

1DCAE・MBDシンポジウム2022

# 自動運航船および社会実装メカニズムの モデルベース設計手法に関する研究

---

Study on Model-Based Design Methodology of Autonomous Vessels and its Implementation Mechanisms

○中島 拓也, 村山 英晶

東京大学大学院新領域創成科学研究科



# 目次

## 1. 背景

1. 海事業界におけるMBSEとMBDの必要性
2. 自動運航船（無人運航船）への期待
3. MBSE/MBDを用いた自動運航船の開発における課題

## 2. 目的

1. 自動運航船および社会実装メカニズムのモデルベース設計手法の提案
2. 要求抽出・価値評価のためのモデルの組み合わせ

## 3. 手法・結果

1. 産業メカニズム検討シミュレータ
2. 航行ルール検討シミュレータ

## 4. まとめ

# 海事業界におけるMBSEとMBDの必要性

## 船舶システムへのニーズの変化と複雑化

- 近年の情報通信技術の進化，環境規制の強化，またシステムと人の関わりの変化などにより，システムに求められるニーズが大きく変化，それらに伴いシステムは**複雑化**（＝多くの機構の組合せ，構成要素間相互作用）
- 船舶：脱炭素船，自動運航船，設計・製造プロセスにおける生産性確保



## モデルベース・システムズエンジニアリング（MBSE）とモデルベース開発（MBD）

- MBSE：社会の変化やステークホルダのニーズを的確にとらえ，対象システム全体を俯瞰して要求や機能を抽出することで，分野横断で統合的な設計・開発を実現 [INCOSE, 2015]
- MBD：製品や構成要素の機能を数値モデルとして表現し，シミュレーションによって動作を繰り返し確認することで，設計・開発・検証にかかる手間の大幅な短縮・削減

ニーズを満たす複雑システム設計・開発，およびそのスピード感を持った実現

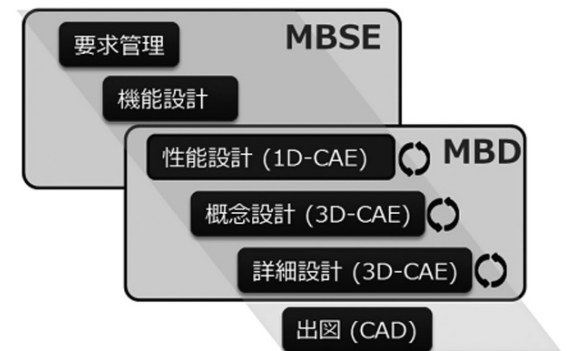
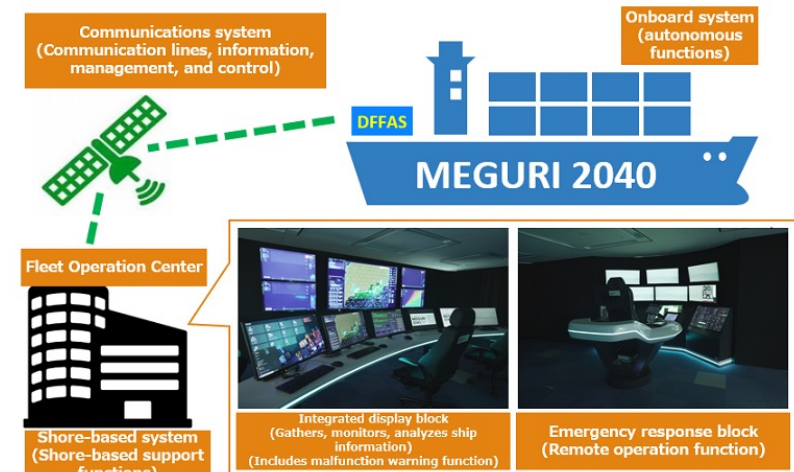


Fig. 2 Front-Loading process

出所) 工藤 (2018)

# 自動運航船（無人運航船）への期待

- 海事産業の課題に対する重要なソリューション
  - 船舶事故の8-9割を占めるヒューマンエラーの低減（海上安全）
  - 船員不足の解消・働き方改革
  - 離島など生活航路の維持（輸送基盤維持）
  - 運航の効率化，設計自由度拡大（産業競争力強化）
- 日本財団の無人運航船プロジェクト「MEGURI2040」
  - 世界に先駆けて内航船における無人運航の実証試験を成功  
 （2025年：高度自律運航開始，2040年：内航船5割無人化）

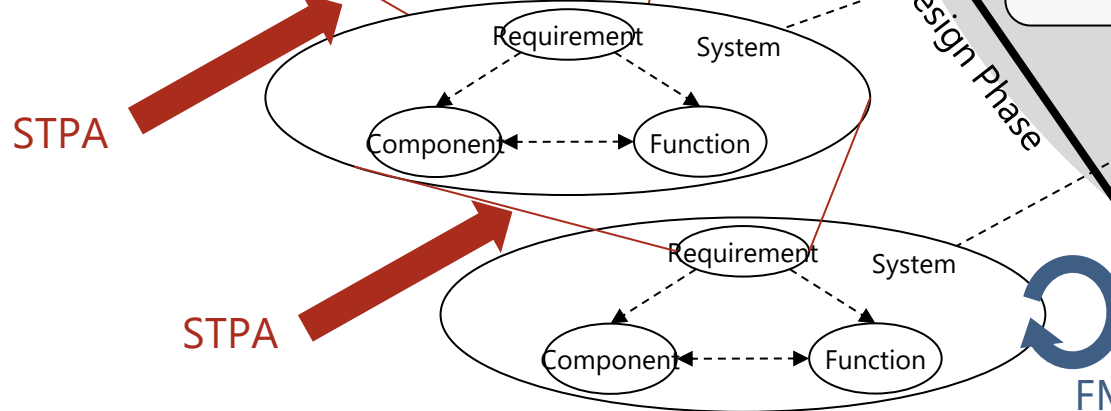
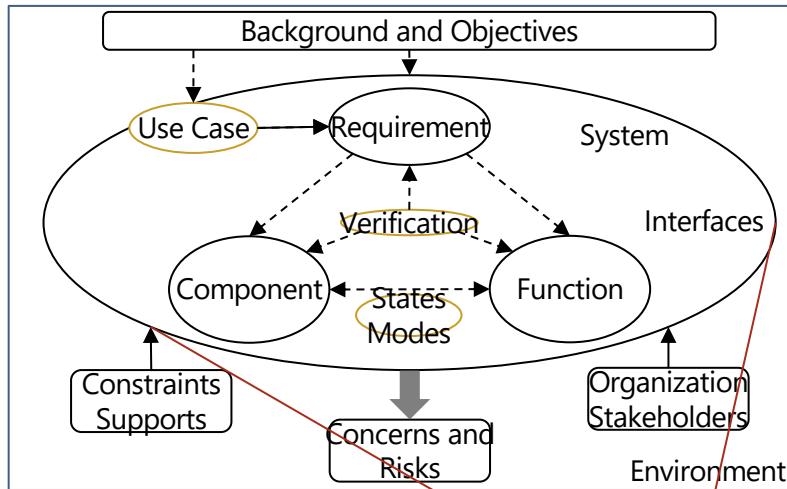


# MBSE/MBDを用いた自動運航船の開発の実施

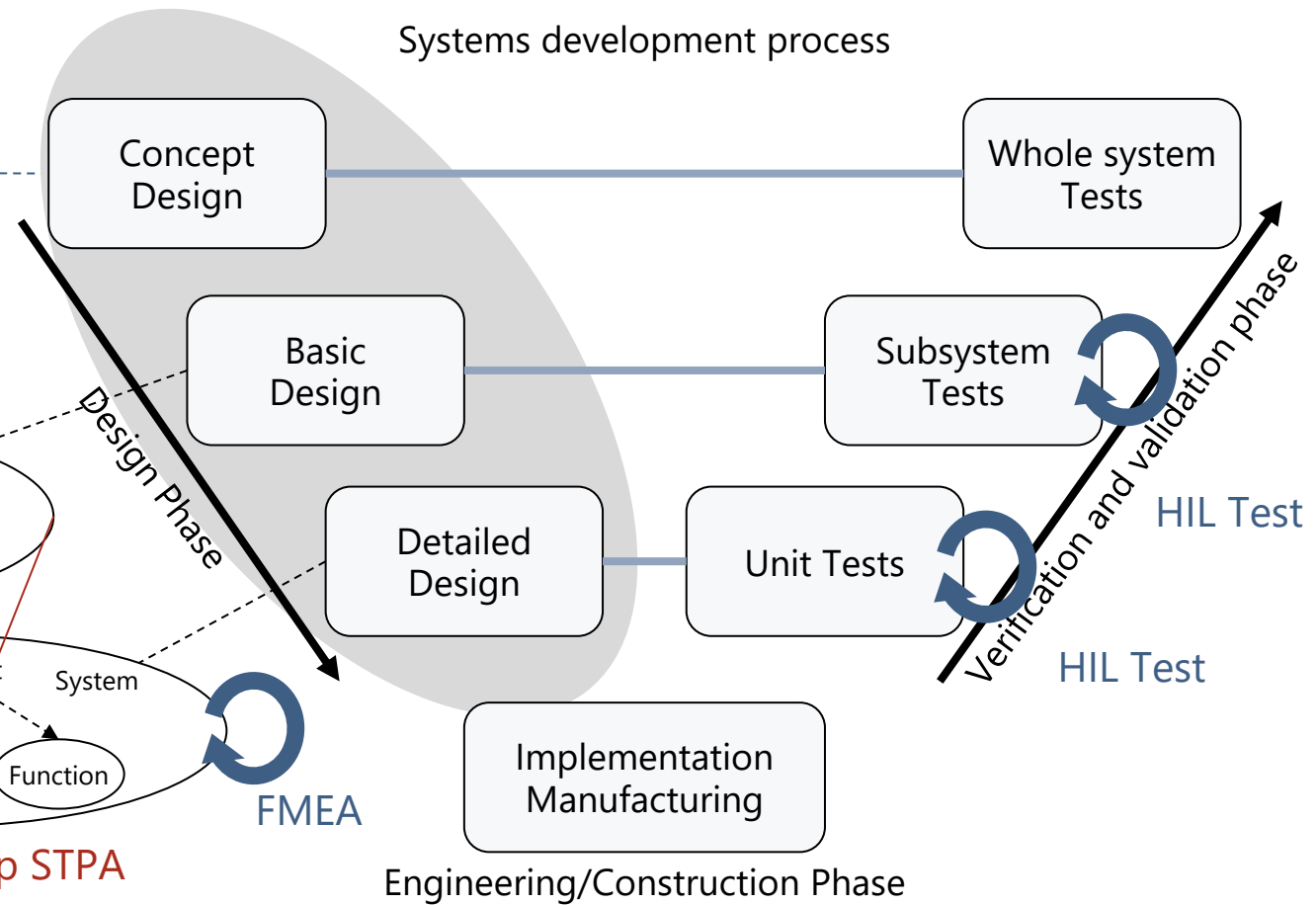
- 階層間でのシステム特性等の連続性担保, 関係者間の認識共有のため, MBSE/MBDを採用.
- 段階的なSTPAを用いて, 上流～詳細まで連続性を持たせた安全要求抽出プロセスを体系化.



ConOps Reference Model



Requirement elicitation by step-by-step STPA



Engineering/Construction Phase

# MBSE (MBD) を用いた自動運航船の開発における課題

## 課題①：適切な要求設定

- MBSEのアプローチで肝となるのが、ユースケースの想定やさまざまな制約を踏まえたシステム要求の抽出。
- 取り巻く制度やインフラの変化が想定される中で、どのように要求を定義すればよいのか難しい。
- 技術の社会実装には、産業・社会システム設計の視点も必須。

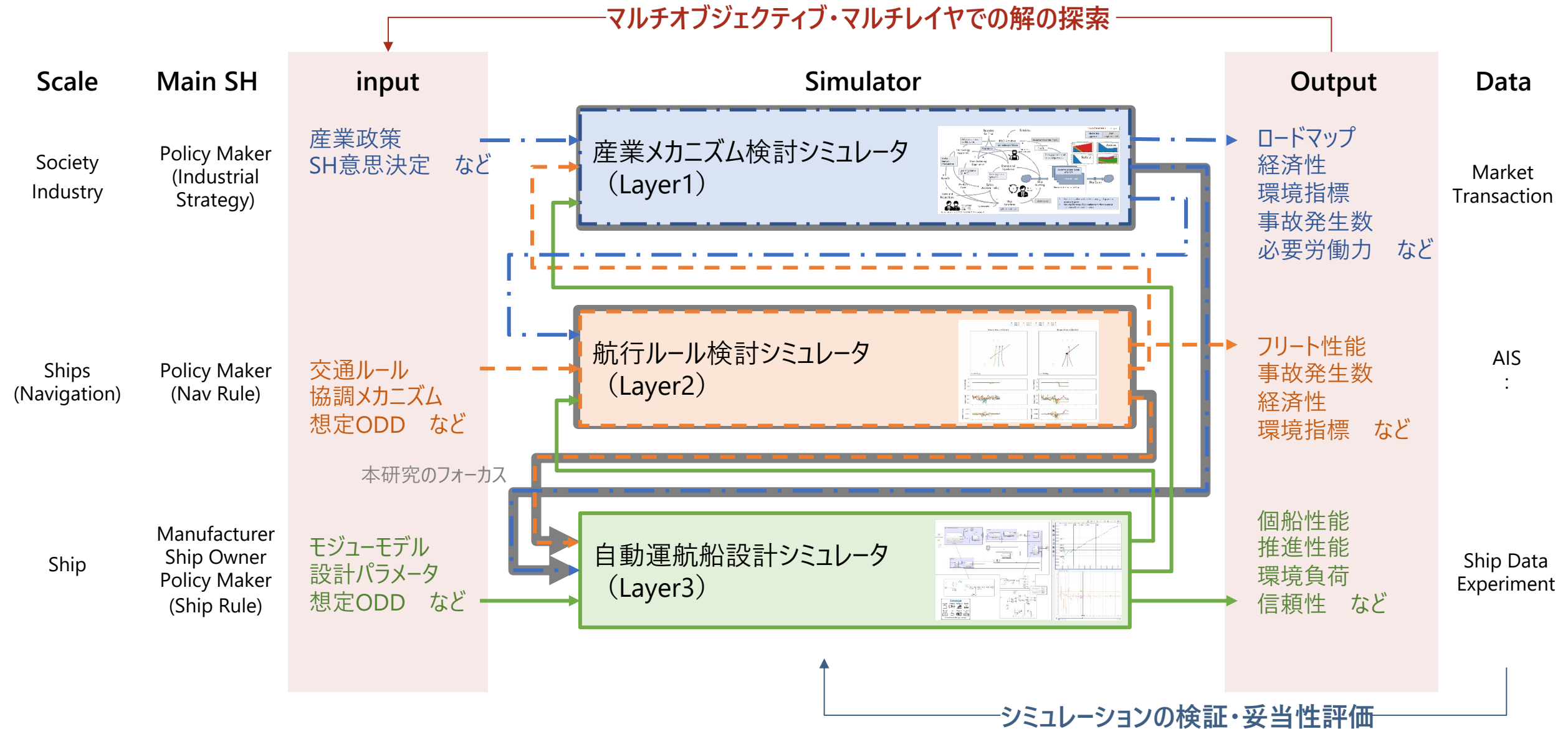
→ 自動運航システムの設計は、それを取り巻く法制度や産業構造の設計と一体的に進める必要がある

## 課題②：要求に沿った開発・検証

- 要求から機能を抽出し、機能を満たすよう構成するプロセスは属人的。 [吉川, 2020]
- システムの創発的機能の意図的な設計・制御は困難（特に安全性）。
- 従来のMBSEは表現（記述）モデルによる設計，これでは検証との不連続性も問題視。 [Durst et al. (2022)]

→ 自動運航のモデルベース設計・検証を実現するためには、数値モデルを活用したMBSEの拡張が求められる

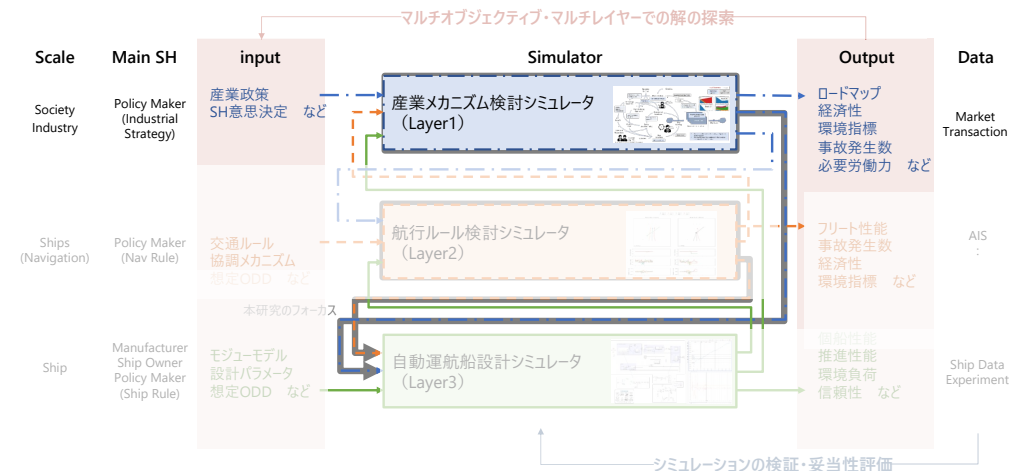
# 自動運航船および社会実装メカニズムのモデルベース設計手法の提案



# Layer 1 自動運航船の社会実装に向けた産業メカニズム設計

自動運航船の社会実装を促進するための産業メカニズムを検討するためのシミュレータを構築する。

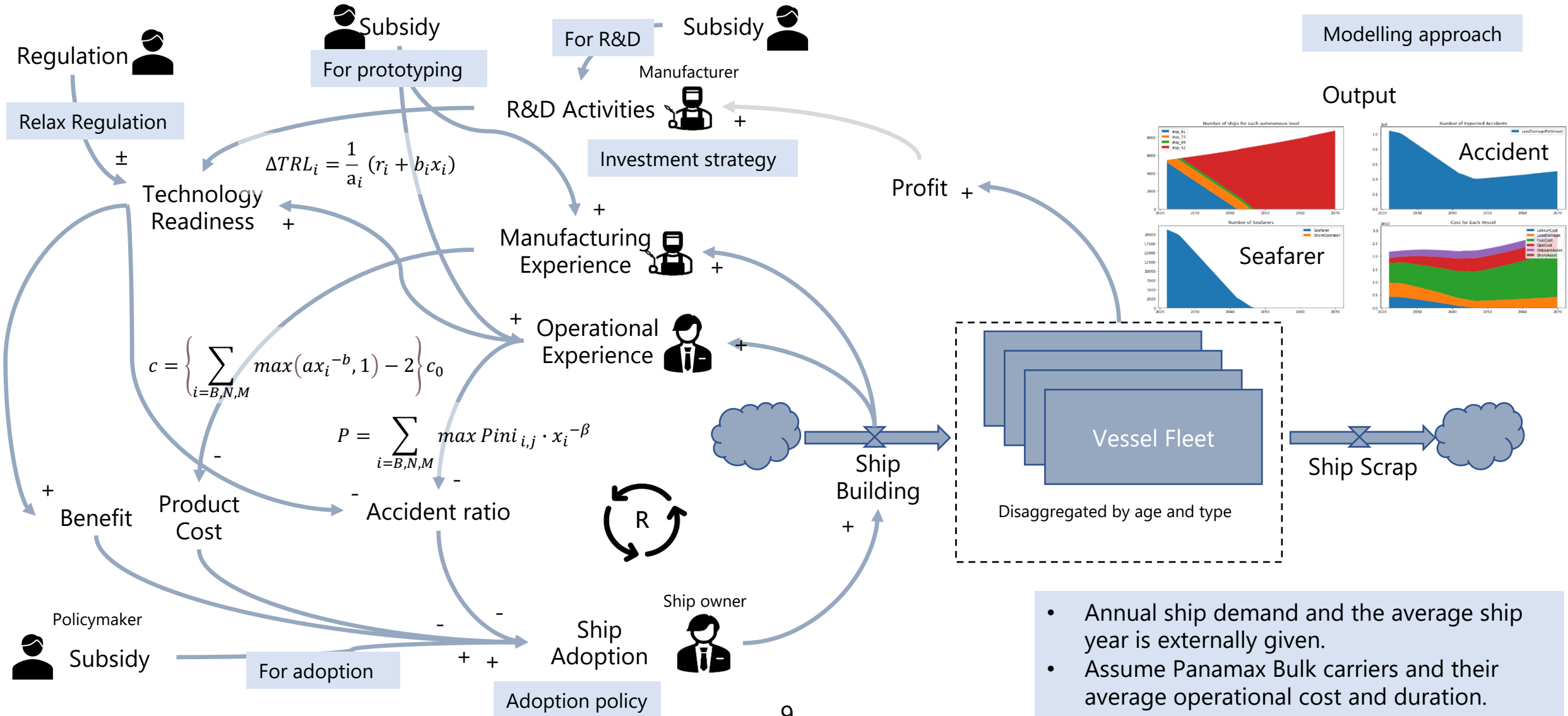
互いに相互作用を持つ政策立案者の補助金・規制， 研究開発投資戦略， 船主の採用基準など， 自動運航船の導入に関わる重要なステークホルダの適切な意思決定の組合せを明らかにすることを目的とする。





# 自動運航船の導入を表現した産業構造モデルの構築

- 外部からの補助金や補助事業，規制緩和の導入による，自動運航船（複数タイプ）の導入促進効果を評価



- Annual ship demand and the average ship year is externally given.
- Assume Panamax Bulk carriers and their average operational cost and duration.

# 想定する自動化技術と自動運航船の種類

- 自動化技術：離着棧（Berthing），航行（Navigation），船体・機関監視（Monitoring）を想定<sup>1)</sup>
  - Navigationに関しては，開発状況を考慮して半自動化（Semi-autonomous）のオプション
- 船社が新造船の採用を判断する時点で，12種類の船タイプから選定
  - 総コストと事故損失予測値，およびその重みによって選定されるものと仮定

## Technology type, level and example

Technology Type	Level	Example of technology and equipment <sup>1)</sup>
Berthing	Full	Visual Sensors, LDR / LRS, Weather Buoy, Autonomous Tugboat, Automatic Mooring
Navigation	Semi	LiDAR, Shore Control Center (SCC), Situation Awareness
	Full	Efficient Scheduling, Motion Control, Collision Avoidance
Monitoring	Full	Machinery & Hull Sensors, Shore Monitoring Center (SMC), Digital Twin

1) Devaraju et al., International Conference on Computational Logistics. Springer, Cham, 2018.

## Ship configuration and each technology type. (0: Not automated, 1: Semi-autonomous, 2: Fully autonomous)

Technology Type	NONE	B	N1	N2	M	BN1	BN2	BM	N1M	N2M	BN1M	FULL
Berthing	0	2	0	0	0	2	2	2	0	0	2	2
Navigation	0	0	1	2	0	1	2	0	1	2	1	2
Monitoring	0	0	0	0	2	0	0	2	2	2	2	2

# 意思決定項目・シミュレーションの評価基準の設定

## 意思決定項目 (AD: Architectural decisions)

AD	Description	Option1	Option2	Option3	Option4
AD1	補助金 (政策決定者)	For R&D activities	+ Adoption	+ Prototyping	
AD2	規制 (政策決定者)	As-is	Relaxation		
AD3	投資戦略 (製造者)	Covering all technologies	Focusing on Berthing	Focusing on Navigation	Focusing on Monitoring
AD4	採用戦略 (船主)	Safety oriented	Profit oriented		

## 評価指標 (PM: Performance Metrics = Figure of Merit)

No.	PM (Goal)	Description	Misc
PM1	導入時期	The year of the first unmanned ship is adopted (The year of the first autonomous ship is adopted)	Highly autonomous ship will be introduced by 2025 (MLIT)
PM2	利益・ROI	Amount of industrial profit during simulation period (or ROI of investment or subsidy)	Assume as a difference from the conventional ship
PM3	安全	Amount of possible maritime accidents during simulation period	
PM4	船員数	Total Number of Seafarers	

The appropriate set of weights will be discussed among stakeholders. (By using the simulator)

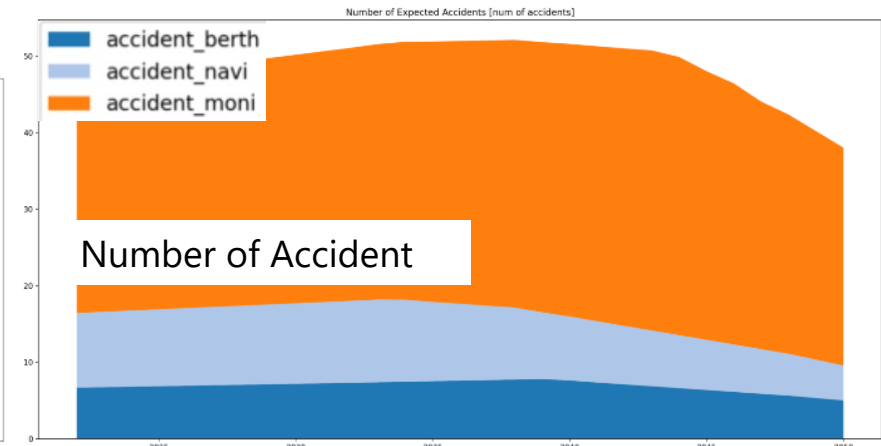
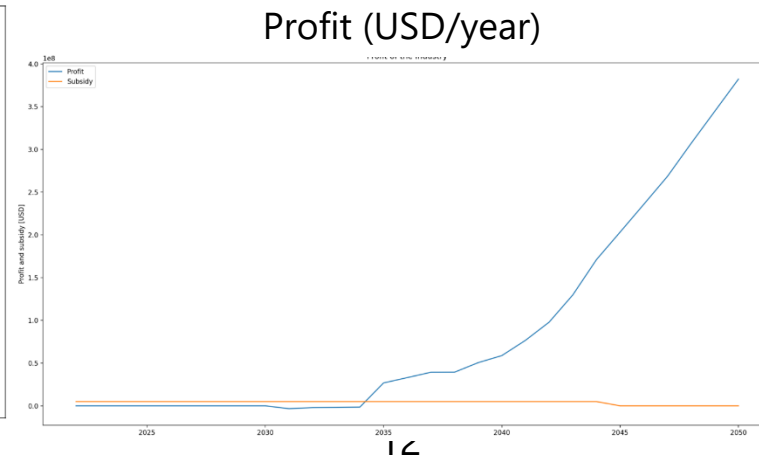
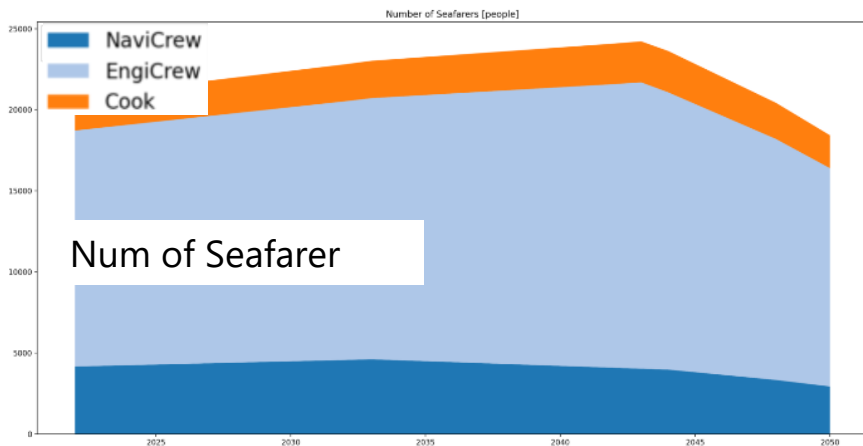
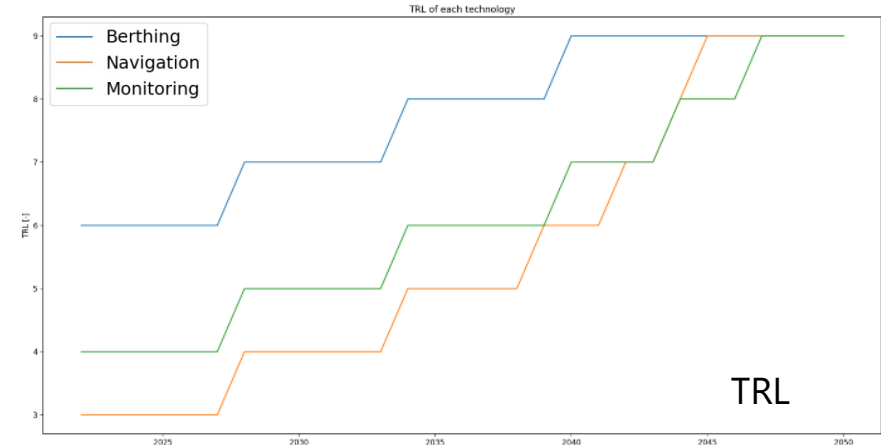
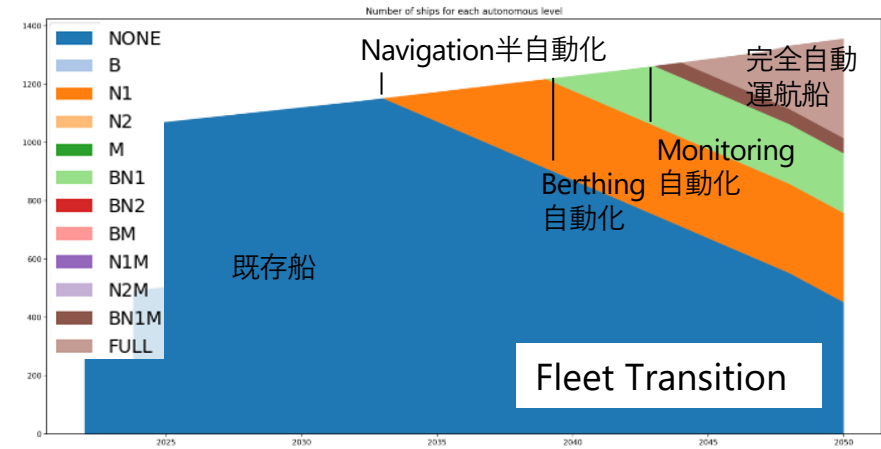
# シミュレーション結果 (Base Case)

## Simulation Setting

Item	Decision
Subsidy for R&D (USD/year)	5M
Subsidy for Adoption (USD/year)	0
Subsidy for Prototyping (USD/year)	0
Regulation (minimum TRL)	8
Investment Strategy	All
Ship Owners' assumed accident loss (USD/case)	34M

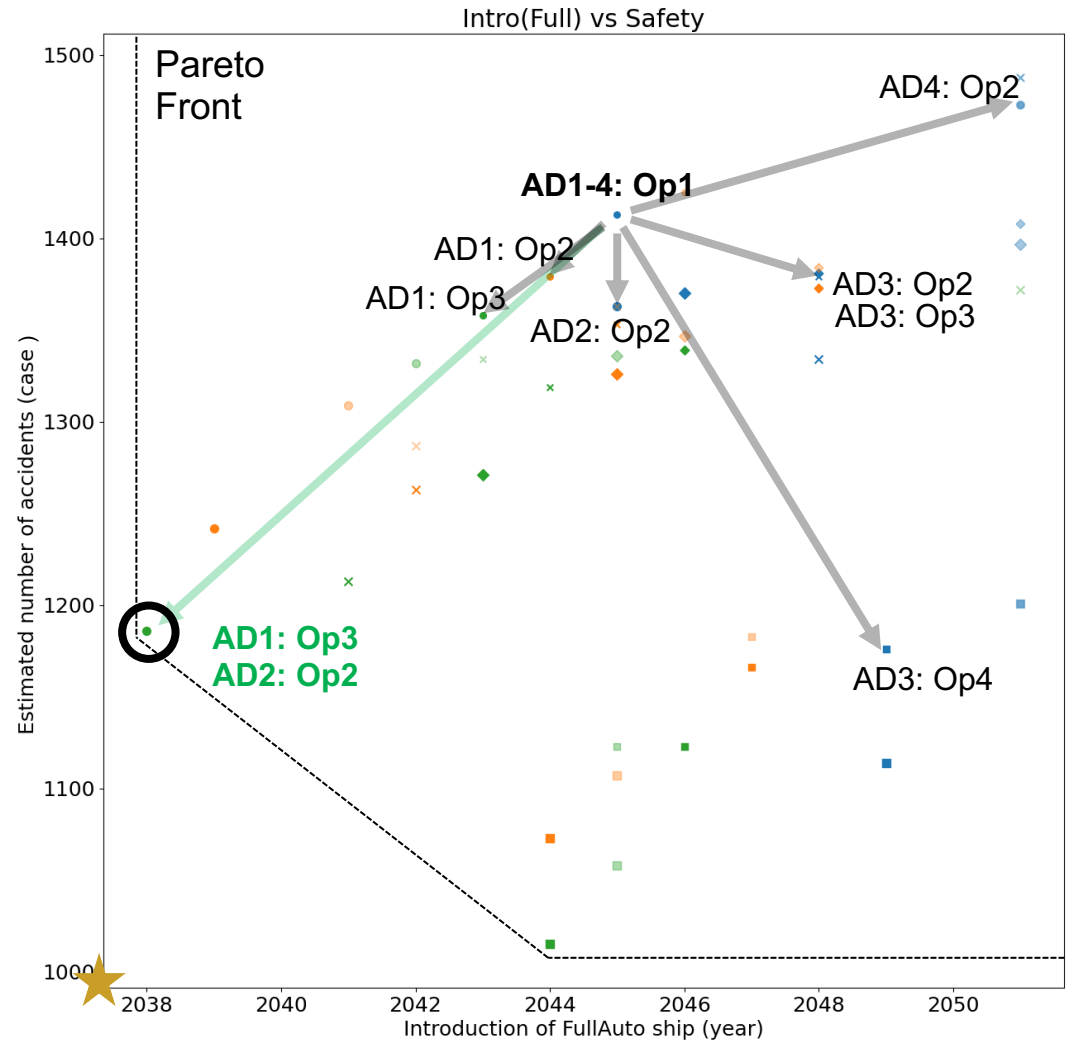
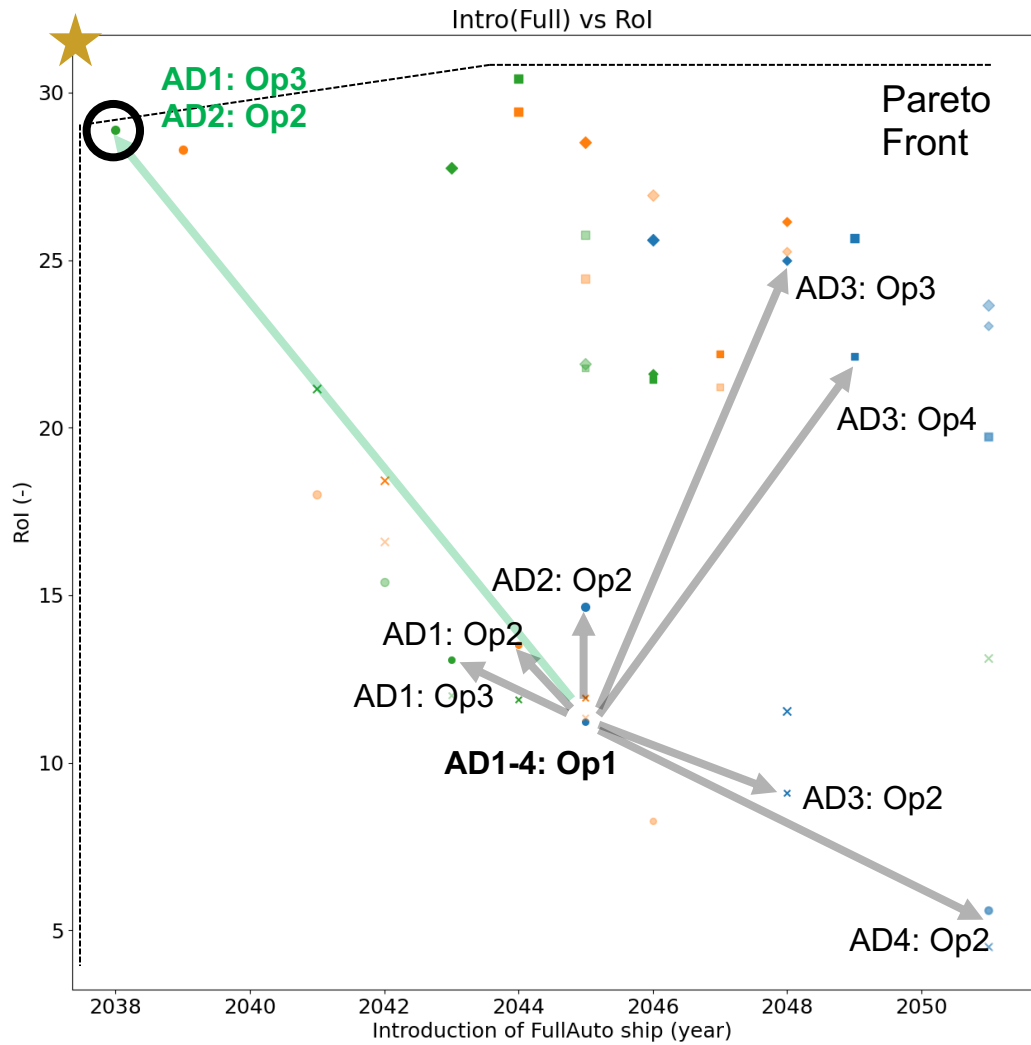
## Simulation Results

Item	Result
Full Autonomous Ship introduction (year)	2045
Total Profit (USD)	1458M
Total Investment for R&D (incl. Subsidy) (USD)	260M
Total Subsidy (USD)	130M
ROI (Total)	5.6
ROI (Subsidy)	11.2



# シミュレーション結果 (全ケース)

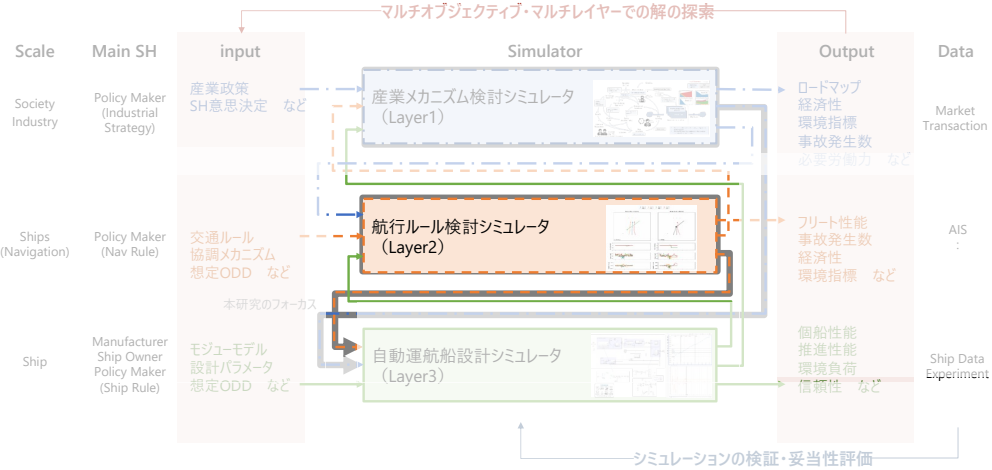
AD1	AD2	AD3	AD4
● Op1: R&D	● Op1: Asis	● Op1: All	● Op1: Safety
● Op2: Ado	● Op2: Relax	× Op2: Berth	● Op2: Profit
● Op3: Exp		◆ Op3: Navi	★ Utopia
		■ Op4: Moni	



# Layer 2 航行シミュレーションによる船舶への要求抽出・ルール検討

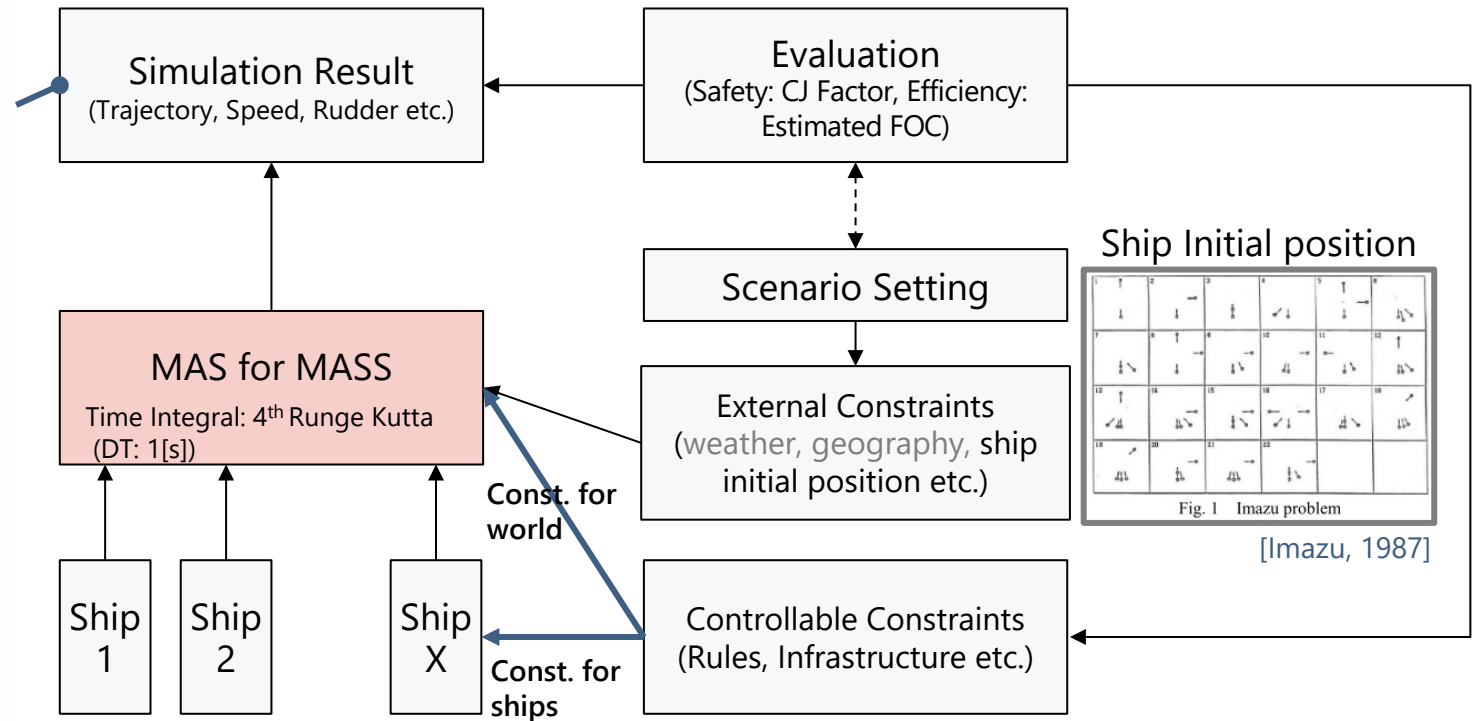
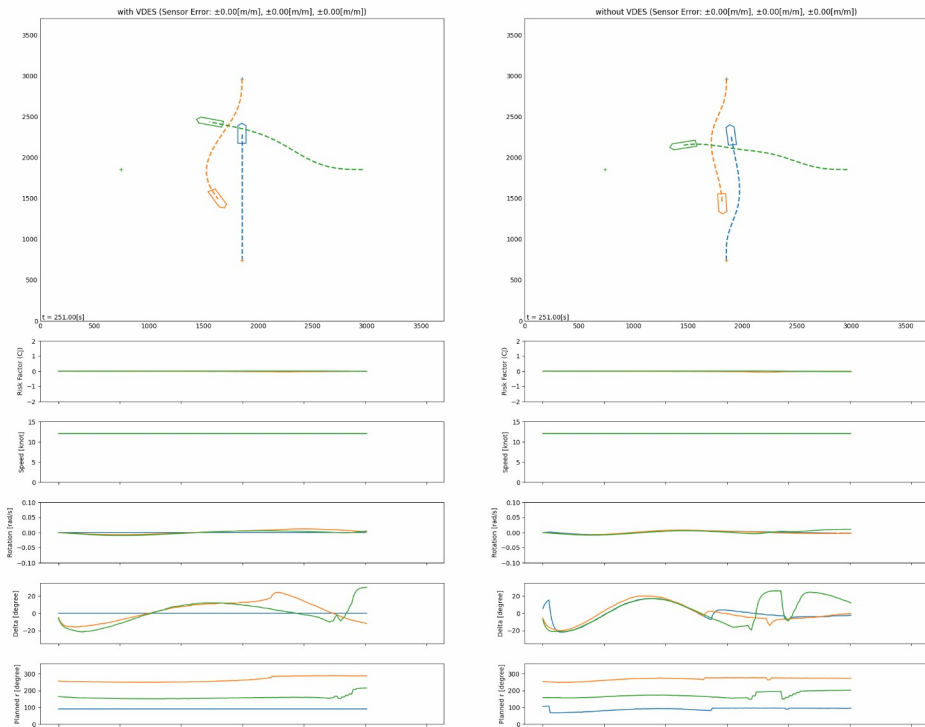
自動運航船に対応する法制度については、国際海事機関（IMO）にて「ゴールベースのルール設計」に向けて議論を進めつつあるが、具体的な制度設計手法は未確立である。

このようなルール設計のためには、単体の船舶のみを考えるのではなく、実運航環境を再現したうえでの検討が必要と考え、マルチエージェントシミュレーションを用いた最適なルール設計のあり方について試行する。



# Multi Agent Simulation for Maritime Autonomous Surface Ship (MAS for MASS)

- 各船の自律操船機能（状況認知・判断・制御）および船体の運動を模擬した船舶モデルを構築。
- それらの船が共存する環境で、安全な避航操船ができていることを、航跡やリスク評価値などをもとに確認。
- 制約条件（機器の搭載，通信インフラ整備状況，速力制限など）を変えながら，適切な運航のためのルールを検討。



# Multi Agent Simulation for Maritime Autonomous Surface Ship (MAS for MASS)

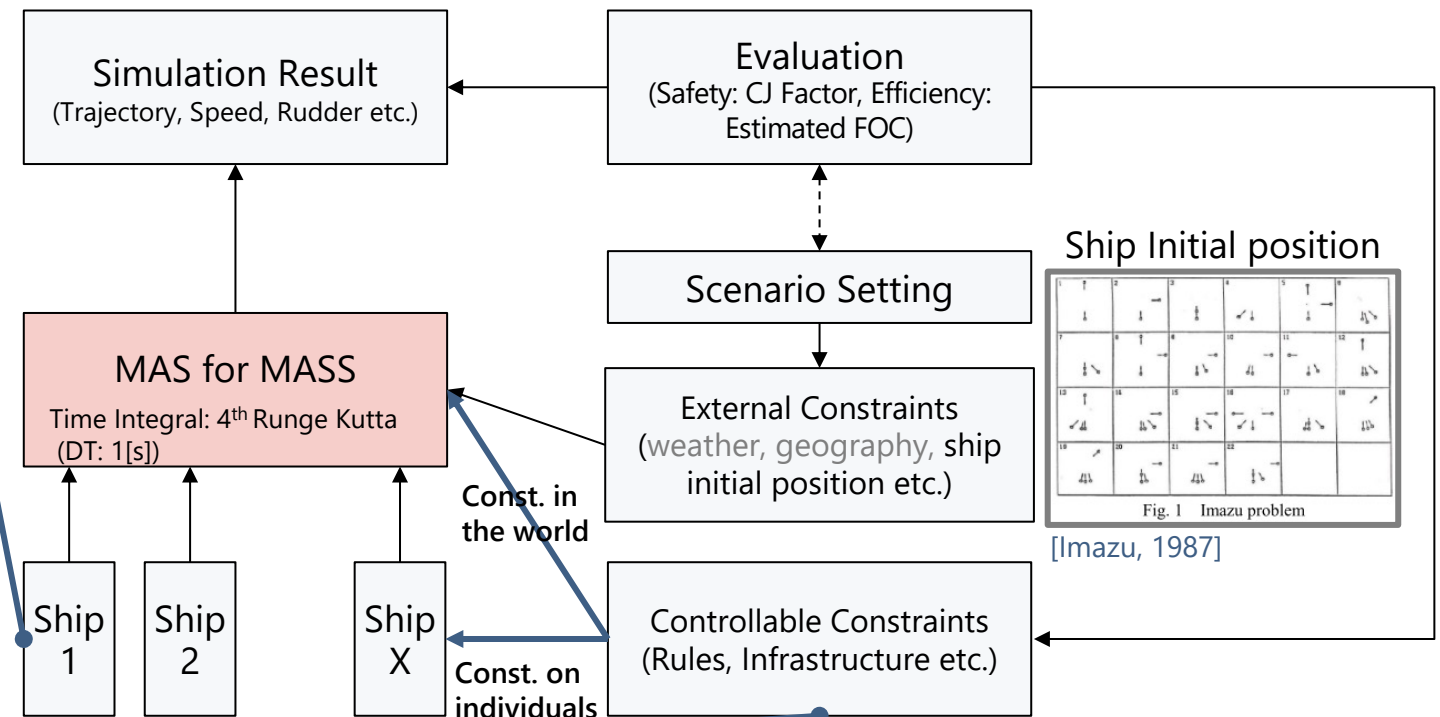
- 各船の自律操船機能（状況認知・判断・制御）および船体の運動を模擬した船舶モデルを構築。
- それらの船が共存する環境で、安全な避航操船ができていることを、航跡やリスク評価値などをもとに確認。
- 制約条件（機器の搭載，通信インフラ整備状況，速力制限など）を変えながら，適切な運航のためのルールを検討。

## Ship Configuration Setting

- Sensing Module  
Functional performance of Localization and Situation Awareness
- Planning Module  
Dynamic Window Approach (DWA)  
Preference Model [Nakamura and Okada, 2019]  
DQN Based Model
- Controller Module  
Heading Control (PID control)
- Spec  
LOA, Beam
- Dynamics (Maneuverability)  
Nomoto Model (KT Model) [Nomoto, 1957]

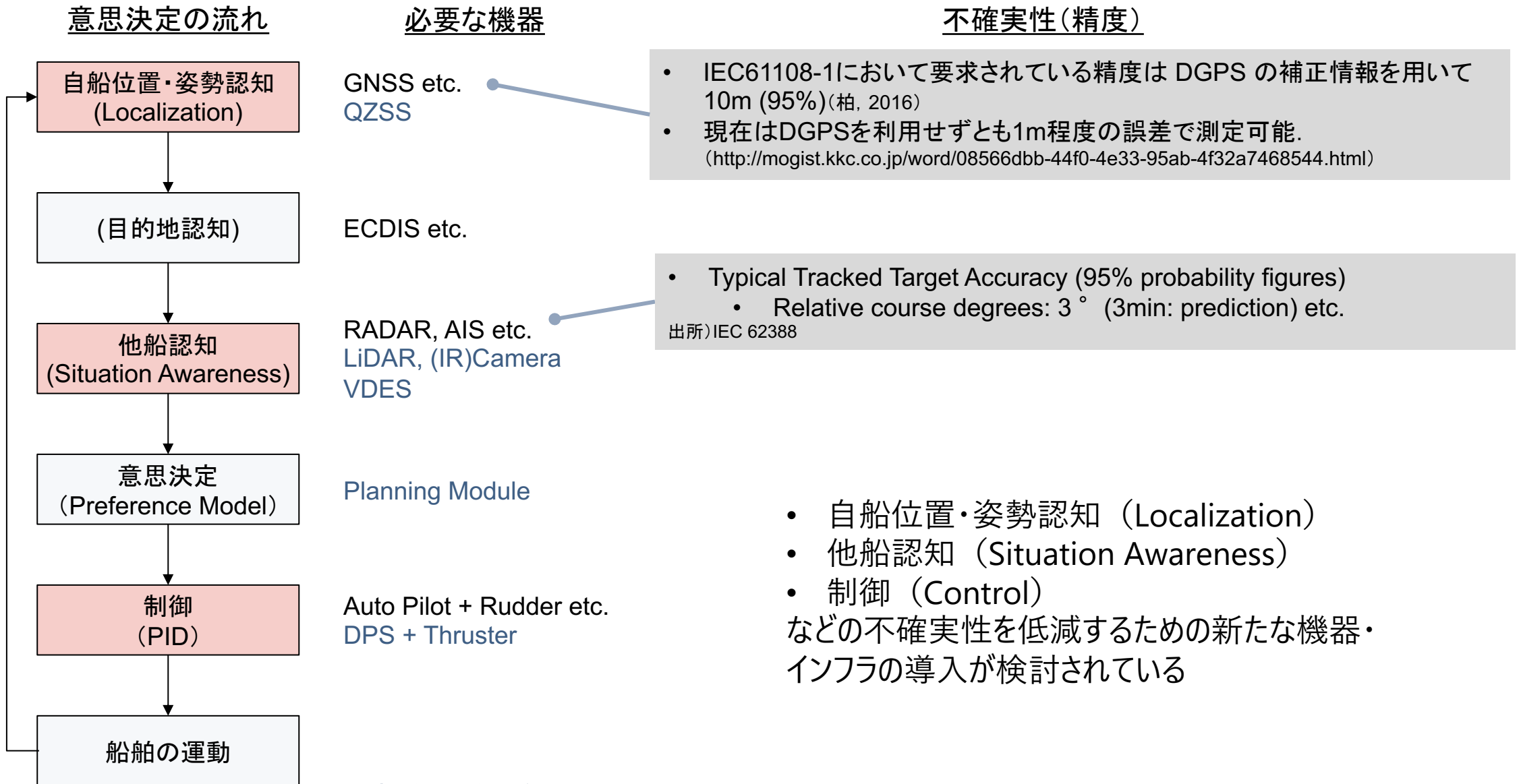
## Rule and Mechanism Design

- Speed limit
- Limitation of minimum rudder angle
- Establishment of a dedicated route
- Two-way communication environment etc.





# 自動運航船の意思決定の流れと不確実性



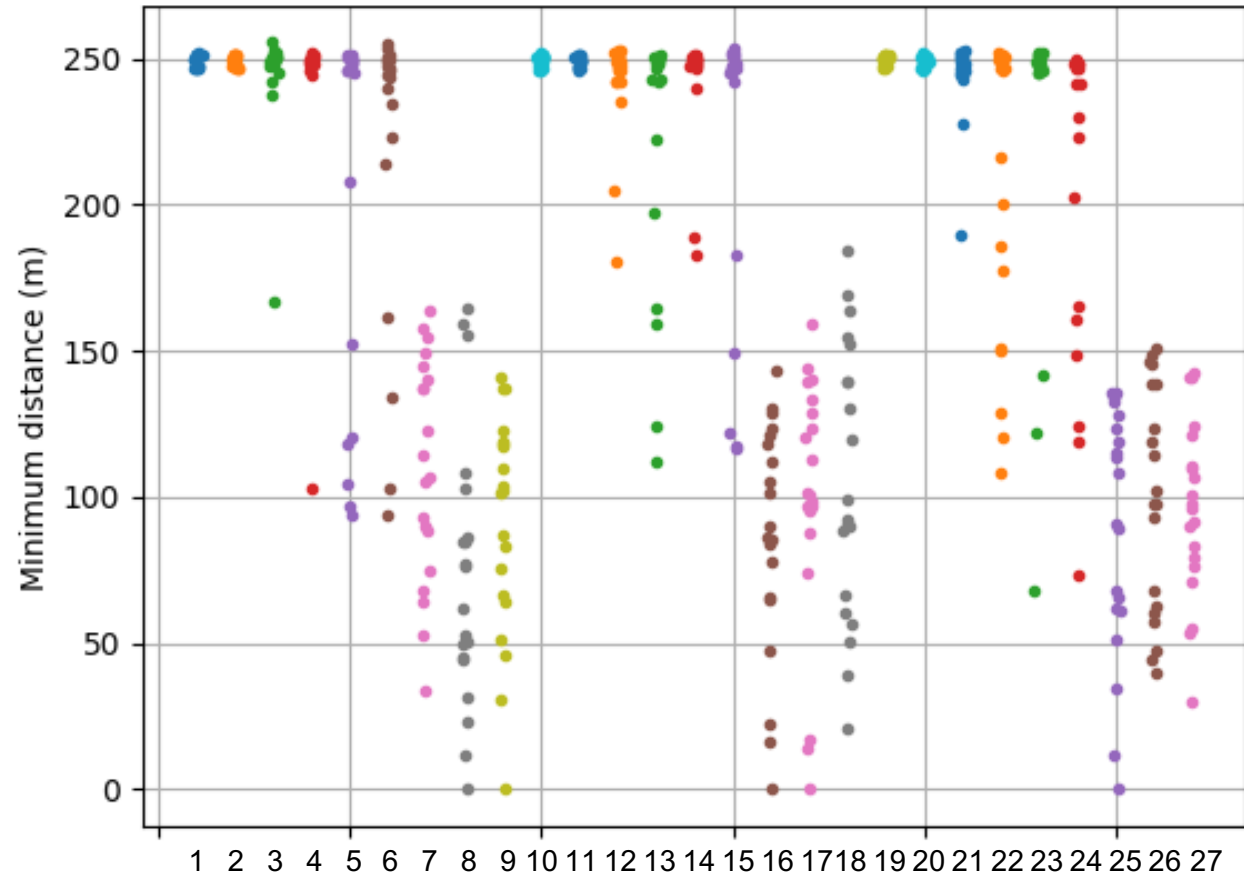
(一部導入・導入検討中)

# 機能モジュール別の性能要求の抽出

- 自船位置・姿勢認知 (Localization), 他船認知 (Situation Awareness), 制御 (Control) の精度を変化させ, モンテカルロシミュレーションで各モジュールに求められる精度 (不確実性) を評価.

ケース(機能モジュール別不確実性)

Case	Localization	Situation Awareness	Control
1	0.1	0.001	0.002
2	0.1	0.001	0.01
3	0.1	0.001	0.05
4	0.1	0.005	0.002
5	0.1	0.005	0.01
6	0.1	0.005	0.05
7	0.1	0.025	0.002
8	0.1	0.025	0.01
9	0.1	0.025	0.05
10	0.5	0.001	0.002
11	0.5	0.001	0.01
12	0.5	0.001	0.05
13	0.5	0.005	0.002
14	0.5	0.005	0.01
15	0.5	0.005	0.05
16	0.5	0.025	0.002
17	0.5	0.025	0.01
18	0.5	0.025	0.05
19	2.5	0.001	0.002
20	2.5	0.001	0.01
21	2.5	0.001	0.05
22	2.5	0.005	0.002
23	2.5	0.005	0.01
24	2.5	0.005	0.05
25	2.5	0.025	0.002
26	2.5	0.025	0.01
27	2.5	0.025	0.05



# 機能モジュール別の性能要求の抽出

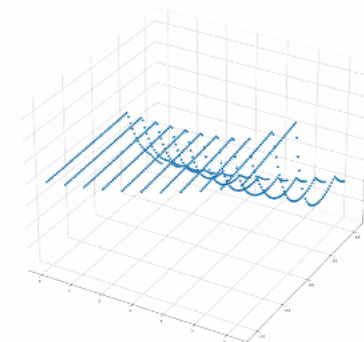
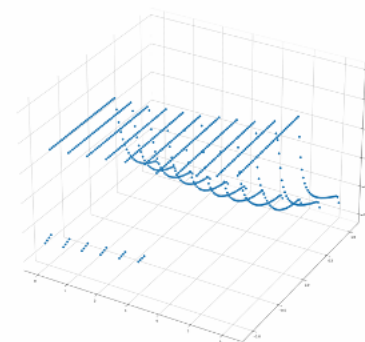
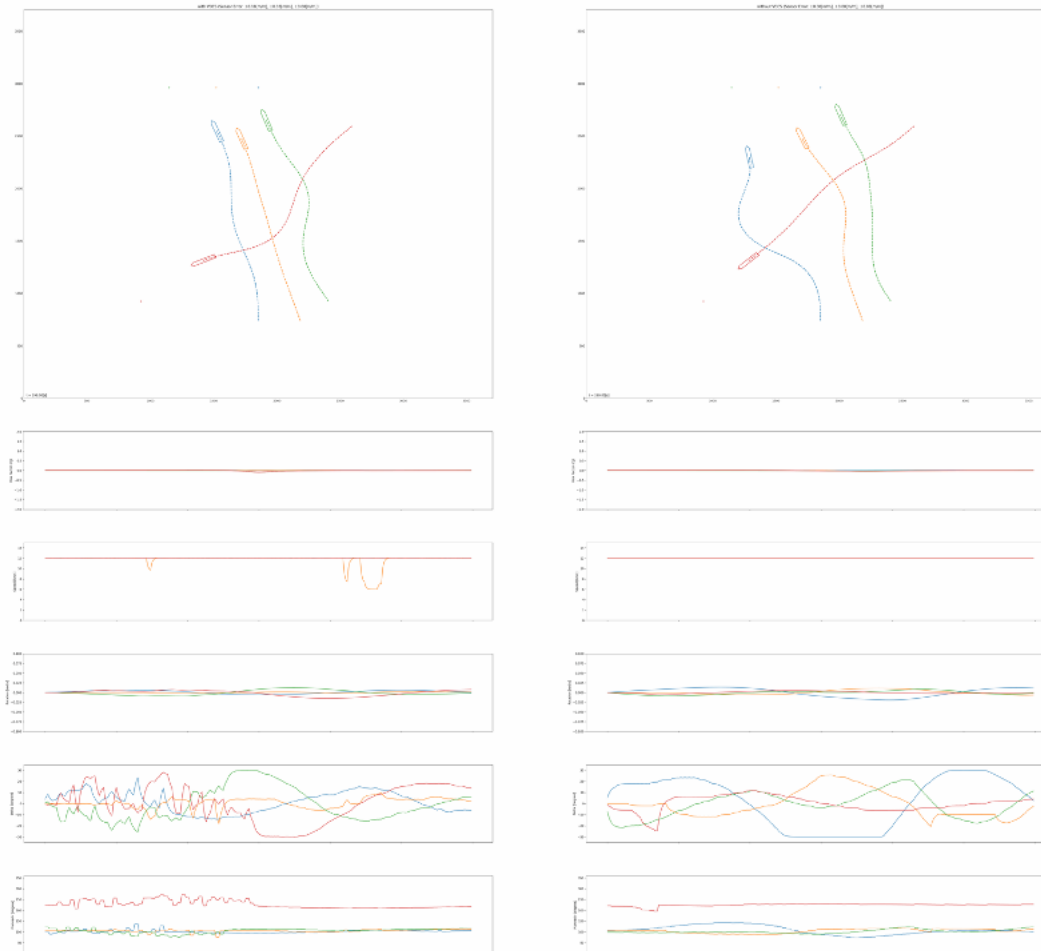
## 計算結果の例

- Situation Awarenessの不確実性を高めたCase 7の挙動と、不確実性を設定しない場合の比較
- シナリオは大洋航行を想定した見合い関係のシナリオを利用（今津問題 no. 19） [今津, 1987]
- 避航アルゴリズムは操船者の意向をルール化したモデルを利用 [Nakamura and Okada, 2019].
- 各船同スペックを想定.

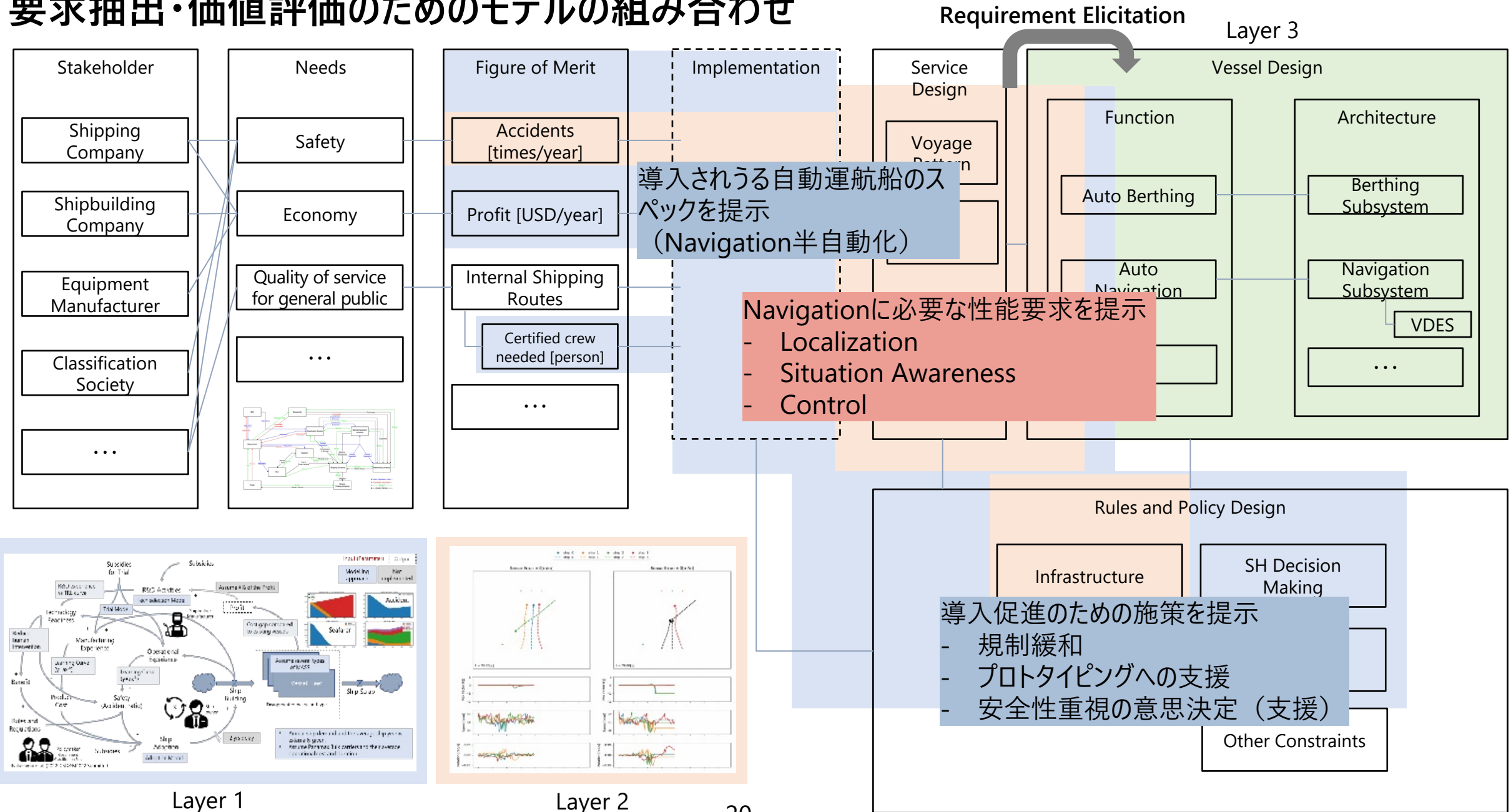
Ship specification		Parameter of planning module	
LOA (m)	106	Wdcpa (m)	300
Beam (m)	16.2	Wtcpa (s)	300
K (s)	0.05	Speed (knot)	0 - 12
T (1/s)	50	Course (degree)	-60 - +60
TE (s)	2.5	Predict Interval (s)	3.0
		$a_c$ (-)	1.0
		$a_v$ (-)	0.2

Case 7

理想ケース

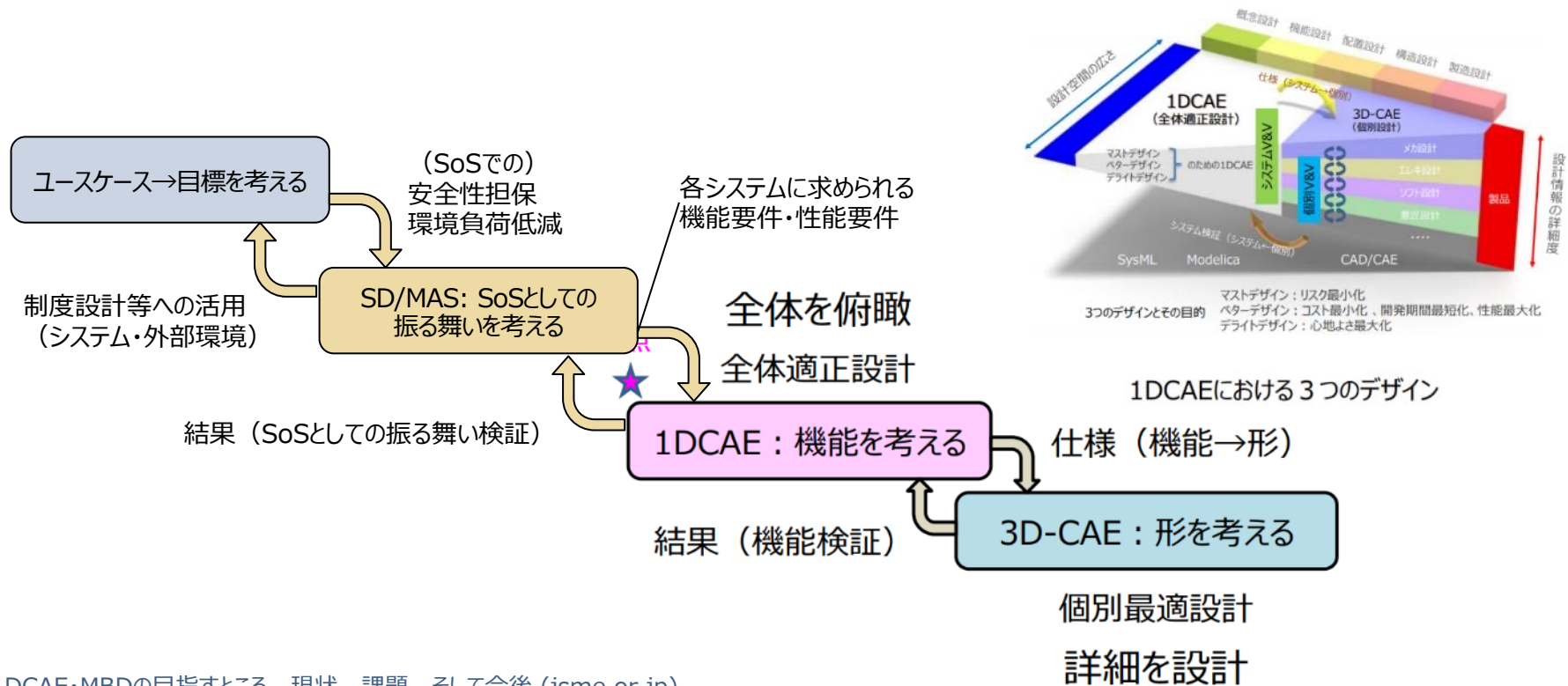


# 要求抽出・価値評価のためのモデルの組み合わせ



## 【参考】マルチレイヤーモデル・データの活用イメージ（設計段階）

- システム設計する上での機能を考える際の創発的な現象をモデル化するためには、システム同士の相互作用をモデル化することが必要である（「適正設計」を定義しづらい）。
- システムを、実海域運航システム内の船舶サブシステム、船舶システム内の機器サブシステム等、段階的に定義。
- それらの要求を段階的に定義することで、適切なゴールベースのルール形成、システムインテグレーション、機器も含めたモノづくり等を支援するシミュレータを構築する。



# まとめ

- 自動運航船の社会実装のためのマルチレイヤの連成シミュレーションの必要性について提案
  - 自動運航船の設計・検証シミュレータ + 航行ルール検討シミュレータ + 産業メカニズム検討シミュレータ
- 活用方法の一つとして、コンセプト設計段階の要件について、異なるレイヤのシミュレーションから抽出する事例を紹介
  - 導入促進のための施策の組み合わせ、および導入されうる自動運航船のスペックを提示
  - 限定されたシナリオで、安全運航に必要な性能要求を提示
- 実際の設計や意思決定への活用に向けた工夫
  - シナリオや各種パラメータの精査・不確実性の扱い
  - ゲーム理論を用いた意思決定モデルの構築
  - シナリオの網羅性、海象気象の影響の組込、運動性能の精査
  - 今後検証・改善していくための方法・必要なデータ
- 連成シミュレーションのケーススタディを探索
  - 例えば、新たなインフラ（VDESなど）の導入などによる自動運航船の安全性について評価を行い、それを踏まえた導入ロードマップの策定とそれに必要な産業戦略の検討、また船舶システムへの要求仕様などを一体的に検討