

R&D プロジェクト初期段階における意思決定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

Development of Decision Making Platform in Early Stage of R&D Project: Case Study on Maritime Industry

和中真之介^{1*} 稗方和夫¹ 満行泰河²

Shinnosuke Wanaka¹, Kazuo Hiekata¹, and Taiga Mitsuyuki²

¹ 東京大学大学院新領域創成科学研究科

¹ Graduate School of Frontier Science, The University of Tokyo

² 東京大学大学院工学系研究科

² Graduate School of Engineering, The University of Tokyo

Abstract:

In this paper, decision making platform in early stage of R&D process is proposed and the prototype is developed. The proposed platform helps decision making process by simulation whose modeling is built by system approach. According to the platform, decision makers frame a problem, build the model, and run the simulation for all of their options. They are able to observe the tradespace based on the simulation result and obtain insight for the decision making.

We applied the prototype of the proposed platform to the alternative fuels problem for shipping. It demonstrates the feasibility of the proposed platform, and we are able to discuss the advantage of the platform.

1 緒言

海事産業は、社会的要素および技術的要素が密接に関わる SocioTechnical システム[1]の1つと捉えられる。為替や原油価格等外部の社会的要素の影響を大きく受け、産業として成熟を迎えているため技術的要素も複雑である。この不確実性、複雑性のため、技術開発プロジェクト初期段階における意思決定が難しい。このような意思決定では意思決定のスピードが遅くなる、人間の直感に基づく意思決定が思わぬ失敗を招く、など問題も多い。

本研究では、海事産業における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い、そのプロトタイプを開発する。提案するプラットフォームでは、古くから System Thinking[2]として知られる考え方とそれに基づく手法の集合である Systems Approach をもとに、問題定義、システムモデリングを行い、最終的にはシミュレーションを通して意思決定を支援する。意思決定として取りうるオプション毎にシミュレーションを行い、結果を Tradespace 分析することで意思決定を支援する。

本研究では、提案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代替燃料船の開発・導入に関して適用を行う。シミュレータの定性的な挙動を確かめるとともに、本プラットフォームの適用性、有用性について考察を行う。

2 意思決定プラットフォーム

本研究ではシステムのモデル化とシミュレーションをもとに海事産業における技術開発プロジェクトの初期段階での意思決定を支援する。その具体的な手法を Fig. 1 に示す。まず対象プロジェクトをシステムとして定義し、プロジェクトの Stakeholder が持つ意思決定項目の洗い出しを行う。次に定義したシステムをシミュレートするためのモデルを作成する。そして意思決定項目の組み合わせを変更しながらシミュレーションを実行し、Tradespace の探索を行い、結果を可視化・考察する。考察の結果、システムの定義、モデルに問題がある場合は最初の手順に戻り、繰り返す。これらのプロセスは繰り返し行うことで、意思決定の根拠として正確性、信頼性を高めることができる。最終的には、これらを繰り返すことで、

意思決定に関わる知見を抽出し、その知見でもって意思決定の支援を行う。Systems Engineering において *ility*[3]と呼ばれるシステムが持つライフサイクル特性は相互に関係しあい、トレードオフの関係にあることも多い。思わぬ *ility* 間のトレードオフを見逃さないことが、ここで得られる重要な知見の1つである[4]。

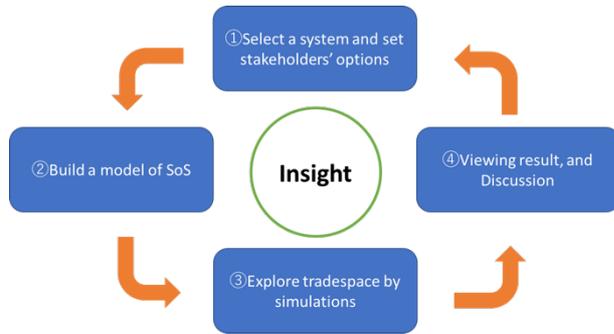


Fig. 1 Decision making support based on simulation.

本研究では、Fig. 1 で示した手法を実現するためのツールセットを意思決定プラットフォームとして提案する。提案する意思決定プラットフォームの概要を Fig. 2 に示す。Fig. 1 で示した手法のそれぞれに対応する形で 4 つのツールを提供する。Reference Architecture とは、プロジェクトや業界内で共通する知識を表現したものであり、明示的に記述することで意思決定プロセスでのバラツキを軽減する目的がある。また、改良しながら再利用することで意思決定に必要な時間コストを軽減する。Modeling Framework は、Stakeholder 間の関係を分析するなど、System modeling に必要な手順のことであり、モデル化の手順を明示的に書き下すことで、モデル化の際の属人性を減少することを目的とする。Simulator は Modeling Framework を通して作成したモデルをもとに Tradespace を探索するシミュレータであり、UIX(user interface and experience)を通して意思決定者に知見を与える。

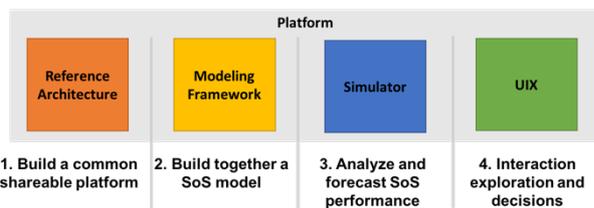


Fig. 2 Overview of architectural decision making platform.

本研究では、この意思決定プラットフォームのうち、Modeling Framework および Simulator をプロトタイプ

として開発し、LNG 燃料船導入を検討するプロジェクトについて適用を行った。

3 プロトタイプ開発

3.1 Modeling Framework

本研究では、System modeling をするための手順を以下のように提案する。

1. 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. システム全体の整理・定式化
5. ケースにおけるシナリオの設定

まずプロジェクトに関わる Stakeholder を洗い出し、分析を行う。この際、プロジェクトに関する意思決定項目をもつ Stakeholder は誰なのか、意思決定項目間の関係、そしてシステム自体が満たす Needs が何かを正確に書き出すことが重要である。分析には、Stakeholder Value Network[5]を用いる。次に対象とするシステムの境界を設定する。Sociotechnical なシステムにおいてシステム全体を捉えようとする複雑すぎ、簡略化しすぎるとシステムの挙動を正しく把握できないという問題がある。ここではシステムの複雑さをコントロールするために対象とするシステムの境界について議論する。対象システムが定まったところで、評価のためのシステムのライフサイクル特性(*ility*)を定める。このステップで定めた *ility* と、システムの実現に必要な初期コストをもとにシミュレーションの結果を評価し、Tradespace の探索を行うため、*ility* は意思決定者の目的にそって慎重に選ばれる必要がある。そして定めた境界と *ility* に従い、システムを定式化する。具体的には、システムへ入力する初期値から *ility* が計算できるような定式化が必要である。最後にプロジェクトにおけるシナリオの設定を行う。シナリオの設定とは、シミュレーションのための初期値の設定を意味する。シミュレーションの初期値には、意思決定者のコントロールできる意思決定項目とそれ以外の初期値に分けられる。得られたモデルと定義したシナリオを入力としてシミュレータに引き渡す。

3.2 Simulator

3.1 から得られる System modeling の結果をもとにシミュレーションを行うプログラムを開発した。シミュレータはエージェントベースの離散イベントシミュレーションを行う。3.1 で定義した *ility* およびシナリオによってシミュレータの入力、出力が定まる。具体的には、意思決定項目とそのオプションを並べ

た Morphological Matrix[6]とシナリオの集合を入力とすると、対応する ility のシミュレーション結果が出力される。

4 船舶代替燃料問題への適用

4.1 はじめに

開発した Modeling Framework および Simulator を代替燃料船導入プロジェクトへ適用する。具体的には、代替燃料船の導入を考えている船主と LNG バンカリング設備の導入を検討しているポートオペレーターの意思決定についてケーススタディを行う。ケーススタディを通して、開発したシミュレータの定性的な挙動の検証、および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実現できることの確認を行う。

4.2 システムモデリング

4.2.1 ステークホルダー分析

作成した SVN を Fig. 3 に示す。価値の入出力を表す矢印の本数の多さから今回のプロジェクトにおいて中心的な役割を担うのはポートオペレーターと船主であることが明示的に図示された。

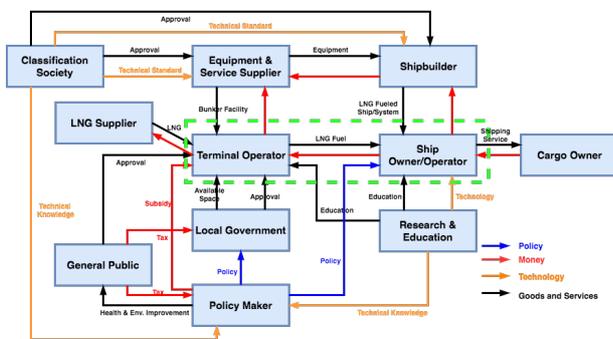


Fig. 3 Stakeholder value network of ship transportation.

4.2.2 System boundary の定義

本ケーススタディの目的はシミュレータの挙動の検証と、開発したプロトタイプによって提案した意思決定手法が実現できることを確認することである。そのため必要以上に問題が複雑になることを避けるため、Stakeholder analysis において中心的な役割を担うポートオペレーターと船主との価値のやり取りをシステムの境界として設定した。

4.2.3 システムの ility の定義

4.2.2 で定義した通り、今回のケースでは船主とポートオペレーターに着目する。システムの評価に用いる ility としては、コスト効率性、環境性能、および輸送の質を定義する。具体的には、コスト効率性として燃料効率[\$/ton*km]を、環境性能としてはトンキロあたりの SO_x, NO_x, CO₂ の排出量[ton/ton*km]を、輸送の質としては沖待ちが発生した時間の割合[%]を定義する。これらの ility をシステムの初期コストと照らし合わせて、Tradespace を可視化する。

4.2.3 システム全体の整理・定式化

今回のシミュレーションで用いたモデルを Fig. 4 に示す。Fig. 4 はモデルを Object Process Methodology (OPM)[7]を用いて表現している。長方形のノードがオブジェクトを表し、楕円形のノードがプロセスを表す。OPM では、システムをオブジェクトとプロセスの集合と考え、それらを数種類のリンクで関係づけることで、システムを表現する。

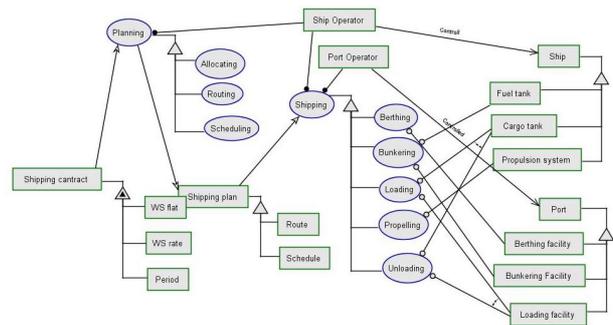


Fig. 4 OPM model for the simulation.

Fig. 4 のシミュレーションモデルでは、エージェントとして船主、ポートオペレーター、船、港を定義する。運航に関する契約が入力として船主に与えられると、船主は自身の保有する船舶の状態を確認し、可能な限り船舶を契約に対して割り当てる。このとき船舶にはルート、およびスケジュールが割り当てられ、それらに従い船は運航を行う。運航の際に、船舶は自らの燃料を消費し、排ガス(SO_x, NO_x, CO₂)を生産する。運航している船舶が港に到着すると、設備の空き状況を確認し、可能であれば着棧、積み上げ、積み下ろし、バンカリングを行う。このとき、船主からポートオペレーターに対して使用料が支払われる。船舶が割り当てられた運航を終えると、船主には契約に沿った金銭が支払われる。エンジンとして、燃料油(HFO, MGO)と LNG が両方使用可能な場合、船舶は港に到着するごとに燃料価格を確認し、その時点で最も価格の低い燃料を補給する。このシミュレーションから出力される燃料効率 E_{fuel} 、沖待ちが発生した時間の割合 $R_{waiting}$ 、SO_x, NO_x, CO

2 排出量 M_{SOx} , M_{NOx} , M_{CO2} は以下の数式(1)~(3)によって計算される。FCC は船舶ごとにかかった燃料コスト[\$], M_{cargo} は 1 航海において運搬した貨物の総重量[ton], $D_{transported}$ は運航距離[km]を意味する。また, $T_{waiting}$ は船舶ごとに発生した待ち時間の総量, $T_{transporting}$ は総運航時間のことである。 m_{gas} [ton]は 1 隻の船舶が排出した排ガスの総量である。

$$E_{fuel} = \sum_{ship} \frac{FCC}{\sum(M_{cargo} \cdot D_{transported})} \quad (1)$$

$$R_{waiting} = \frac{\sum_{ship} T_{waiting}}{\sum_{ship} T_{transporting}} \quad (2)$$

$$M_{gas \in (SOx, NOx, CO2)} = \sum_{ship} \frac{m_{gas}}{\sum(M_{cargo} \cdot D_{transported})} \quad (3)$$

4.2.4 ケースにおけるシナリオ設定

今回のケースでは、船種を VLCC に限定し、航路も日本-アラビア湾間のみを考慮する。VLCC はアラビア湾でオイルを積み、日本まで運搬する。本ケーススタディで考慮する意思決定項目を Table 1 に Morphological Matrix の形式で示す。船舶の燃料としては、HFO, LNG, MGO, もしくは 2 種類の燃料をスイッチしながら運用するパターンを考慮する。エンジンのタイプとしては、LNG のみで走る Gas エンジン, LNG と燃料油のどちらも使用可能な Dual fuel, もしくは Gas-diesel エンジンの 3 種類を考える。Dual fuel エンジンと Gas-diesel エンジンの違いは、環境性能にあり、Gas-diesel エンジンが若干悪い。LNG バンカリングが行える港については、貨物の生産地であるアラビア湾は固定とし、補給場所を日本、シンガポールの 2 種類を考えた。また LNG バンカリングの方法としてはトラックを用いる(Truck to Ship), バンカリング船を用いる(Ship to Ship), パイプラインから直接(Shore to Ship)の 3 種類を考慮した。

Table 1 Morphological Matrix of stakeholders' decisions

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

シミュレーションの設定値については Table 2 に示す通りである。数値については DMA[8]のレポートを参考に作成した。船舶による輸送の需要は、全船舶が運航するだけの十分な需要があるものと仮定し、燃料価格や市場についても基本的には設定した初期値から変更はないものとしたが、LNG の価格のみ 3 種類の燃料価格でばらつくものとした。シミュレーションでは 1 年間の運航を計算し、それに応じて各 ility の算出を行った。また、LNG 燃料船 1 隻の増設に必要なコストは、50[M\$], MGO 燃料補給設備 1 基あたりのコストは 10[M\$], Shore to Ship に必要な基地 1 基あたりのコストは 940[M\$], LNG バンカリングトラック 1 台あたりのコストは 0.5[M\$]として計算を行った。

Table 2 Input data for simulation

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		

4.3 Tradespace の可視化

シミュレーションの結果を可視化した様子を Fig. 5, 6 に示す。シミュレーションの結果は図に示すように ility を 2 軸にとったグラフの形式で可視化する。Fig. 5 は横軸を初期コスト[M\$], 縦軸を燃料コスト

の効率[\$/ton*km], とし, Fig. 6 では横軸に初期コスト[M\$], 縦軸に環境性能, ここでは NOx の排出量 [ton/ton*km]をとっている.

Fig. 5 におけるプロットの種類は沖待ちが時間発生した時間の割合を表しており, 沖待ちが全く発生しなかったもの, 割合が3%以下であったもの, それ以外の3つのクラスに分けて表示している. Fig. 5 からは, 初期コストと燃料効率性にトレードオフの関係があることが見て取れる. Fig. 5 においては, 燃料コスト効率, 初期コストともに低い方が理想的であるため, 原点がユートピアとなる. Fig. 5 からユートピアに近づくためには3%以下ではあるが沖待ちを発生させる必要があることが分かる. これは, Dual Fuel エンジン, または Gas Engine によって燃料をスイッチすることが燃料コスト効率を良くすることができる一方で, 使用される燃料が動的に変化することで湾内に混雑が生じる可能性があることが理由である.

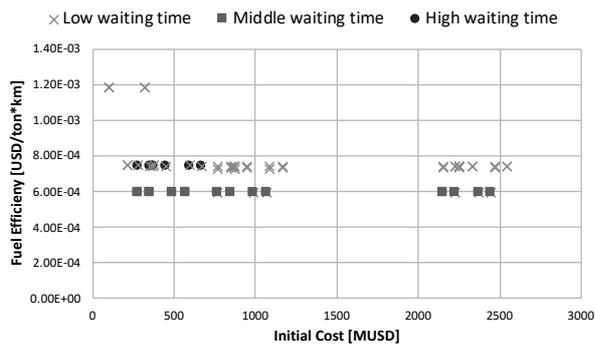


Fig. 5 Tradespace: initial cost vs fuel cost efficiency.

また Fig. 6 からは初期コストと環境性能に同様のトレードオフの関係があることが読み取れる. Fig. 6 では NOx の排出量を示しているが, CO2 についても同様の結果を得ることができた.

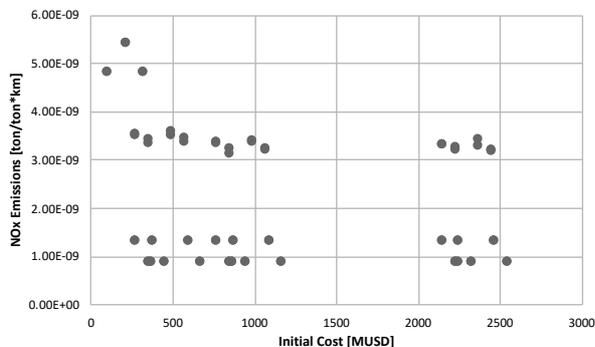


Fig. 6 Tradespace: initial cost vs. NOx emission

5 考察

Fig. 5, 6 に示した通りシミュレーションの結果, 初期コストに対してコスト効率性および環境性能の間にトレードオフの関係があることが可視化できた. また, コスト効率性と輸送の質にもトレードオフの関係があることが示された. この関係は直感ともよく一致し, 定性的な挙動は問題ないと考えられる. また, 今回の LNG 燃料船に関して, 提案した意思決定手法を1サイクル分実行し, 適用が可能であることが確認できた. 現実の意思決定を支援するためには, このサイクルを繰り返し, モデリングの改良, 評価のためのilityを増やす等し, より詳細な分析が必要となる.

また本研究では, 意思決定プラットフォームとして Reference Architecture, Modeling Framework, Simulator, UIX の4つを提案している. Reference Architecture については, 今回ケーススタディで取り扱った代替燃料としての LNG のようなケースに繰り返し適用を行い, システムモデルに共通の部分を抜き出すことで, 構築を進めていく必要がある. Reference Architecture の構築によって, モデルの再利用, ステークホルダー間のコミュニケーションの円滑化が期待される. また今回のケーススタディでは, 2次元グラフによって Tradespace を可視化した. しかし結果の分析が詳細にできない, といった問題もある. 意思決定を支援するような UIX としては Tangible User Interface(TUI)[9]などが研究されているが, 本プラットフォームもそのような UIX の拡張が必要である.

6 結言

本研究では, 海事産業における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い, そのプロトタイプを開発した. また提案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代替燃料船の開発・導入に関して適用を行った. シミュレーション結果を, 海運システムのコスト効率性, 輸送の質, 環境性能といった指標を初期コストのもとに可視化することでシミュレータの定性的な挙動を確かめることができた. また, ケースを通して開発した意思決定プラットフォームの適用を行うことで, プラットフォームによって意思決定を支援する仕組みが実現できることを確認し, 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実現できることを確認した.

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。

参考文献

- [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] L. de Weck, O., Roos, D., and L. Magee, C. : Engineering Systems, THE MIT PRESS, pp. 187-188, 2011.
- [4] Crawley, E., Cameron, B., and Selva, D. : System Architecture Strategy and Product Development for Complex Systems, Pearson, pp. 331, 2016.
- [5] 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.
- [6] Zwicky, F. : The Morphological Approach to Discovery, Invention, Research and Construction, *New Methods of Thought and Procedure*, pp. 273-297, 1967.
- [7] Dori, D. : Object Process Methodology—a Holistic Systems Paradigm, Springer, 2002.
- [8] Danish Maritime Authority. : North European LNG Infrastructure Project. A Feasibility Study for an LNG Filling Station Infrastructure and Test of Recommendations: 20, 2012.
- [9] Alrashed, T., Almalki, A., Aldawood, S., Alhindi, T., Winder, I., Noyman, A., Alfaris, A., and Alwabil, A. : An Observational Study of Usability in Collaborative Tangible Interfaces for Complex Planning Systems. *Procedia Manufacturing*, Vol. 3, pp. 1974-1980, 2015.