

エネルギー資源の国際輸送におけるリスク評価

A Risk Management in International Transportation of Energy Resources

情報工学専攻 稲田 啓佑

Information and System Engineering INADA Keisuke

1 はじめに

2011年に発生した福島第一原子力発電所の事故を契機として原子力による発電が減少し、LNG (Liquefied Natural Gas) 火力による発電が増加している。エネルギー源を輸入に頼っている現状を踏まえると、エネルギー安全保障を強化することは、最重要テーマであると考えられる。本研究は、エネルギー資源を船舶で輸送する際の不確実性を「リスク」と定義し、海上輸送に対して、輸入先の**カントリーリスク**と輸送ルート上の**輸送リスク**を評価することを目的とする。輸送リスクは輸送ルート上で**チョークポイント**(ホルムズ海峡, マラッカ海峡, ソマリア沖, スエズ運河, パナマ運河)を通る際の**リスク**(**チョークポイントリスク**)と**海難事故**に遭遇する**リスク**(**海難事故リスク**)と定義する。ここでは、チョークポイントリスクはチョークポイントを通航する際に海賊に襲われることで輸送量が変動するリスクと定義する。

まず、輸入先の**カントリーリスク**を考慮して、ポートフォリオ選択理論を用いることで、輸送コストを現状とほぼ変えずにリスクを低減できる輸入先・輸入量を決定するモデル(**Country risk assessment model ; CRAM**)を構築する。次に、輸送ルート上の輸送リスクを低減できる船舶の割り当てを決定するモデル(**Transport risk assessment model ; TRAM**)を構築する。さらに、**CRAM**と**TRAM**を組み合わせたモデル(**Two-stage model ; TSM**)を考える。図1は**CRAM**と**TRAM**の関係を表したものである。まず、**CRAM**に入力データとして輸入候補先毎の船舶による平均輸送量と資源1トン当たりの輸送コストを与える。**CRAM**では、その入力データをもとに**カントリーリスク**が最も低くなる輸入量の割り当てを決定する。次に、**TRAM**では、**CRAM**で求めた輸入量の割り当てを入力データとして、輸送リスクが最も低くなる船舶の割り当てを決定する。ここまでの**TSM**の流れである。**TSM**を解いた結果、輸入候補先毎の船舶による平均輸送量と資源1トン当たりの輸送コストが更新される。その

更新された値を**CRAM**の入力データとして与え、再び輸入量の割り当てを求めるという一連のプロセスを複数回繰り返すことで実行可能解を複数求める。この**TSM**を繰り返し計算するモデルを**ITSM (Iterative Two Stage Model)**と呼ぶことにする。**ITSM**によって得られた**TSM**の実行可能解を**GIS**上で可視化して、分析することで、エネルギー資源の国際輸送におけるリスク評価をする。

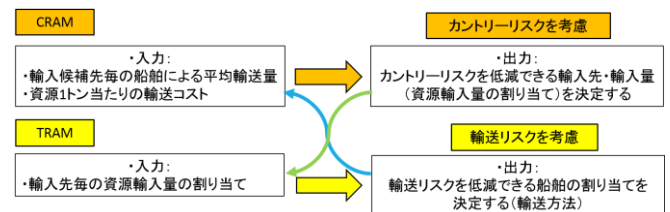


図1 CRAM と TRAM の関係

2 使用データ

本研究では、日本にLNGを輸送しているLNG船を対象として、船舶動静データ(Lloyd's List Intelligence社製)とデジタル海上航路ネットワークを利用して、チョークポイントの通航回数、LNGの各輸入先から日本までの平均航海距離を推測する。船舶動静データはそれぞれの船舶が一年間に寄港した場所を時系列に表している。このとき、LNG船の載貨重量トン単位輸送量と仮定する。詳細については、鳥海[1]を参照されたい。また、船舶が大きいほど輸送コストは低くなるという規模の経済性を考慮し、森田[2]のLNG船の輸送コスト試算データを用いて輸送コストを推計する。

次に、カントリーリスクを定量的に評価するために、国毎の債務支払い状況、経済・金融事情等の情報に基づきOECDカントリーリスク専門会合が発表している8段階でカントリーリスクを評価している国カテゴリー表を使用する。また、チョークポイントリスクに影響を与える海賊発生確率は、国際海事局(International Maritime Bureau)が公表している海賊発生データによって定める。さらに、海難事故リスクは、先行研究である小田野ら[3]

の手法を使用して評価する。

最後に、財務省が公表している貿易統計データの中の日本のLNG輸入国別の輸入量のデータを使用する。

3 カントリーリスク評価モデル (CRAM)

CRAMでは、資産のリスクを表す指標として分散を用いて、資産選択を行う手法であるポートフォリオ選択理論を使用する。このとき、資産をエネルギー資源と考え、エネルギー資源の輸入先・輸入量を決定するモデルを構築する。

3.1 CRAMのシナリオの定義

CRAMでは、輸入先で発生した問題（カントリーリスク）によりエネルギー資源を輸入できない場合を想定し、幾つかのシナリオを作成する。シナリオの簡単な例を表1に示す。この行列において、行は輸入先を表し、列は発生するシナリオを表している。B国からの輸送を例に説明すると、B国で問題が発生した場合（B国リスク）は輸送に失敗したとして輸送量は0となる。一方、A国で問題が発生した場合（A国リスク）、B国からの輸送には問題が無いため、輸送量 α トンが輸送できることを表している。最後に、それらの問題が発生しなかった場合は、輸送に成功したもとして（輸送成功）、輸送量 α トンが輸送できることを表している。これらのシナリオは互いに独立であり、いずれかのシナリオが実現されるものとする（各シナリオの生起確率の和は1となる）。

表1 シナリオ行列の例

	A国リスク	B国リスク	輸送成功
A国	0	β	β
B国	α	0	α

3.2 シナリオ発生確率の定義

本研究では、輸入先で問題が発生する確率は国毎に異なるものと考え、国カテゴリー表におけるリスクの一番高い国であれば1%、リスクの一番低い国であれば0.125%とし、8段階で定義する。

3.3 CRAMの定式化

本研究では、カントリーリスクを現状より低減できる輸入先・輸入量を求めるために分散の値を最小化するCRAMを以下のように定式化する。

I : 輸入先の集合

T : シナリオの集合

x_i : 輸入先 i の輸入比率（決定変数）

z_i : 輸入先 i から資源を輸入するかどうかを表す 0-1 変数（決定変数）

c_i : 輸入先 i の 1 トンあたりの輸送コスト

s_i : 輸入先 i の供給可能量

a_i : 総輸入量に対する輸入先 i の単位輸入量の比率

ε : パラメータ

r_{it} : シナリオ t の発生時の輸入先 i からの単位輸入量

p_t : シナリオ t の生起確率

$\bar{r}_i = \sum_{t \in T} r_{it} \cdot p_t$: 輸入先 i の期待単位輸入量

$\sigma_{ij} = \sum_{t \in T} (r_{it} - \bar{r}_i)(r_{jt} - \bar{r}_j) \cdot p_t \quad \forall i, j \in I$: 分散共分散行列

V : 総輸入量（現状の輸入量）

CT : 目標とする総輸送コスト

$$\min \quad \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sigma_{ij} x_i x_j + \varepsilon \sum_{i \in I} z_i \quad (1)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{i \in I} c_i \cdot x_i \cdot V \leq CT \quad (2)$$

$$x_i \cdot V \leq s_i \quad (\forall i \in I) \quad (3)$$

$$\sum_{i \in I} x_i = 1 \quad (4)$$

$$x_i \leq z_i \quad (\forall i \in I) \quad (5)$$

$$a_i \cdot z_i \leq x_i \quad (\forall i \in I) \quad (6)$$

$$z_i \in \{0,1\} \quad (\forall i \in I) \quad (7)$$

主な制約式を説明する。式 (2) は、総輸送コストの上限制約を表している。式 (3) は、輸入先毎の供給可能量の上限制約である。式 (4) は、輸入量の総量制約である。式 (5)、(6) と式 (1) の第二項は、輸入先毎の資源輸入量の下限制約を表している。

4 輸送リスク評価モデル (TRAM)

TRAMでは、輸入先から日本へエネルギー資源を輸送する際に海難事故に遭遇する、または、チョークポイントを通航する際に海賊に襲われることで資源の輸入量が変動するリスクを輸送リスクと考える。例として、オマーンから日本に資源を輸送する際の輸送リスクを定量化する。オマーンから日本へ資源を輸送する際に、通航する必要のあるマラッカ海峡において確率 p_1 （海賊発生確率）で海賊に遭遇し輸送に失敗すると仮定する。同様に海難事故に確率 p_2 （海難事故発生確率）で遭遇し、輸送に失敗すると仮定すると、輸送に成功する確率は $(1-p_1)(1-p_2)$ となる。よって、船舶の輸送失敗確率（以

下、輸送リスク発生確率)は $1-(1-p_1)(1-p_2)$ と考えることができる。

これらのパラメータを用いて、輸入先毎の輸送リスク発生確率を p 、使用する船舶の単位輸入量 (DWT) を u 、輸送する回数を n とする。このとき輸送結果は輸送リスクにより輸送に失敗するか、輸送リスクが発生せずに輸送成功するかのいずれかであり、 n 回の独立な試行を行ったときの成功数で表される二項分布とみなすことができる。したがって、輸送に失敗する可能性のある資源輸入量の分散 (輸送リスク) は、 $p(1-p)u^2n$ と一般化できる。

次に、本研究では船舶動静データから抽出した2012年に日本が使用している198隻のLNG船を5種類 (class1~class5) にカテゴリー分けする。TRAMでは、カテゴライズした船舶を輸入先毎にどのように割り当てるかを決定する。

4.1 海賊発生確率の定義

海賊発生確率は、チョークポイントを通航する際に海賊に襲われる確率と定義する。そこで、それぞれのチョークポイントに対して代表点を定め、研究対象年に代表点から半径1,000km以内で発生した海賊行為の発生数を、2007年にそのチョークポイントを通航した船舶(LNG船、LPG船、タンカー、コンテナ船)ののべ隻数で除算することで海賊発生確率を定義する。2007年の通航量を用いるのは、データの制約によるものである。

4.2 海難事故発生確率の定義

TRAMでは、海難事故発生確率を用いて、海難事故リスクを評価する。海難事故リスクに関する既存研究として小田野ら[3]がある。小田野ら[3]では、運搬船が海没に至るような重大な衝突事故の発生確率を一般船舶のデータに基づき評価している。本研究では、重大な衝突事故の発生確率 (海難事故発生確率) を算出する際に小野田ら[3]の手法を使用する。

4.3 TRAMの定式化

本研究では、輸送リスクが現状より低減できる船舶の割り当てを求めするためにリスクの指標である分散を最小化するTRAMを以下のように定式化する。

I : 輸入先の集合

J : 船舶のカテゴリーの集合

n_{ij} : 輸入先 i からの輸送で船舶種類 j を使用する回数 (決定変数)

u_{ij} : 輸入先 i からの輸送で船舶種類 j を使用する際の1回の資源輸入量

α_i : 輸入先 i の輸送成功確率と失敗確率の積

x_i : CRAMで求めた輸入先 i からの資源輸入量

uc_{ij} : 輸入先 i からの輸送で船舶種類 j を使用する際の1輸送当たりのコスト

CT : 目標とする総輸送コスト

ut_i : 輸入先 i から日本への1輸送当たりにかかる時間

ttc_j : 船舶種類 j を一年間で使用できる時間

$$\min \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \alpha_i \cdot u_{ij}^2 \cdot n_{ij} \quad (8)$$

$$\text{s.t.} \sum_{j \in J} n_{ij} \cdot u_{ij} \geq x_i \quad (\forall i \in I) \quad (9)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} n_{ij} \cdot uc_{ij} \leq CT \quad (10)$$

$$\sum_{i \in I} ut_i \cdot n_{ij} \leq ttc_j \quad (\forall j \in J) \quad (11)$$

$$n_{ij} \in \{0, 1, \dots\} \quad (\forall i \in I) \quad (\forall j \in J) \quad (12)$$

制約式を説明する。式(9)は資源輸入量の下限制約である。式(10)は総輸送コストの上限制約を表している。式(11)は船舶の使用できる時間の上限制約である。式(12)は決定変数の非負整数制約である。

5 ITSMの実行結果

ITSMを用いて、日本における2012年のLNG輸入を対象とした数値実験を行う。数値実験における仮定を以下に示す。

- ① 輸入候補先は2012年に輸入実績のある21カ国とする。
- ② 各輸入候補先における供給可能量は2012年の輸入量の2倍とする。
- ③ 日本における総需要は2012年と同じとし、総輸送コストの上限も2012年と同じとする。
- ④ 各輸入候補先からの単位輸送量は、各輸入候補先から航行しているLNG船の平均輸送量とする。(1回目にCRAMを解く際には船舶動静データの各輸入先の平均輸送量を単位輸送量とする。)
- ⑤ 使用できるLNG船の種類は、class1が6隻、class2が5隻、class3が109隻、class4が68隻、class5が10隻の計5種類の198隻とする。

⑥ 輸送にかかる時間は、全てのLNG船で輸入先毎に一定とし、それに加えLNGの積み込みに1日、積み下ろしに2日かかると仮定する。

以上の仮定をもとにパラメータを定めて、IBM社の数値計画のソルバーCPLEX12.4を用いて実行可能解が出せなくなるまで数値実験を行った。その結果、ITSMによって実行可能解を32個得ることができた。今回は、特徴的な解であるカントリーリスクが最も低い2番目の解と輸送リスクが一番低い1番目の解を比較する(図2, 図3)。図2, 図3は、CRAMで決定した輸入先毎のLNG輸入量の割り当てを円の大きさで表している。また、TRAMで決定した5種類のLNG船の輸入先毎の使用比率を円の中の5色の比率で表している。

図2のカントリーリスクが最小となった実行結果を詳しく見ると、チョークポイントを通航せずに輸送できるロシアの輸送にclass4の大きなLNG船を多く使用している。また、チョークポイントを通航する必要のある、例えば、エジプトやイエメンからの輸送にはclass1やclass2の小さいLNG船を使用していることがわかる。

図2の実行結果ではclass4の大きなLNG船がロシアの輸送には積極的に使用されていた。一方、図3の実行結果ではclass4とclass5の大きなLNG船はあまり使用せずに全体的に小さいLNG船を使用している。この結果、図3は図2より輸送リスクが低減できたと考えられる。以上の結果から、カントリーリスクと輸送リスクの重視する比率を決定すれば、現状より輸送コストを増加させることなくリスクを低減できる最良なLNGの輸入先・輸入量と輸送方法を求められることがわかった。

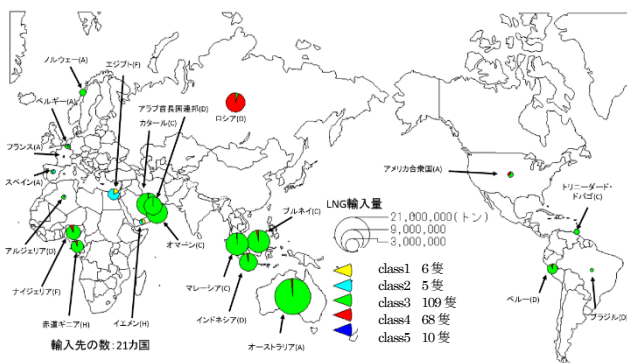


図2 実行結果 (カントリーリスク最小)

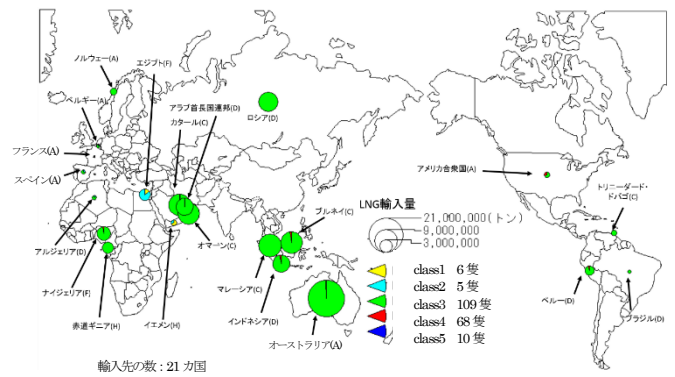


図3 実行結果 (輸送リスク最小)

6 おわりに

本研究では、分散をリスクの指標と考え、カントリーリスクと輸送リスクを評価するモデルを構築した。その結果、カントリーリスクと輸送リスクの重視する比率を決めれば、現状よりリスクを低減できるLNG輸入先・輸入量と輸送方法を求めることができた。本モデルを2007年のデータに適用してみたところ、2012年よりもカントリーリスクが大きいことがわかった。その理由は、2012年より輸入先数が少ないためであると考えられる。

また、2007年と2012年の違いとして、船舶の大型化が進んでいることが挙げられる。そこで、船舶の大型化がリスクに与える影響を分析するために、TRAMの船舶の使用時間の上限制約を除外し、輸送コストを変化させて感度分析を行った。その結果、輸入先数や輸入量が同じ条件の場合、船舶の大型化はカントリーリスクと輸送リスク双方を悪化させてしまうという知見を得ることができた。

参考文献

- [1] 鳥海重喜, 「海上航路ネットワークを用いたコンテナ船の運航パターン分析」, 『オペレーションズ・リサーチ誌』, 55(6), 359-367, 2010.
- [2] 森田浩仁, 「世界のLNG船市場等に係る調査 (変化の途上, あらたなビジネスモデルを探るLNG船)」, 日本エネルギー研究所研究レポート, 2006年10月.
- [3] 小田野直光, 澤田健一, 望月宙充, 平尾好弘, 浅見光史, 「放射線輸送物の海上輸送におけるリスク評価に関する研究—リスク評価のための海難事故データの整備—」, 海上技術安全研究所報告, 第10巻, 第3号, (平成22年) 総合報告.