

R&D プロジェクト初期段階における 意思決定支援プラットフォームの開発 :海事産業におけるケーススタディ

○和中 真之介¹⁾ 稗方 和夫¹⁾ 満行 泰河²⁾

1) 東京大学大学院 新領域創成科学研究科

2) 東京大学大学院 工学系研究科

目次

- 研究の背景と目的
- Systems Approachと意思決定プラットフォーム
- 開発したModeling FrameworkおよびSimulator
- LNG燃料船導入プロジェクトへの適用
- 考察
- 結論

研究の背景と目的

技術開発プロジェクト初期の意思決定

- Sociotechnicalシステム¹⁾としての産業
 - 為替、原油価格等から影響を受ける社会システム
 - ⇒不確実性
 - 流体、構造、機械系等の膨大なサブシステムからなる技術システム
 - ⇒複雑性

この不確実性・複雑性によって技術開発プロジェクト、特に初期段階における意思決定が困難である

- ・意思決定の遅延
- ・勘や経験に基づく意思決定

複数ステークホルダーによる合意の形成

技術開発プロジェクトは、

- 他のステークホルダーの方針によって、自らのプロジェクトの方針が影響される
- 複数ステークホルダーとの共同開発となることが多い。

一方で、

各ステークホルダー間での認識の違いや、重要視するファクターの違いによって効率的な意思決定が阻害される

本研究の目的

1. 技術開発プロジェクト初期段階での意思決定を支援するプラットフォームの提案を行う

⇒ **Systems Approach**と**シミュレーション**に基づく意思決定

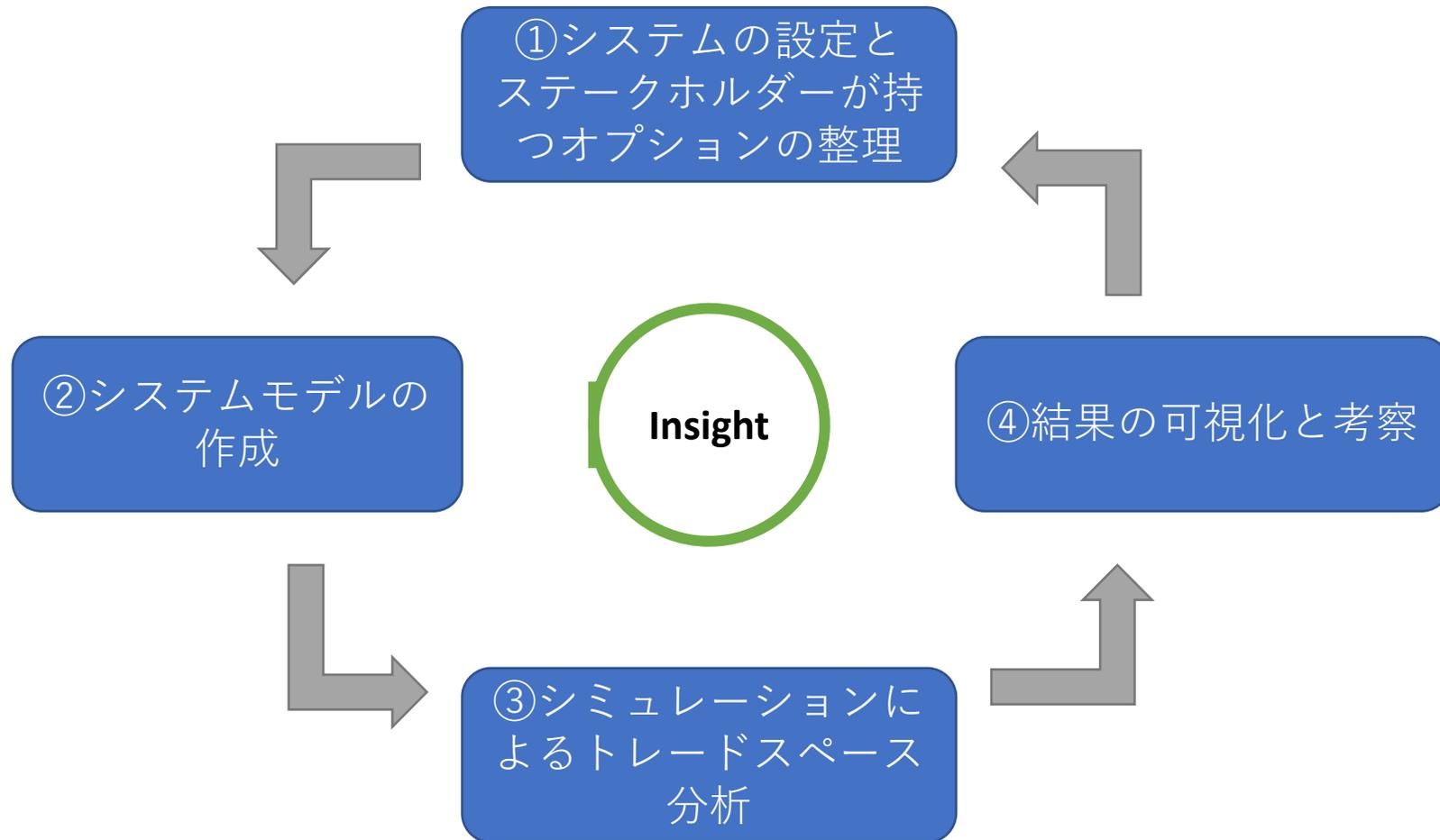
Systems Approachによる認識の明示化・共通化
シミュレーションに基づく定量的な評価

2. 提案したプラットフォームのプロトタイプを開発し、ケーススタディとして海事産業における代替燃料の検討を取り上げ適用を試みる

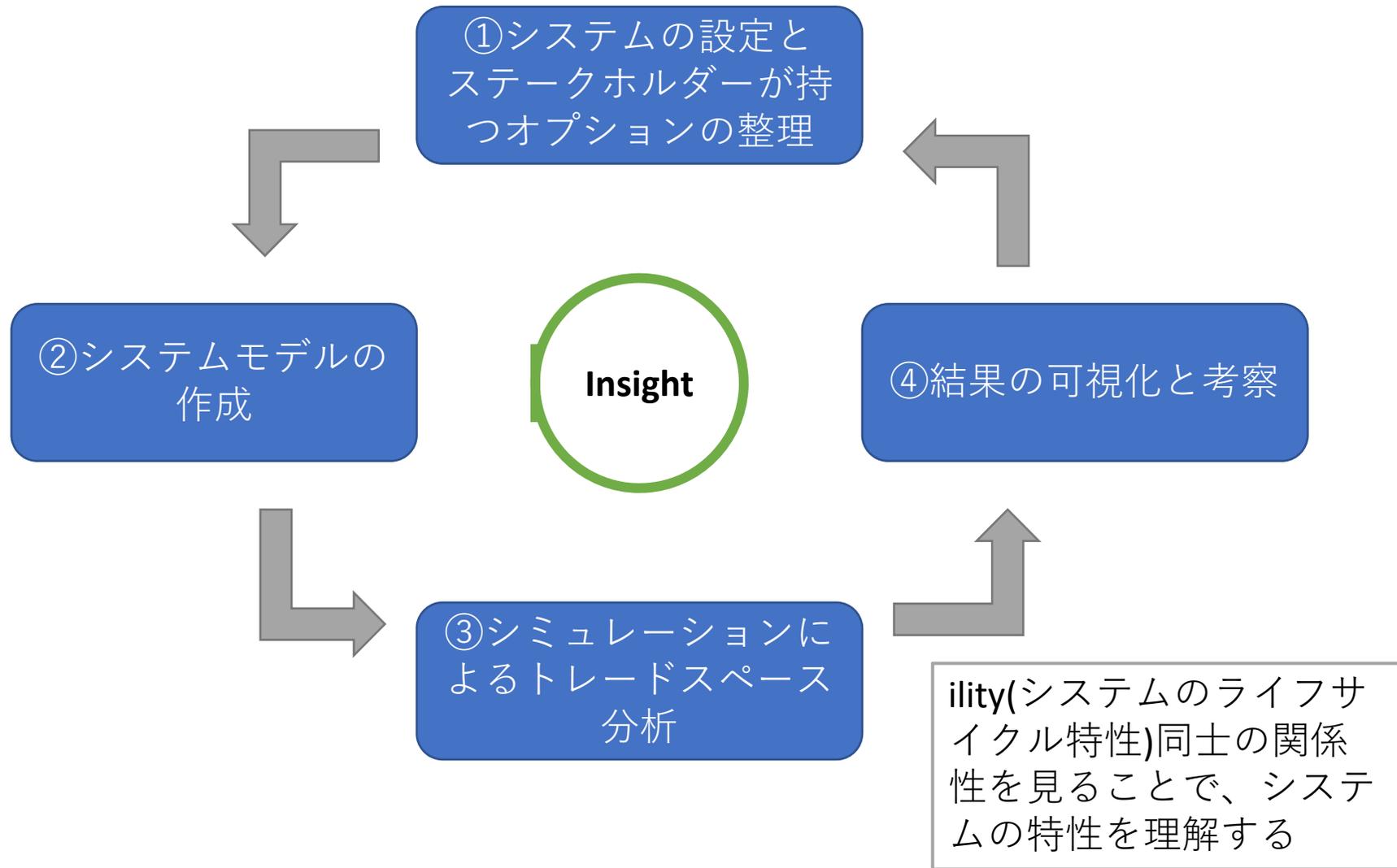
⇒モデルベースで検討を行うことの有用性と、提案プラットフォームの有用性について考察を行う

Systems Approachと 意思決定プラットフォーム

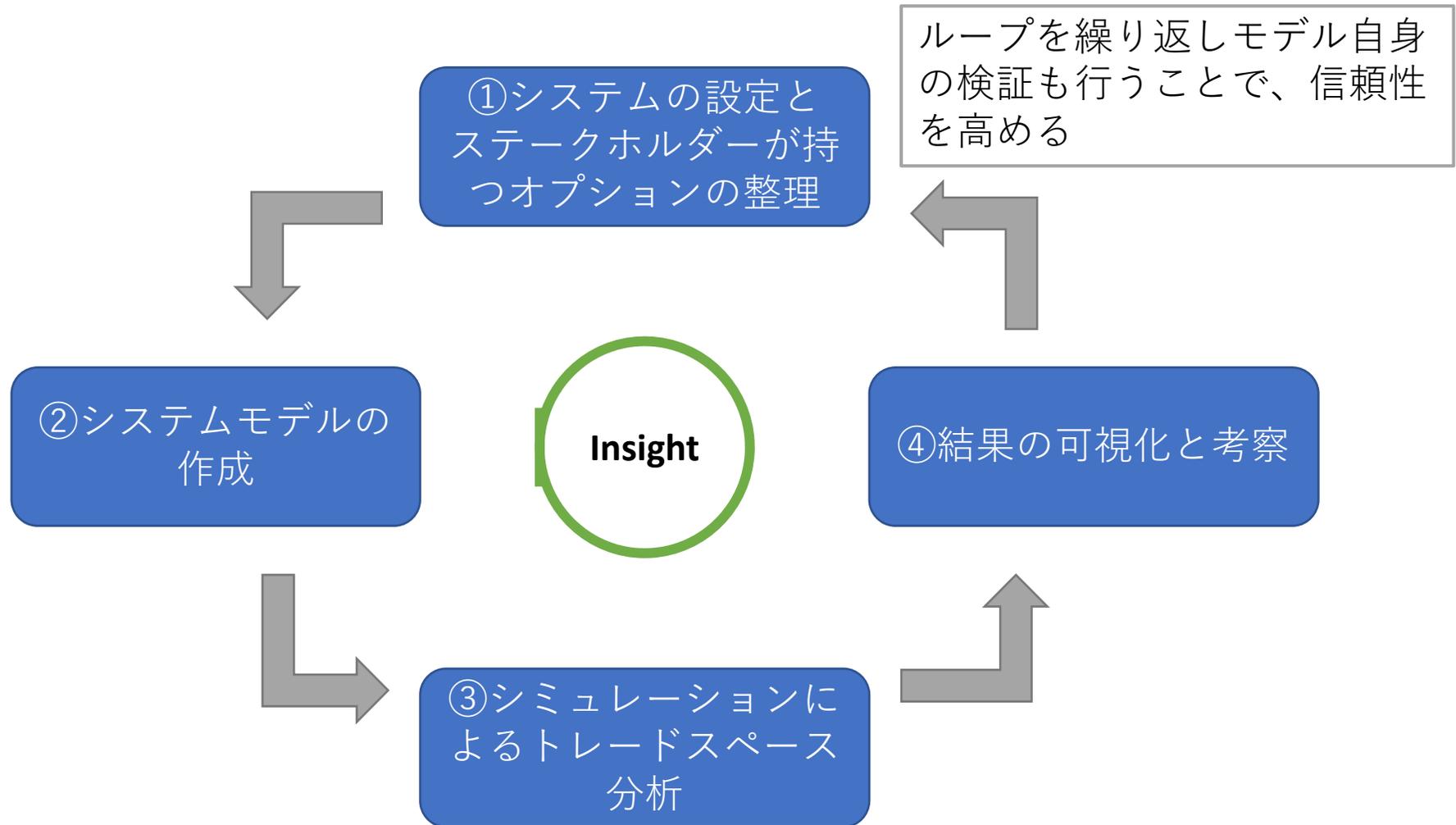
システムのモデリングとシミュレーションによる意思決定



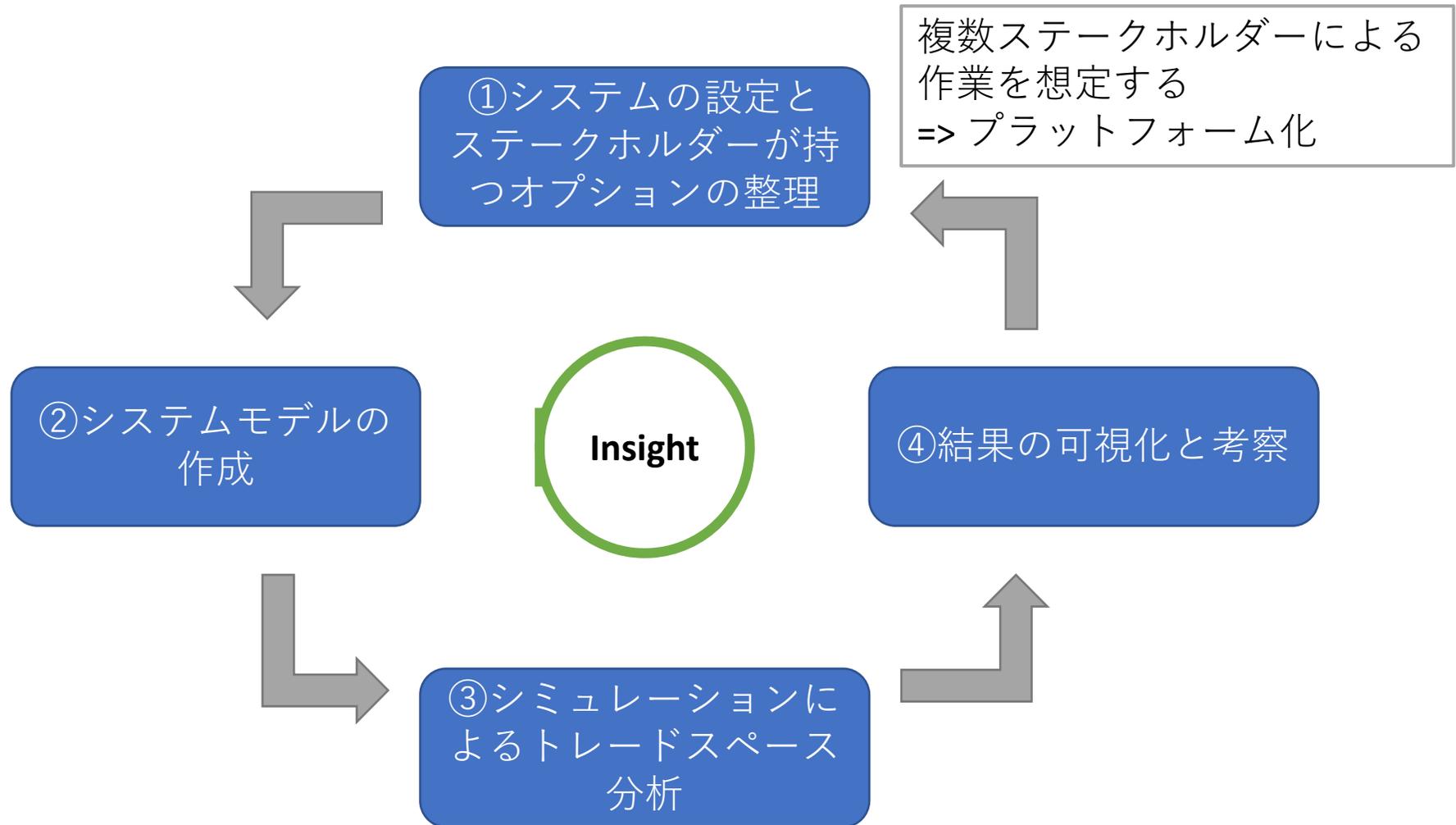
システムのモデリングとシミュレーションによる意思決定



システムのモデリングとシミュレーションによる意思決定



システムのモデリングとシミュレーションによる意思決定



提案する意思決定プラットフォーム

Platform

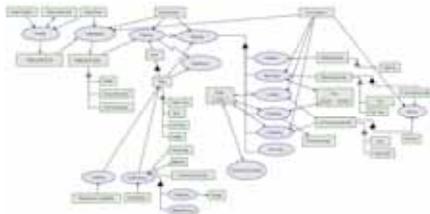
Reference
Architecture

Modeling
Framework

Simulator

UIX

1. 共有できる業界の共通構造（説明書）を提供する

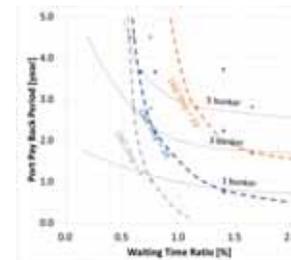


2. シミュレーションのためのシステムモデルを構築する手順

モデル化
フレームワーク



3. システムのライフサイクル特性を予測・解析する



4. 複数ステークホルダーによる議論、交渉、意思決定を行う

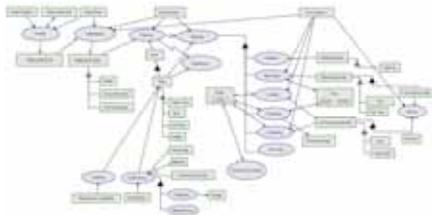


提案する意思決定プラットフォーム

Systems Approachの活用 Platform

Reference
Architecture

1. 共有できる業界の共通構造（説明書）を提供する



Modeling
Framework

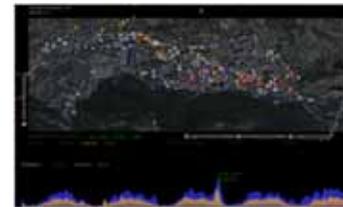
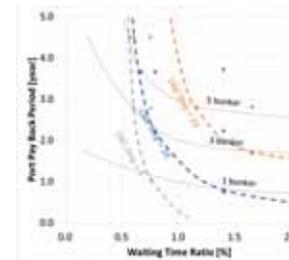
2. シミュレーションのためのシステムモデルを構築する

モデル化
フレームワーク



Simulator

3. システムのライフサイクル特性を予測・解析する



UIX

4. 複数ステークホルダーによる議論、交渉、意思決定を行う



Systems Approachとは

- System Thinkingとそれに基づく手法の集合

System Thinking²⁾

問題、課題を明示的にシステムとして捉えること。

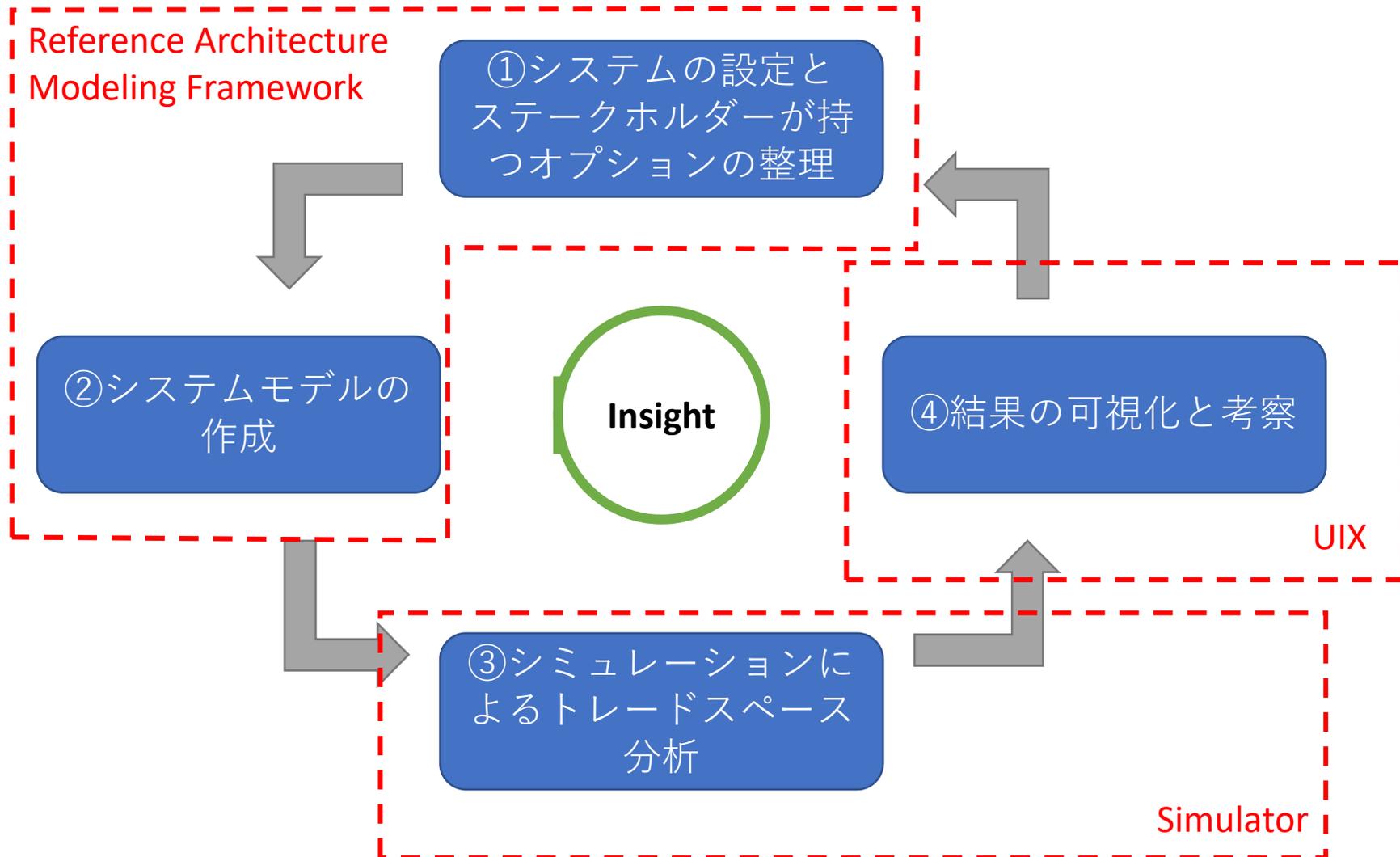
手法の例

SVN(Stakeholder Value Network)³⁾、OPM(Object Process Methodology)⁴⁾、MM(Morphological Matrix)⁵⁾、STPA(System Theoretic Process Analysis)⁶⁾など

システムの分析による重要パーツの抽出、モデル化による抽象化

システムを明示的に可視化することで、認識を明示化・共通化

意思決定手法とプラットフォームの関連



開発したModeling Framework および Simulator

モデリングフレームワーク

- 目的

シミュレーションの入力とするモデルとシナリオの作成

1. SVNによるステークホルダー分析
2. System boundaryの定義
3. システムのilityの定義
4. OPMによるシステムの整理・定式化
5. ケースにおけるシナリオの設定

System boundary・ilityの定義

- System boundary

- どこまでを分析・モデル化の対象システムとし、どこまでを対象外とするかを定義する境界

- ility⁸⁾

- システムの特性を表すライフサイクル特性
- ex) Quality, Reliability, Safety, Flexibility,...etc.
- 基本的にコストおよびility間にはトレードオフの関係があり、この関係を捉えることがシミュレーションの目的となる

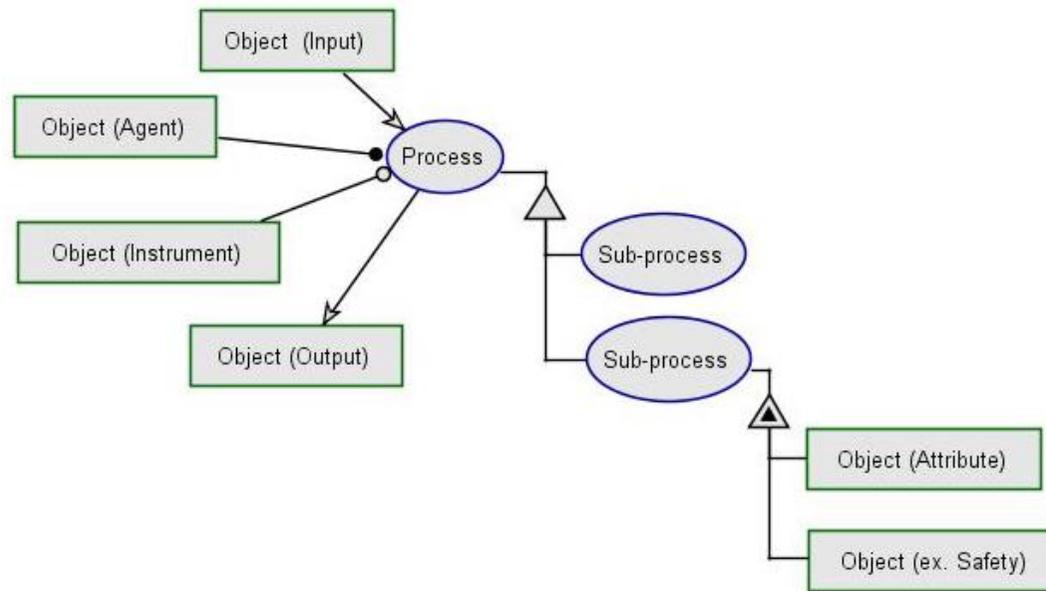
- 初期コストとこれらのilityを比較することで意思決定を支援する

OPMによるシステムの整理・定式化

- Object Process Methodology

- システムモデリング言語の1つ
- オブジェクトとプロセスをノードとし、複数種類のリンクで結合することでシステムを表現する

OPMの例)



- 定式化

シミュレーションへの入力からilityとして扱う評価値が計算されるような定式化が必要である

ケースにおけるシナリオの設定

- シナリオ

シミュレーションに入力する初期値

意思決定者がコントロールできる意思決定項目とそれ以外の外部要因を設定する

例)

LNG燃料船の導入隻数 => 船主・海運会社の意思決定項目

LNG燃料の価格 => コントロールの外にあるシナリオの要素

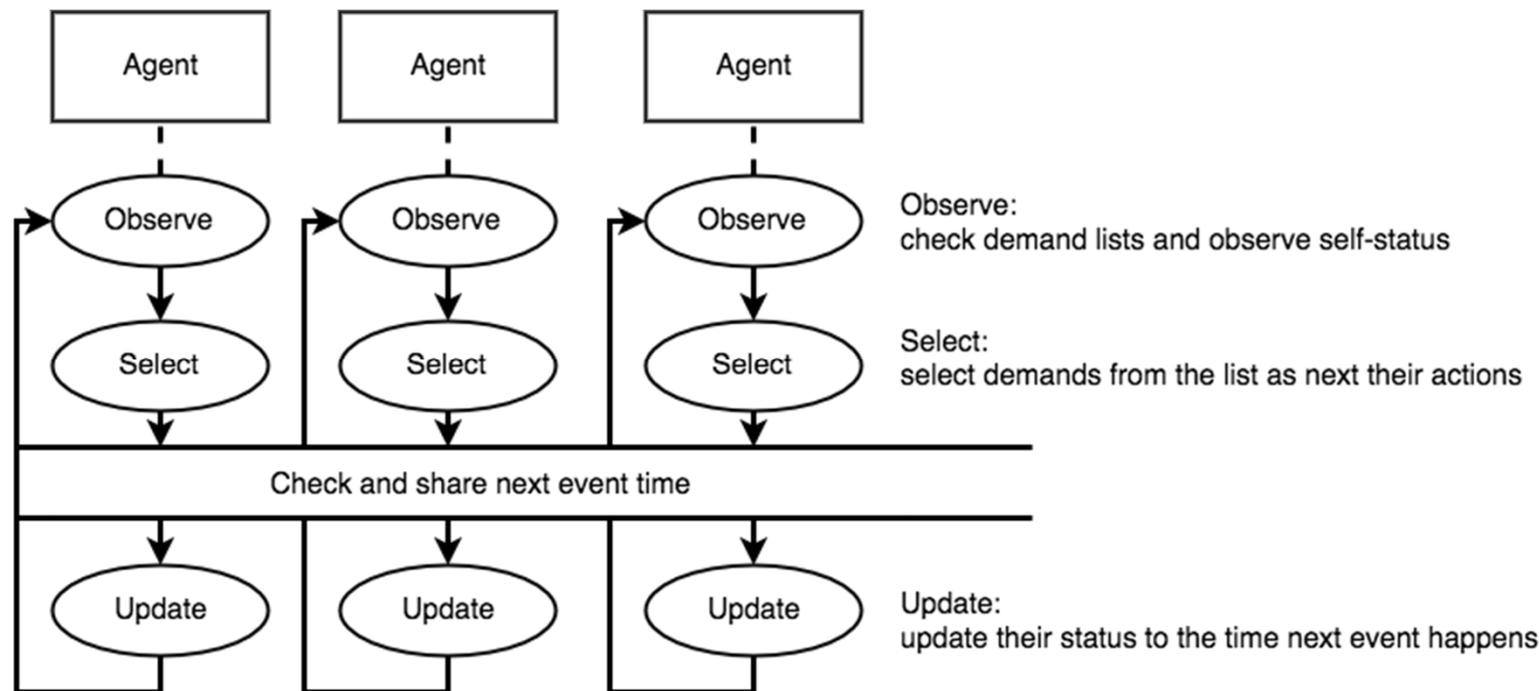
ここまでで得られたモデルとシナリオを入力としてシミュレータに引き渡す

エージェントベースの離散イベントシミュレータ

- シミュレータの要件

入力された意思決定項目とシナリオからシステムのilityが計算されること

=> 汎用性を重視し、マルチエージェント離散イベントシミュレータを開発した



代替燃料船導入プロジェクトへの 適用

ケーススタディ概要

- 目的

開発・提案する Modeling Framework および Simulator を海事産業における代替燃料導入プロジェクトへ適用する

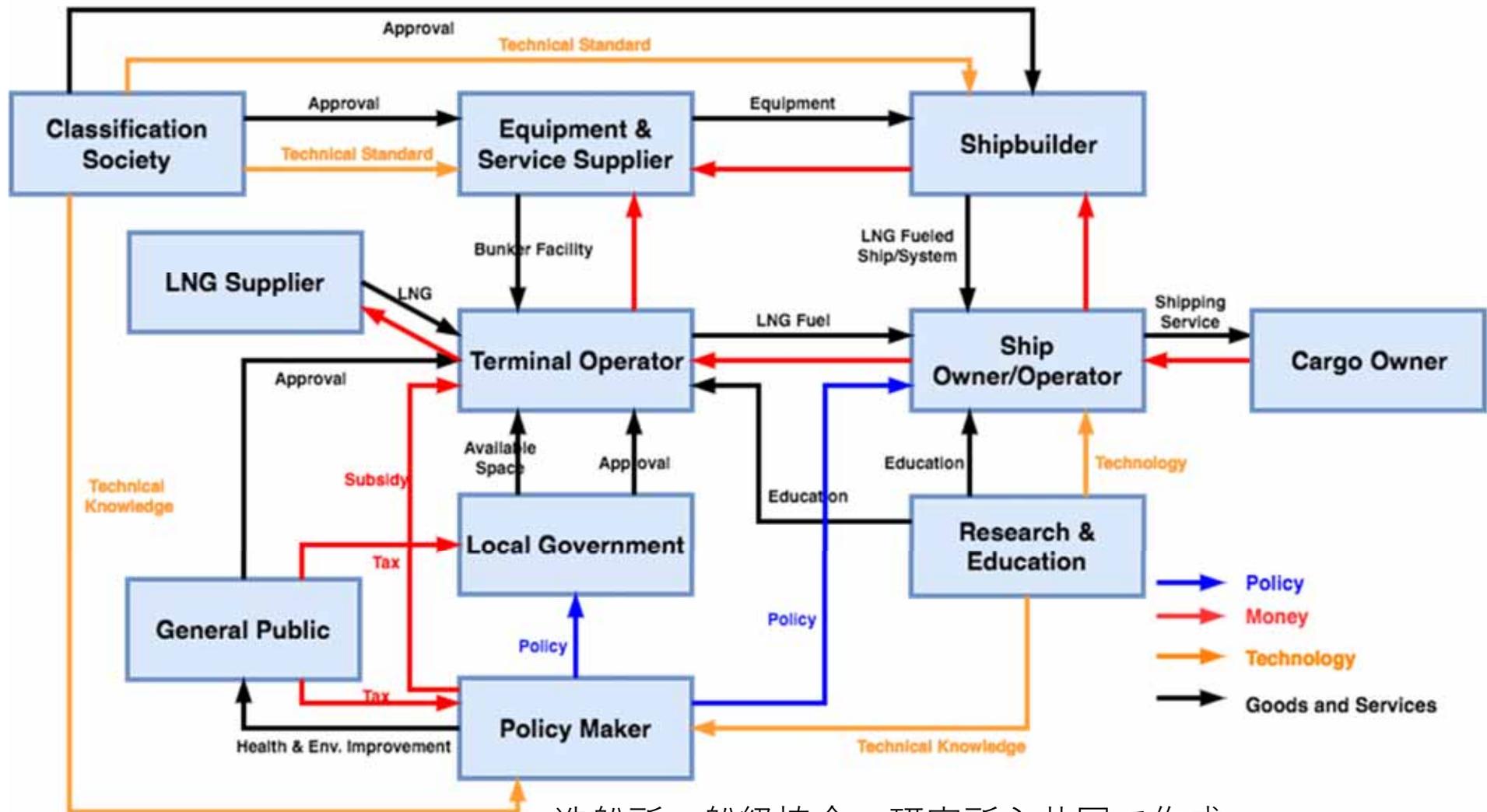
開発したシミュレータの定性的な挙動の確認と、開発したプロトタイプによって提案した意思決定支援手法が**複数ステークホルダー**によって実現できることを確認する

- 海事産業での代替燃料導入に関する意思決定

2020年よりIMOによってSOx排出量規制の強化が開始される。船会社はこれまで通りの運航ではこの規制を満たせないため、SOx処理装置を搭載する、もしくは代替燃料*を利用する等の対応が求められる。

*MGOと呼ばれる低硫黄燃料、LNGなど

ステークホルダー分析・Boundaryの定義



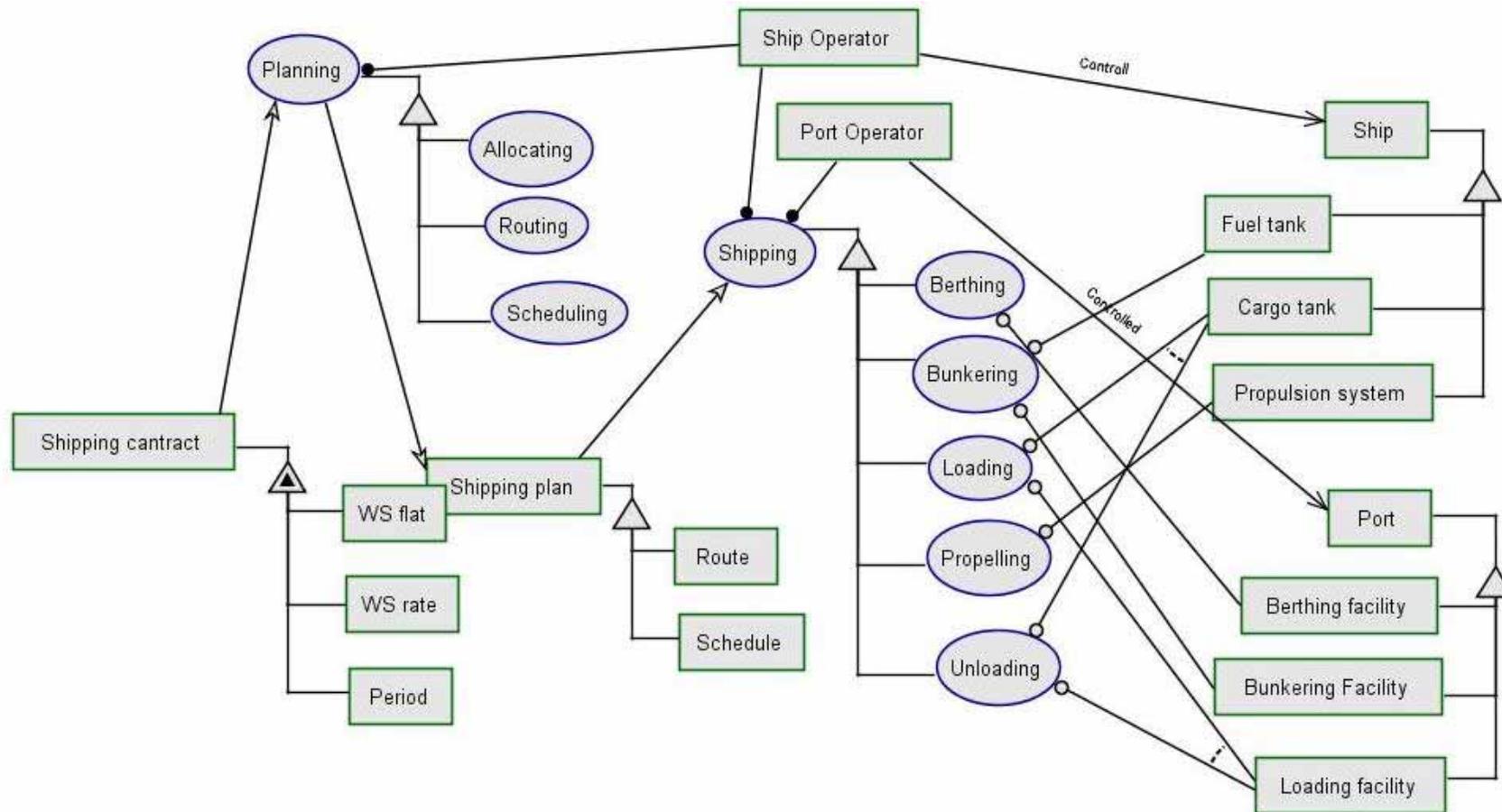
造船所、船級協会、研究所ら共同で作成

システムのilityの定義

- 定義するility
 - コスト効率性(Efficiency)
 - 燃料効率[\$/ton*km]
 - 輸送の質(Quality)
 - 沖待ちが発生した時間の割合[%]
 - 環境性能
 - NOx, SOx, CO₂の排出量[ton/ton*km]

システム全体の整理・定式化

• OPMによるシステムモデル



造船所、船級協会、研究所ら共同で作成

システム全体の整理・定式化

• ilityの定式化

- 燃料効率 $E_{\text{fuel}} [\$*ton/km]$

燃料コスト $FCC [\$]$, 運搬した貨物の重量 $M_{\text{cargo}} [ton]$,
運航距離 $D_{\text{transported}} [km]$

$$\Rightarrow E_{\text{fuel}} = \sum_{\text{ship}} \frac{FCC}{\sum (M_{\text{cargo}} \cdot D_{\text{transported}})}$$

- 沖待ち時間の割合 $R_{\text{waiting}} [\%]$

沖待ち時間 $T_{\text{waiting}} [hour]$, 運航時間 $T_{\text{transporting}} [hour]$

$$\Rightarrow R_{\text{waiting}} = \frac{\sum_{\text{ship}} T_{\text{waiting}}}{\sum_{\text{ship}} T_{\text{transporting}}}$$

- 環境性能 $M_{\text{gas}} [ton/ton*km]$

単位トンキロあたりに排出した NO_x, SO_x, CO_2 の量 $[ton]$

$$\Rightarrow M_{\text{gas} \in (SO_x, NO_x, CO_2)} = \sum_{\text{ship}} \frac{m_{\text{gas}}}{\sum (M_{\text{cargo}} \cdot D_{\text{transported}})}$$

ケースのシナリオの設定(意思決定項目)

- オイルタンカー20隻が港湾設備5基で運航
日本⇄ペルシアンガルフの往復航路
- MM (Morphological Matrix)
行ごとにオプションを1つ選択することで意思決定項目を表現する。

Decision	Alt 1	Alt 2	Alt 3	Alt 4	Alt 5
Fuel	HFO	LNG	MGO	HFO/LNG	MGO/ LNG
Engine	Gas ¹⁾	Dual fuel ²⁾	Gas-diesel ³⁾		
Scrubber	Yes	No			
LNG bunkering location	Japan	Singapore			
LNG bunkering method	Truck to Ship	Ship to Ship	Shore to Ship		

1) Spark-ignited Leanburn Gas Engine, 2) Low-pressure Dual Fuel Engine, 3) Gas-diesel Engine

ケースのシナリオの設定(その他外部要因・設定)

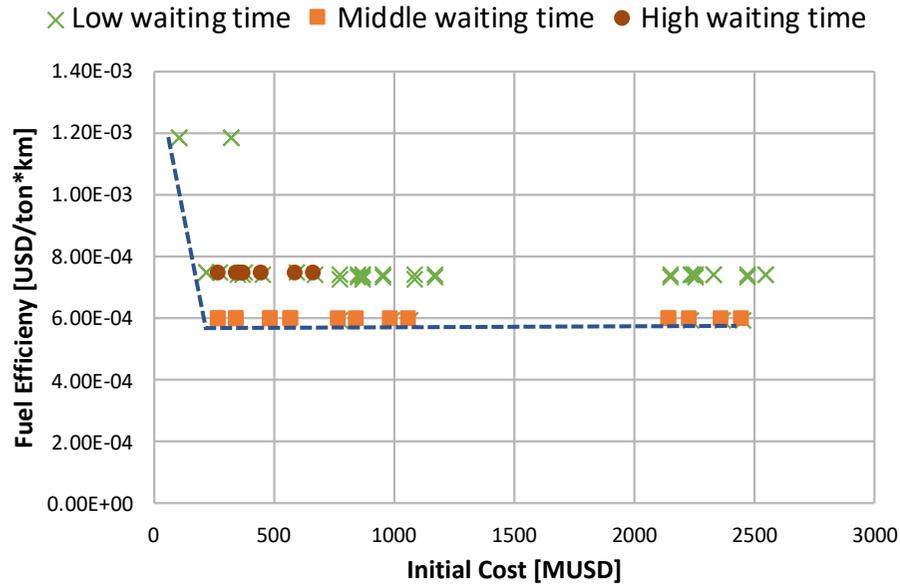
Port properties				
Item	Unit	Port1	Port2	Port3
Port name	-	Yokohama	Ras Tanura	Singapore
Loading speed	ton/h	3125		
Bunkering speed				
HFO, MGO	ton/h	104		
Shore, Ship to Ship	ton/h	104		
Truck to Ship	ton/h	10.4		
Ship properties				
Item	Unit	Value		
Average speed	knot	15		
Deadweight(Cargo)	ton	300,000		
FO tank capacity	m ³	5,000		
FOC	ton/mile	HFO	LNG	MGO
		0.20	0.16	0.18
Emission rate	-	SOx	NOx	CO ₂
HFO	-	0.012	0.0045	3.1
LNG	-	0	0.0009	2.75
MGO	-	0.0006	0.0045	3.2
Market properties				
Item	Unit	Value		
HFO	\$/ton	620		
LNG	\$/ton	606, 760, 925		
MGO	\$/ton	1106		

ケースのシナリオの設定(初期コストについて)

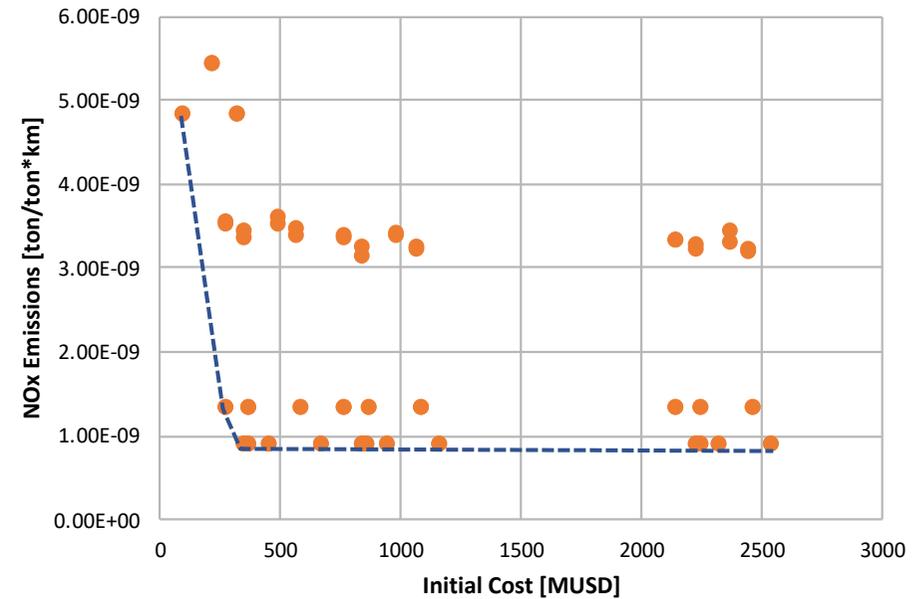
- スクラバ搭載
本体 + 搭載コスト = 10.93[M\$]
- MGOへの移行
移行コスト = 0.16[M\$]
- LNG燃料船へのレトロフィット
ガスタンク・システム + 搭載コスト
Low-pressure Dual Fuel Engine: 17.5[M\$]
Gas-diesel Engine: 13.6[M\$]
- バンカリング施設について
MGOバンカリング施設 10[M\$/Unit]
LNGバンカリングターミナル 940[M\$]
LNGバンカリング船 50[M\$]
LNGバンカリングトラック 0.5[M\$]

シミュレーション結果とTradespaceの可視化

初期コスト vs. 燃料コスト, 沖待ち時間



初期コスト vs. 環境性能



1. 初期コストと燃料コストのトレードオフ
2. 最もユートピアに近い設計では、待ち時間が発生する

初期コストと環境性能のトレードオフ
(CO2についても同様)

考察

シミュレーションの結果について

- 初期コスト vs. 燃料効率, 沖待ち時間
 1. 初期コストと燃料コストのトレードオフ
 2. 最もユートピアに近い設計では、待ち時間が発生する>> Dual fuel engineによって将来の燃料費に関する不確実性に対処できるものの、燃料のスイッチングは輸送システムの待ち時間を生む可能性がある
- 初期コスト vs. 環境性能のトレードオフ

SOx排出量については規制のため制約条件だが、その他の環境性能についても今後規制強化が予想される。そうであれば初期コストをかける価値がある

 1. 結果は直感とも良く一致し、定性的な挙動は問題ない
 2. 海事産業における代替燃料に関して、提案した意思決定支援手法を実行し、適用が可能であることが確認できた
 3. 燃料のスイッチングと待ち時間の関係については、モデル作成時には議論されておらず、モデルベースで検討することの有用性が示唆された

Systems Approachによる認識の明示化・共有

- ケーススタディにおいてSVN(Stakeholder Value Network)やOPM(Object Process Methodology)といったSystems Approachの手法によって、複数ステークホルダーによる認識の明示化・共有が行えることを示した
- 認識の明示化・共有が行えることで、先入観の排除、協業による質の向上、意思決定の根拠を明示化することができると考えられる

結論

結論

1. 技術開発プロジェクト初期段階での意思決定を支援するプラットフォームの提案を行った

⇒ **Systems Approach**と**シミュレーション**に基づく意思決定

Systems Approachによる複雑性のコントロール

様々なシナリオによるシミュレーションでの不確実性の考慮

2. 提案したプラットフォームのプロトタイプを開発し、ケーススタディとして海事産業における代替燃料の検討を取り上げ適用を試みた

⇒ モデルベースで検討を行うことの有用性と、**SVN**や**OPM**といった**Systems Approach**の手法によって、複数ステークホルダーによる認識の明示化・共有が行えることを示した。

謝辞

本研究は造船学術研究推進機構(REDAS)の助成を受けて実施したものである.ここに深く謝意を表す.

Reference

1. Davis, M. C., Challenger, R., Jayewardene, D. N., and Clegg, C. W. : Advancing Socio-technical Systems Thinking: A call for bravery. Applied Ergonomics, Vol. 45, No. 2, pp. 171-180, 2014.
2. Frank, M. : Engineering Systems Thinking and Systems Thinking, Systems Engineering, Vol. 3, No. 3, pp. 163-168, 2000.
3. Cameron, B. G., Seher, T., and Crawley, E. : Goals for Space Exploration Based on Stakeholder Value Network Considerations, Acta Astronautica, Vol. 68, No. 11, pp. 2088-2097, 2011.
4. Dori, D. : Object Process Methodology—a Holistic Systems Paradigm, Springer, 2002.
5. Zwicky, F. : The Morphological Approach to Discovery, Invention, Research and Construction, New Methods of Thought and Procedure, pp. 273-297, 1967
6. Ishimatsu, T., Leveson, N. G., Thomas, J., Katahira, M., Miyamoto, Y., & Nakao, H : Modeling and hazard analysis using STPA, Proceedings of 4th IAASS, 2010.
7. 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.
8. L. de Weck, O., Roos, D., and L. Magee, C. : Engineering Systems, THE MIT PRESS, pp. 187-188, 2011.

Appendix

Reference Architecture / UIXの開発について

- Reference Architecture

課題ごとに依存しない、共通となる知識

⇒ 今回のLNG燃料船のような問題に繰り返しModeling Frameworkを適用し、共通部分を抽出することで開発

- UIX (User Interface & Experience)

意思決定の支援には、シミュレーションの結果をどう可視化するかが重要である

⇒ Tangible User InterfaceのようなUIXの拡張の必要性



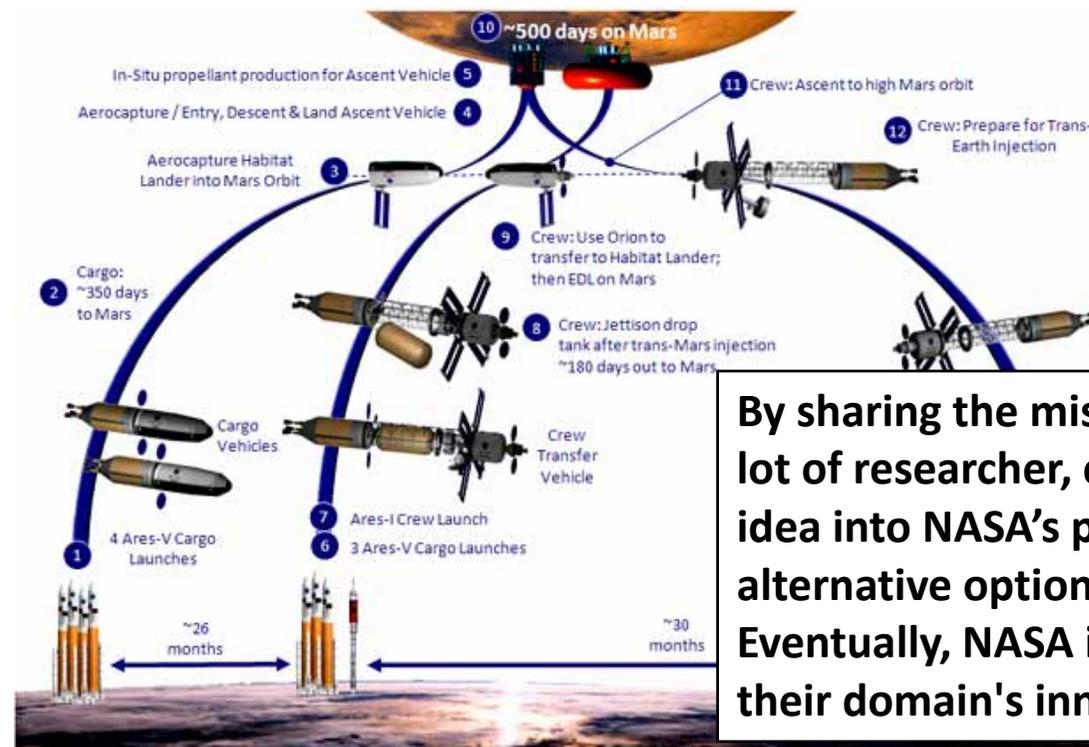
R&D プロジェクト初期段階における意思決定支援プラットフォームの開発

Reference Architecture

“The reference architecture provides a common framework for future planning of systems concepts, technology development, and operational testing...”[1]

Mars Design Architecture 5.0 -NASA[2]

Mars Design Reference Architecture 5.0 mission sequence summary.



[1]Bret G. Drake “Human Exploration of Mars: Challenges and Design Reference Architecture 5.0”, Journal of Cosmology, 2010, Vol 12, 3578-3587

[2] https://www.nasa.gov/pdf/373665main_NASA-SP-2009-566.pdf

Systems Approachベースで行う意思決定の有用性

- Systems Approachを用いる効果

ステークホルダーから始まり、問題の定義、システムの定義を明示的に図示しながら意思決定を行っていく
⇒先入観の排除、協業による質の向上、意思決定の根拠を明示化することができる