

# 不確実性を考慮したエネルギー資源の輸入先と輸送手段の評価

## Evaluation of Importing Countries and Transportation Mode of Energy Resources Considering Uncertainty

情報工学専攻 関森 あゆみ

Information and System Engineering SEKIMORI Ayumi

### 1 はじめに

現在、日本は一次エネルギーを輸入に頼っており、天然ガスにおいては97%を輸入している。このことは、安定的な資源の確保が非常に重要であることを示している。また、日本は島国であるためエネルギー資源は船舶で輸入されている。しかし、全世界での天然ガスの貿易量を見ると、重量ベースで船舶輸送は33%であり、パイプライン輸送が残りの67%を占めている[1]。天然ガスはパイプラインであればガスそのまま輸送できるが、船舶輸送となると、液化天然ガス(Liquefied Natural Gas; LNG)として輸送される。日本には資源を輸入するパイプラインが敷設されていないため、船舶で輸送するしか方法がない。

先行研究として稲田[2]は、エネルギー資源の輸送に影響を与える可能性のある不確実性をリスクと定義し、輸出国で問題が発生するリスク(カントリーリスク)と輸送ルート上で問題が発生するリスク(輸送リスク)に関して、数理モデルを用いてリスク評価している。しかし、このモデルは船舶輸送のみを想定しているため、複数の輸送手段を扱うことはできない。そこで本研究では、輸送手段としてパイプライン輸送と船舶輸送を想定し、カントリーリスクと輸送リスクの2つの観点から、数理モデルを用いて、安定的な資源の輸入に関して評価する。具体的には、カントリーリスクを考慮し、輸入量を決定する数理モデル(輸入量決定モデル)と輸送リスクを考慮し、輸送手段を選択する数理モデル(輸送手段選択モデル)を構築する。そして、この2つのモデルを組み合わせることで輸入量と輸送手段を決定し、輸入量やコスト、リスクに関する分析を行う。

輸入量決定モデルは資源調達にかかるコストと資源不足や超過にかかるコストを最小とする輸入量を決定する。そして、輸送手段選択モデルは輸入量決定モデルで得られた輸入量を各輸出国からの供給量とし、輸送手段の導入コストと輸送コストを最小とする輸送手段を選択する。このモデルでの輸送リスクは期待損失量とする。

そのため、輸入量決定モデルで輸入量を求める際には、輸送手段選択モデルで考慮する期待損失量の分を上乗せした総輸入量を確保することとする。

### 2 輸入量決定モデル

金融工学のValue at Riskの考え方を参考にし、ある確率以上で指定した資源量を確保し、資源価格を含む資源調達にかかるコストと資源不足によりさらなる資源を調達するコストや超過にかかる在庫コストを最小とする輸入量を決定する数理モデルを構築する。

#### 2.1 カントリーリスクと想定するシナリオ

本研究でのカントリーリスクの定義は、輸出国で問題が発生し、輸入が失敗することを想定する。数理モデルへリスクを取り入れるにはリスクを定量化する必要があるが具体的な数値を与えるのが難しいため、本研究ではOECDカントリーリスク専門家会合によって決められた国カテゴリー表を使用する。これは国ごとの債務支払い状況や経済・金融情勢等の情報に基づき議論され、8段階にレベル分けされたものである。これをもとに、最もリスクの高い国を1%、最もリスクの低い国を0.125%とし、8段階でカントリーリスク発生確率を定義する。

また、本モデルでは各輸出国からの輸入が成功するときと失敗するときのシナリオを用意する。想定するシナリオは、①1か国からの輸入が失敗する、②複数国からの輸入が失敗する、③すべての国からの輸入が成功する、の3種類とする。シナリオの発生確率はカントリーリスク発生確率をもとに算出する。ただし、②のシナリオの発生確率は、事前に与えるものとする。

#### 2.2 定式化

輸出国の集合を $I$ 、シナリオの集合を $T$ とし、以下のように定式化する。

$x_i$ : 輸出国 $i$ からの輸入量(決定変数)

$z_t$ : シナリオ $t$ の輸入量が指定した資源量 $aV$ を下回れば1, そうでなければ0(決定変数)

$c_i$ : 輸出国 $i$ の1トンあたりの資源調達コスト

$r_{it}$ :シナリオ $t$ で輸出国 $i$ からの輸入が可能ならば 1, 不可能ならば 0

$\beta$ :資源量 $aV$ を確保する確率水準

$a$ :需要量よりも多く確保するための係数

$p_t$ :シナリオ $t$ の発生確率  $C$ :資源不足・超過コスト係数

$s_i$ :輸出国 $i$ の供給可能量  $V$ :輸入国の需要量

$$\min \sum_{i \in I} c_i x_i + C \sum_{t \in T} p_t (\sum_{i \in I} r_{it} x_i - aV)^2 \quad (1)$$

$$\text{s.t.} \sum_{t \in T} z_t p_t \leq 1 - \beta \quad (2)$$

$$\sum_{i \in I} r_{it} x_i \geq aV(1 - z_t) \quad (\forall t \in T) \quad (3)$$

$$0 \leq x_i \leq s_i \quad (\forall i \in I) \quad (4)$$

$$z_t \in \{0,1\} \quad (\forall t \in T) \quad (5)$$

式(1)は目的関数で、第1項は資源価格を含む資源調達コスト、第2項は輸入量の過不足に対するコストを表している。式(2)は確率水準 $\beta$ を確保する制約式、式(3)は各シナリオの輸入量と指定した資源量との関係を表す変数 $z_t$ の制約式である。式(4)は供給可能量の制約式である。

### 3 輸送手段選択モデル

輸入量決定モデルで得られた輸入量を各輸出国からの供給量とし、輸送手段の導入コストと輸送コストを最小とする輸送手段を選択する数理モデルを構築する。

#### 3.1 輸送ネットワーク

本研究で使用するネットワークについて説明する。輸送手段は船舶輸送とパイプライン(PL)輸送を想定し、ノードは、①船舶輸送の端点となる港、②PLの端点、③輸出入国の代表点とする。リンクは、(i)港間を結ぶ船舶リンク、(ii)PLの端点を結ぶPLリンク、(iii)輸出入国の代表点とその国における各輸送手段の端点を結ぶダミーリンクに分類される。なお、PLの端点が輸出入国でない国にある場合、港とPLの端点とを同一ノードとして扱う。

船舶リンクの航海距離は鳥海[3]のデジタル海上航路ネットワークから推計し、PLリンクは大圏距離、ダミーリンクの距離は0とする。本研究ではPLの敷設候補地を所与とする。

#### 3.2 輸送リスク

輸送リスクとして想定する事象は、船舶ではチョークポイントで海賊に遭遇する事象(チョークポイントリスク)と海難事故に遭う事象(海難事故リスク)を、PLではテロ攻撃を受ける事象(PLテロリスク)を考え、これが生じた際には輸送に失敗するとみなす。そして、それ

ぞれの発生確率をもとに輸送失敗確率を算出する。例えば、ある経路でのチョークポイントリスク発生確率を $p_1$ 、海難事故リスク発生確率を $p_2$ 、PLテロリスク発生確率を $p_3$ とすると、その経路での輸送成功確率は、 $(1-p_1)(1-p_2)(1-p_3)$ となる。よって輸送失敗確率は、 $1-(1-p_1)(1-p_2)(1-p_3)$ となる。このように、経路ごとに輸送失敗確率を算出する。

#### 3.3 定式化

ノードの集合を $N$ (輸送手段の端点の集合を $N_p$ 、輸出国の代表点の集合を $N_e$ 、輸入国の代表点を $h$ で表し、 $N = N_p \cup N_e \cup \{h\}$ である)、リンクの集合を $J$ (船舶リンクの集合を $J_s$ 、PLリンクの集合を $J_p$ 、ダミーリンクの集合を $J_{io}$ で表し、 $J = J_s \cup J_p \cup J_{io}$ である)、経路の集合を $K$ とし、以下のように定式化する。

$x$ :船舶の必要隻数(決定変数)

$y_j$ :PLリンク $j$ を敷設するとき1、そうでないとき0(決定変数)

$f_{kj}$ :経路 $k$ でのリンク $j$ の使用回数(決定変数)

$A$ :船舶一隻の建造コスト  $a_j$ :PLリンク $j$ の敷設コスト

$b_j$ :リンク $j$ の単位輸送コスト

$\delta_{nj}$ :リンク $j$ に対し、ノード $n$ が始点のとき1、終点のとき-1、そうでないとき0

$r_{kj}$ :経路 $k$ にリンク $j$ が含まれているとき1、そうでないとき0

$t_j$ :船舶リンク $j$ の輸送日数

$p_k$ :経路 $k$ の輸送失敗確率  $u_j$ :リンク $j$ の単位輸送量

$s_n$ :輸出国 $n$ からの輸入量  $L$ :期待損失量の上限值

$D$ :一年間の船舶の稼働日数  $M$ :大きな値

$$\min Ax + \sum_{j \in J_p} a_j y_j + \sum_{j \in J} b_j \sum_{k \in K} f_{kj} \quad (6)$$

$$\text{s.t.} \sum_{j \in J} \delta_{nj} u_j \sum_{k \in K} f_{kj} \geq s_n \quad (\forall n \in N_e) \quad (7)$$

$$\sum_{j \in J} \delta_{nj} u_j f_{kj} = 0 \quad (\forall k \in K, \forall n \in N_p) \quad (8)$$

$$\sum_{j \in J_s} t_j \sum_{k \in K} f_{kj} \leq Dx \quad (9)$$

$$\sum_{k \in K} p_k \left( \frac{\sum_{j \in J} u_j f_{kj}}{\sum_{j \in J} r_{kj}} \right) \leq L \quad (10)$$

$$\sum_{k \in K} f_{kj} \leq M y_j \quad (\forall j \in J_p) \quad (11)$$

$$0 \leq f_{kj} \leq M r_{kj} \quad (\forall k \in K, \forall j \in J) \quad (12)$$

$$0 \leq x \quad (13)$$

$$y_j \in \{0,1\} \quad (\forall j \in J_p) \quad (14)$$

式(6)は目的関数で、第1項は船舶の建造コスト、第2項はPL敷設コスト、第3項は輸送コストを表している。式(7)は供給量を必ず輸入する制約式である。式(8)は輸送手段の端点における流量保存則、式(9)は船舶の使用日数制約である。式(10)は輸送リスクを表す期待損失量の上限制約である。式(11)はPLが敷設されていなければ使用できない制約、式(12)はリンクの使用回数の制約である。

#### 4 数値実験

日本の一年間における天然ガス輸入を対象とした数値実験を行う。仮定を以下に示す。

<輸入量決定モデルの仮定>

- ① 輸出国は、2012年に輸入実績のある21か国とする。今回はそれらの国々を、(1)東南アジア3か国、(2)中東4か国、(3)その他14か国、の3つの地域に分類する。
- ② シナリオは、本来ならば $2^{21}$ 通りとなるが、数が多く、根拠のある発生確率を与えるのが難しいため、以下の37に絞る。(1)その他14か国のうち1か国からの輸入が失敗する(14通り)、(2)東南アジアもしくは中東の複数国からの輸入が失敗する(それぞれ $2^3 - 1$ 通り、 $2^4 - 1$ 通り)、(3)輸出国すべての国からの輸入が成功する(1通り)、の3種類とする。
- ③ シナリオの発生確率は、2012年の国カテゴリー表をもとにする。複数国からの輸入が失敗するシナリオの発生確率は、輸入が失敗する国が多いほどそのシナリオは起こりにくいと考え、事前に与える。
- ④ 1トン当たりの資源調達コストは、2012年貿易統計の資源調達費用を輸入量1トン当たりで算出したものである。
- ⑤ 供給可能量は2012年の輸入量の2倍とし、需要量 $V$ は2012年の総輸入量、必要とする量 $aV$ は需要量に期待損失量の上限を上乗せした量とする。
- ⑥  $C = 0.01$ 、確率水準 $\beta = 0.95$ とする。

<輸送手段選択モデルの仮定>

- ⑦ 輸出国の供給量は輸入量決定モデルで得られた輸入量とする。
- ⑧ 単位輸送量は船舶8万トン、PLは1トンとする。
- ⑨ 船舶とPLの使用年数は15年とし、船舶の建造コストは2億ドル、PLの敷設コストは青山[4]をもとに、1年あたりで算出する。
- ⑩ 船舶の輸送日数は船舶が19ノットで走行すると仮

定し、往復距離で算出する。それに加え、積み込み  
に1日、積み下ろしに2日かかるとする。

- ⑪ 輸送コストは、船舶では森田[5]を参考にし、PLでは1トンあたり1ドルとする。
- ⑫ 一年間の船舶の稼働日数は250日とする。
- ⑬ PL敷設候補地はサハリン(ロシア)～石狩(日本)、ヤンゴン(ミャンマー)～上海(中国)、上海(中国)～長崎(日本)とする。
- ⑭ 期待損失量の上限は需要量の1%とする。

上記の仮定をもとに数値実験を行った。その結果の各輸出国からの輸入量と輸送手段の割合を図1に示す。このときに敷設するPLはサハリン・石狩PLと上海・長崎PLの2つとなった。そしてロシアからはサハリン・石狩PLを使用することになった。また、日本へ直接船舶で輸送する国は、アメリカ合衆国、トリニダード・トバゴ、ペルー、オーストラリアとなり、その他の輸出国からは上海まで船舶で輸送し、上海・長崎PLを用いて輸送することになった。このときの船舶の必要隻数は95隻となった。各輸出国からの輸入量は、特にヨーロッパやアメリカ大陸にある輸出国から現状よりも多くの量を輸入し、供給可能量の上限まで輸入する輸出国が多く見られた。そして、期待損失量の上限を需要量の10%と、輸送リスクを緩和して数値実験を行うと、3つすべてのPLを敷設することになり、船舶の必要隻数は15隻減少し、80隻となった。これらの結果より、期待損失量の上限を厳しくするとPLの使用が控えられ、代わりに船舶輸送が増加することがわかった。今回はPLの方が輸送リスクは高く、船舶の方が輸送リスクは低いことからこのような結果になったと考えられる。次に、図2に結果から得られた船舶の建造コストとPL敷設コストを使用量に応じて振り分けたものを含む各輸出国からの1トン当たりの輸送コスト(青色)と現状のLNGの輸送コスト(赤色)の比較を示す。これより、ロシアの単位コストが大幅に減少したことがわかる。これはPLを使用したことでコストが削減できたと考えられる。その他の輸出国のコストは建造・敷設コストが含まれているため、LNGの輸送コストよりも多くなっている。また、今回はPLの始点が限られていたため、アメリカ大陸の輸出国のように、輸出国の場所によっては直接日本へ船舶で輸送をした方がいいという結果が得られた。

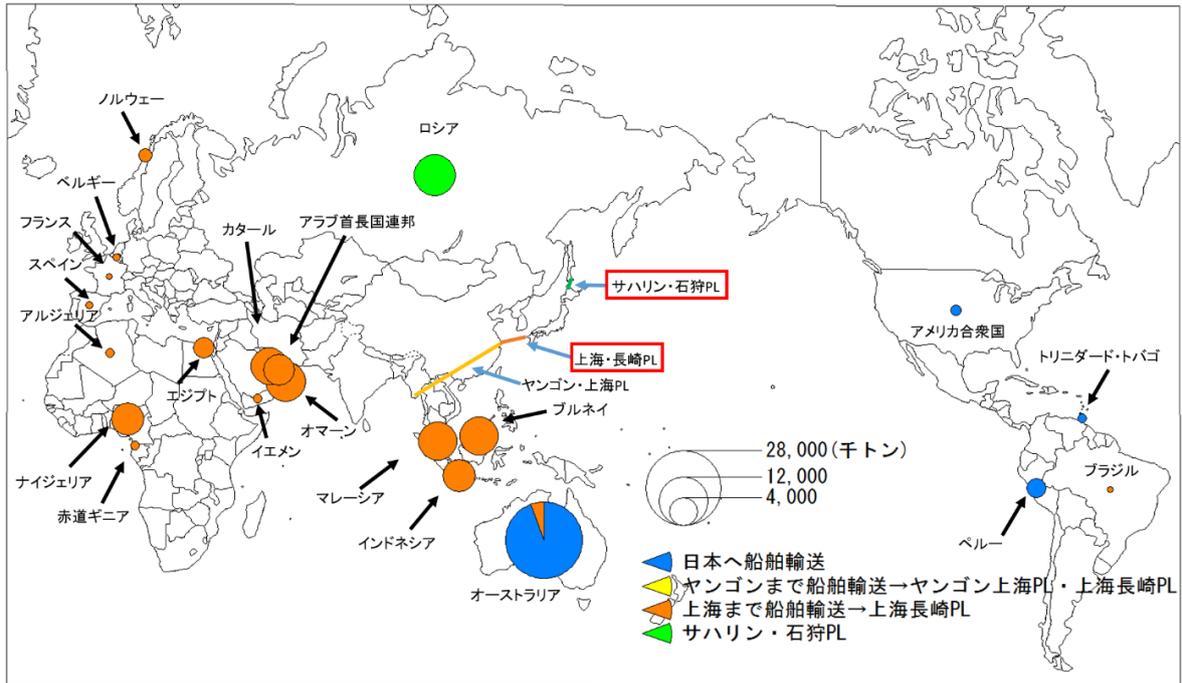


図1 各輸出国からの輸入量と輸送手段

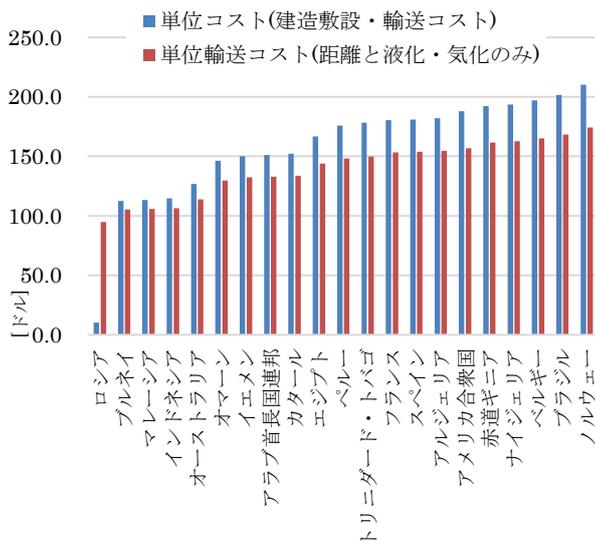


図2 1トン当たりのコスト比較

## 5 おわりに

本研究では、エネルギー資源を輸入に頼っている日本の安定的な資源の輸入を目指し、かつ、新たに輸送手段を取り入れることで、輸送方法に変化が起こるのかどうかを評価したいと考え、カントリーリスクと輸送リスクを考慮して輸入計画を評価できる2つの数理モデルを構築した。そしてその2つのモデルを組み合わせることで数値実験を行い、輸入量と輸送手段を決定した。今回の数値実

験では、パイプラインを使用すると輸送のリスクは増加するが、資源の輸送にかかるコストは削減できることがわかった。これらより、リスクとコストに関する定量的評価が可能となった。

しかし、パイプラインの敷設候補地や、輸出国の代表点などが変化すると、輸送手段も変化する可能性がある。よって、これらの評価もすべきであると考えている。

## 参考文献

- [1] 資源エネルギー庁：「エネルギー白書2016」.
- [2] 稲田啓佑：「エネルギー資源の国際輸送におけるリスク評価」, 中央大学大学院理工学研究科情報工学専攻修士論文, 2015年3月.
- [3] 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.
- [4] 青山伸昭：「海底パイプラインの活用による国内天然ガスインフラ整備」, 第7回ガスエネルギー小委員会, 2012年12月.
- [5] 森田浩仁：「都市ガスとLNG 第6回LNGとの邂逅 ⑤ ー東京電力に共同導入計画を提案ー」, 日本エネルギー研究所研究レポート, 2004年8月.