたします。

最後になりましたが、大学院生活を実りあるものにしてくれた多くの友人と家族に感謝します。またどこかでお会いしましょう。本当にありがとうございました。

2017 年 2 月 8 日

伊藤航大

参考文献

- [1]. 国土交通省：内航・外航船員の確保・育成，
<<http://www.mlit.go.jp/common/001053848.pdf>>, Accessed on Nov. 28th 2017.
- [2]. 日本内航海運組合総連合会：船員対策，<<http://www.naikokaiun.or.jp/union/union09.html>>, Accessed on Nov. 28th 2017.
- [3]. Burmeister H-C, Bruhn W. C, and Rødseth, Ø. J.: Can unmanned ships improve navigational safety? Proceedings of the transport research arena, Paris, France, 2014.
- [4]. Rødseth Ø and Burmeister H-C: Developments towards the unmanned ship. Proceedings of International Symposium Information Ships - ISIS, Hamburg, Germany, 2012.
- [5]. 中野文平：システムズ・アプローチとは何か，オペレーションズ・リサーチ:経営の科学, Vol. 33, No. 7, 1988-7, pp. 301-304.
- [6]. Simmons W-L: A Framework for Decision Support in Systems Architecting, Doctoral thesis, Department of Aeronautics and Astronautics, Massachusetts Institute of Technology, 2008.
- [7]. Rolls-Royce AAWA: Remote and Autonomous Ships The next steps, <<http://www.rolls-royce.com/~media/Files/R/Rolls-Royce/documents/customers/marine/ship-intel/aawa-whitepaper-210616.pdf>>, Accessed on Dec. 23th 2017.
- [8]. MUNIN: Research in maritime autonomous systems project results and technology potentials, < <http://www.unmanned-ship.org/munin/wp-content/uploads/2016/02/MUNIN-final-brochure.pdf> >, Accessed on Dec. 23th 2017.
- [9]. DNV-GL: The ReVolt A new inspirational ship concept, <<https://www.dnvgl.com/technology-innovation/revolt/index.html>>, Accessed on Jan. 3th 2018.
- [10]. 福戸淳司：自律船研究の動向，日本船舶海洋工学会誌 KANRIN (咸臨)，第 72 号, pp. 2-8, 2017.

-
- [11]. 内閣府：未来投資戦略 2017 –Society 5.0 の実現に向けた改革-,
<https://www.kantei.go.jp/jp/singi/keizaisaisei/pdf/miraitousi2017_t.pdf>,
Accessed on Jan. 3th 2018.
- [12]. NFAS (Norwegian Forum for Autonomous Ships), Definitions for
Autonomous Merchant Ships, Available at: <<http://nfas.autonomous-ship.org/resources/autonom-defs.pdf>> Accessed on November 15, 2017.
- [13]. Sheridan T.B, and Verplank W. L, Human and Computer Control for
Undersea Teleoperators. MIT Man-Machine Systems Laboratory, 1978.
- [14]. SINTEF: Safe human interaction with autonomous ships in
Trondheimsfjorden, <
<https://www.sintef.no/globalassets/project/hfc/sarepta/3-safe-human-interaction.pdf>>, Accessed on Dec. 23th 2017.
- [15]. Rødseth Ø.J and Burmeister H.C.: Risk Assessment for an Unmanned
Merchant Ship. TransNav, the International Journal on Marine
Navigation and Safety of Sea Transportation, Vol. 9, No. 3, pp. 357-364,
2015.
- [16]. SAE J3016: Taxonomy and Definitions for Terms Related to On-Road
Motor Vehicle Automated Driving Systems, Revision September 2016,
SAE International, 2016.
- [17]. 鈴木達也: 運転におけるヒューマンファクタの解析~コントローラとしての
のドライバ~, 計測と制御, 第 45 巻, 第 3 号, pp.231-236, 2006.
- [18]. 古 野 電 気 : レーダーの仕組み, <
<https://www.furuno.co.jp/technology/about/radar1.html>>, Accessed on
Dec. 23th 2017.
- [19]. 山田多津人, 田中隆博, 山本淳, 長澤明: AIS による海上交通評価に関する
研究-II :AIS 位置とレーダ位置の比較, 日本航海学会論文集, 第 112 巻,
pp.35-41, 2005.
- [20]. Seliga T.A, High Resolution W-Band Radar Detection and
Characterisation of Aircraft Wake Vortices in Precipitaion, In WakeNet3-
Europe/Greenwake dedicated workshop on Waje vortex & wind
monitoring sensors in all weather conditions, 2010.
-

-
- [21]. Pastore T.J, Patrikalakis A.N: Laser Scanners for Autonomous Surface Vessels in Harbor Protection: Analysis and Experimental Results, Proc. of the 2010 International Waterside Security Conference, pp. 1-6, 2010.
- [22]. Halterman R, Bruch M: Velodyne HDL64E LIDAR for Unmanned Surface Vehicle Obstacle Detection, SPIE Proc. 7692: Unmanned Systems Technology XII, Orlando, FL, April 2010.
- [23]. Stark B, McGee M, and Chen Y: Short Wave Infrared (SWIR) Imaging Systems Using Small Unmanned Aerial Systems (sUAS), Proc. of the 2015 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), pp.495-501, 2015.
- [24]. 古 野 電 気 : AIS の 仕 組 み ,
<<https://www.furuno.co.jp/technology/about/ais1.html>>, Accessed on Dec. 23th 2017.
- [25]. IALA, IALA Guidelines on the Universal Automatic Identification System (AIS), Vol. 1, Part I – Operational Issues, ed. 1.1, France, 2002.
- [26]. 株式会社 日本海洋科学, 関根博: 実践航海術 Practical Navigator, 成山堂書店, 2015.
- [27]. 古 野 電 気 : ECDIS 装 備 義 務 化 に つ い て , <
<http://www.furuno.com/jp/merchant/ecdis/carriage/>>, Accessed on Dec. 23th 2017.
- [28]. 岩崎寛希, 原潔: あいまい推論を用いた避航操船モデル, 日本航海学会論文集, 第 75 号, pp. 69-77, 1986.
- [29]. 鶴田 三郎, 松村 尚志, 稲石 正明, 今津 隼馬, 杉崎 昭生: 船舶航行エキスパートシステムの基礎研究 : 衝突回避エキスパートシステム, 日本航海学会論文集, 第 77 巻, pp.133-139, 1987.
- [30]. 福戸淳司, 今津隼馬: 相手船による妨害ゾーン(OZT)を用いた衝突警報の検討, 日本航海学会論文集, 第 128 号, pp.49-53, 2013.
- [31]. 小林英一: ウェザールーティングについて, 日本エンジニアリング学会誌, 第 49 巻, 第 2 号, pp.54-57, 2014.
- [32]. 大津皓平: モデルベースモニタリングと統計的制御, 海文堂出版, 2012.
- [33]. 田丸人意, 庄司るり, 今野作: 船舶の航跡に対するトラッキング制御に関
-

-
- する研究 –AIS・GPS 情報を利用した制御について-, 日本航海学会論文集, 第 129 号, pp.59-65, 2013.
- [34]. 日本海事協会: 疲労センサを使用した LNG 船の船体疲労強度管理システム, ClassNK 研究発表会, 2006.
- [35]. DNV GL: Beyond Condition Monitoring in the Maritime Industry, DNV GL Strategic Research & Innovation Position Paper 6-2014, 2014.
- [36]. Manno G, Statistical analysis of casualty data: a simple method with application on ship machinery systems, 2012-1068, DNV publishing, Oslo, 2012.
- [37]. Manno G, Knutsen K.E, Vartdal B.J: An Importance Measure Approach to System level Condition Monitoring of Ship Machinery Systems, in CM 2014 and MFPT 2014, Manchester, 2014.
- [38]. ClassNK Consulting Service: ClassNK CMAXS, <<http://www.classnkcs.co.jp/cmaxs/>>, Accessed on: Nov 21th 2017.
- [39]. 国土交通省海事局海洋・環境政策課: 船舶ビッグデータによる海事産業の変革に向けた取り組み, <<http://www.mlit.go.jp/common/001097131.pdf>>, Accessed on: Jan 6th 2018.
- [40]. 名古屋港埠頭株式会社: 日本初の自動化コンテナターミナル, <http://www.nptc.co.jp/container/automatedct.html>, Accessed on: Jan 6th 2016.
- [41]. インマルサット株式会社: 次世代型衛星通信による船舶自律航行の可能性, 平成 29 年度第 17 回海上技術安全研究所講演会講演集, 2017.
- [42]. 霜田一将, 渡部翔, 坂利明, 鈴木治: 船舶でのインターネット接続環境の構築と評価—一定額制モバイルデータ通信の効率的な利用—, 日本航海学会論文集, 第 132 号, pp.63-70, 2015.
- [43]. International Maritime Organization (IMO): Maritime Autonomous Surface Ships Proposal for a regulatory scoping exercise, <<https://docs.imo.org/Shared/Download.aspx?did=101921>>, Accessed on Dec. 23th 2017.
- [44]. Eric V-H: The Law of Unmanned Merchant Shipping: An Exploration, The Journal of International Maritime Law Vol. 20, pp.403-423, 2014.
-

-
- [45]. Crawley E, Cameron B, and Seleva D: System Architecture, Boston, the United States of America, PEARSON, 2014.
- [46]. de Weck O.L, Roos D, and Magee C: Engineering Systems Meeting Human Needs in a Complex Technological World, The MIT Press, 2011.
- [47]. Freeman R. E.: Strategic Management: A Stakeholder Approach, Boston, Pitman, 1984.
- [48]. Sutherland T. A: Stakeholder Value Network Analysis for Space-Based Earth Observation, Master's Thesis, Department of Aero nautics and Astronautics & Engineering Systems Division, Massachusetts Institute of Technology, 2009.
- [49]. Dori D: Model-Based Systems Engineering with OPM and SysML, New York, the United States of America, Springer-Verlag, 2016.
- [50]. Zwicky F: Discovery, Invention, Research through the morphological Approach, Macmillan, 1966.
- [51]. Pahl G, Beitz W: Engineering Design A Systematic Approach, Springer, 1995.
- [52]. Buede D.M: The Engineering Design of Systems Modes and Methods, Wiley, 2009.
- [53]. Ritchey T: Modelling Complex Socio-Technical Systems Usin g Morphological Analysis, 2003.
- [54]. Hiekata K, Mitsuyuki T and Ishihara S: Design Method of Remote Monitoring Service for Elderly Considering Community Characteristics, Proc. of the 24th ISPE International Conference on Transdisciplinary Engineering (TE2017), Vol.5, pp.713-720, 2017.
- [55]. 稗方和夫, 満行泰河, 上野隆治, 和田良太, 和中真之介, Bryan Moser. 海事産業における IoT 技術導入の意思決定支援に関する研究, 日本船舶海洋工学会講演論文集, 第 24 号, pp. 735-738, 2017.
- [56]. 渡邊真也: パレート最適解分析のための技術動向, システム/制御/情報, 第 60 巻, 7 号, pp.272-277, 2016.
- [57]. Goodall N.J: Can you program ethics into a self-driving car?, IEEE Spectrum, Vol.53, no.6, pp.28-58, 2016.
-

-
- [58]. Brown A: Reengineering the Naval Ship Concept Design Process, Research to Reality in Ship Systems Engineering Symposium, ASNE, September, 1998.
- [59]. Stopford M, Maritime economics. London: Routledge, 2009.
- [60]. Kretschmann L, Burmeister H-C and Jahn C: Analyzing the economic benefit of unmanned autonomous ships: An exploratory cost-comparison between an autonomous and a conventional bulk carrier, Research in Transportation Business & Management (In press), 2017.
- [61]. 角田領, 大和裕幸, 安藤英幸: シミュレーションによるブリッジチームのパフォーマンス評価手法, 日本船舶海洋工学会論文集, 第 5 号, pp.47-55, 2007.
- [62]. 日鉄海運: 最近の海運市況-中国要因と資源要因-, 大阪一律大学大学院創造都市研究科都市ビジネス専攻アジア・ビジネス研究分野ワークショップ資料, 2005.
- [63]. 森津秀夫: 選好記録からの多属性効用関数の同定に関する研究, 土木計画学研究・論文集, 第 4 巻, pp.157-164, 1986.
- [64]. Saaty, Thomas L.: Relative Measurement and its Generalization in Decision Making: Why Pairwise Comparisons are Central in Mathematics for the Measurement of Intangible Factors - The Analytic Hierarchy/Network Process, RACSAM (Review of the Royal Spanish Academy of Sciences, Series A, Mathematics), Vol.102 No.2, pp.251-318, 2008.
- [65]. W. Malone: An introduction to the application of interpretive structural modeling, Proceedings of the IEEE, Vol.63 No.3, 1975.
- [66]. ハーバート A サイモン: システムの科学 第 3 版(邦訳), パーソナルメディア, 2015.
- [67]. 長谷川和彦, 田代剛, 立川功二: 仮想海上交通センターによる航海支援システム, 関西造船協会講演概要集, 第 16 号, pp.75-79, 2001.
- [68]. 長谷川和彦, 上月明彦: Fuzzy 制御による自動避航システムに関する研究, 関西造船協会誌, 第 205 号, pp.1-10, 1987.
- [69]. 野本謙作: 船の操縦性, 造船協会誌, 第 424 号, pp.794-808, 1964.
-

Appendix

a. 海上交通シミュレータについて

a.1. シミュレータの概要

マルチエージェントシミュレーションを用いて海上交通シミュレータを作成した。シミュレータは 5.5.2 で用いシミュレータは、評価軸に使われる指標に応じてそのアウトプットを変化させる。例えば、評価軸として Operational safety を選択した場合には衝突数をアウトプットに、Economy を選択した場合には航行距離をアウトプットに設定する。シミュレータはエージェント型プログラミング言語である NetLogo を用いて開発した。図 7-1 に東京湾を対象とした海上交通シミュレータを示す。



図 7-1 開発した海上交通シミュレータ

a.2. シミュレーションの流れ

図 7-2 はシミュレーションの流れを示す。まず、エージェントである船舶を作成する。次に、各エージェントに対して、スタートとゴールを設定する。次に1タイムステップ進め、エージェントを動かす。エージェントは現在向いている方向に向かって直進する。次に各エージェントは避航の必要性を周囲の環境から判断する。この避航の判断とその際の避航方法に関しては Appendix, a.4.に記載した。避航の必要がない場合には、エージェントはゴールに向かう。次にエージェントがゴールに到達した場合、または衝突があった場合にはエージェントを削除する。最後に作成したエージェントの総数が閾値に到達したかどうかを判定し、到達した場合にはシミュレーションを終了する。

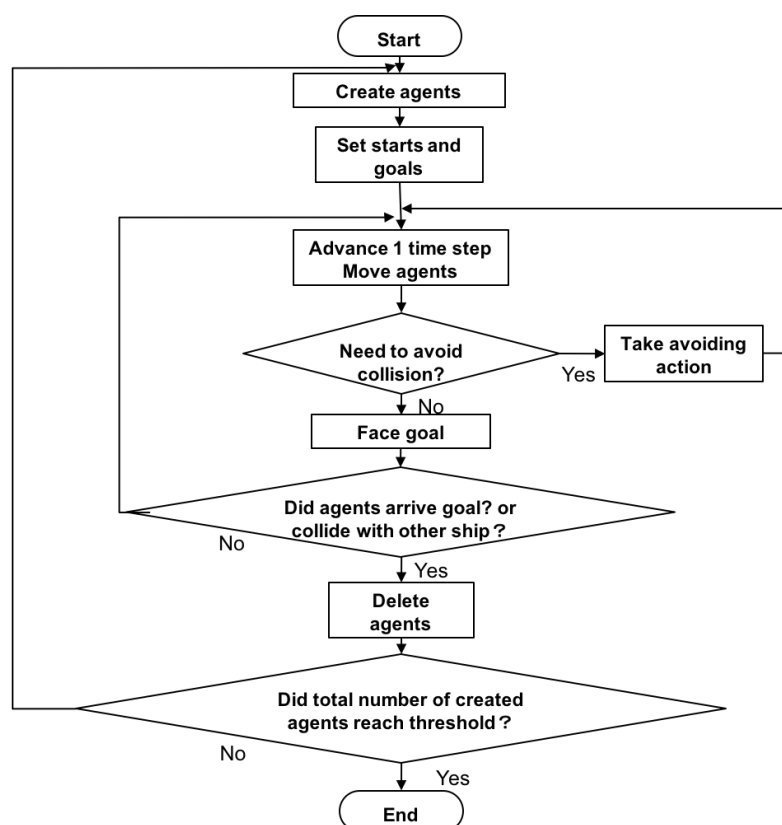


図 7-2 シミュレーションの流れ

a.3. 基本的な航行方法

各船舶は、与えられた航路を航行する。航路はウェイポイントの集合として定義されている。各船舶はウェイポイント間を現在目標としているウェイポイントに向かって直進する。現在目標値としているウェイポイントから次のウェイポイントへの変更のタイミングは、目標としているウェイポイントとの距離が D_w m 以内になったときとする。

a.4. 避航の判断と避航行動

避航の判断には静的な障害物(海岸など)との避航と、他船との避航の 2 種類がある。静的な障害物との避航の場合には、自船から見て D_s m 以内に障害物が存在する場合には右に 10 度変針する。

他船との避航の判断には TCPA と DCPA を用いる。TCPA・DCPA の計算について、領域内に多数の船舶が存在した場合には、存在する船舶の全ペアにおいて TCPA・DCPA を計算する必要があるが、計算量の削減のため、自船の周囲 R m 内に存在する他船との TCPA・DCPA を計算することとした。TCPA・DCPA は下式により計算する[66]。

$$\text{TCPA} = \frac{D(V_0 \cos \alpha + V_t \cos \beta)}{\sqrt{V_0^2 + V_t^2 + 2V_0 V_t \cos(\alpha - \beta)}} [\text{sec}] \quad (7.1)$$

$$\text{DCPA} = \frac{D|V_0 \sin \alpha + V_t \sin \beta|}{\sqrt{V_0^2 + V_t^2 + 2V_0 V_t \cos(\alpha - \beta)}} [m] \quad (7.2)$$

なお、 V_0 : 自船の速力[m/sec], V_t : 相手船の速力[m/sec], D : 2 船間の距離[m], α : 自船からみた相手船の相対方位角, β : 相手船からみた自船の相対方位角である。

岩崎ら[28]の手法に基づき、TCPA・DCPA がともに NM(Negative Medium: 時間的にほとんど余裕がない)となった時に 30 度変針を行う。このときの TCPA・DCPA をそれぞれ $\min \text{TCPA}, \min \text{DCPA}$ とする。変針時の方向は最接近点における見合い角[68]に応じて右・左を決定する。自船の進行方向を 0 度とし、時計回りを正とした場合に、他船が 135 度から 180 度の領域に存在すれば左変針を行い、速度を現在の半分に減速する。それ以外の場合には右変針を行う。

a.4. 船舶の運動

船舶の運動には KT モデルを用いた. KT モデルは野本らによって提案された船舶の運動モデルである[69]. r は角速度, δ は舵角, K, T は操縦性指数であり船型などに応じて決定される. 各船舶は周囲の環境に応じて舵角 δ を決定し, 式(7.3)に基づいて角速度 r が決定される.

$$T\dot{r} + r = K\delta \quad (7.3)$$