

## X 企業・社会におけるリスク分散と離散最適化

仲川 勇 二<sup>1)</sup>

はじめに

- 1 投資とギャンブル
- 2 非線形ナップザック問題
- 3 企業と社会における投資リスク

おわりに

### はじめに

2011年3月11日に発生した東日本大震災とアジア地域の急速な発展は、日本企業の海外への事業展開を加速させている。製造業の拠点数を地域別にみると、北米やヨーロッパ等は減少傾向であるが、中国やASEAN 10ヶ国等の東アジア地域では増加している。また、小売業、卸売業、サービス業等については、アジアでは大きく増加しており、日本の製造業がアジアに販売・サービス拠点を積極的に配置していることをうかがえる（原敬徳、古字朗人 2011）。しかし海外での事業展開や多角経営には大きなリスクを伴うことがある。90年代以降、企業の合併や買収のM&Aブームを機に、大企業の多くが多方面への事業展開を行ない、欧米企業のように多国籍企業を目指して海外へ展開するようになった。しかし、業績の向上が実現できないどころか、大きな損失を被ることもあった。当初考えたような業績の向上を達成できないまま、不採算事業からの撤退、事業の統廃合や売却等を行い、本業へ回帰するという事例も起こっている。

投資のつもりで行ったことが、大きなリスクを伴っていることが多くなって

いる。失敗に終わった、野村のリーマン・ブラザーズ買収はそのよい例かもしれない。ひとたびリスクによる損害を被ると、企業の業績が大きく落ち込む。私たちは、何が大きなりスクで何が小さなりスクなのか、もう一度考え直す必要がある。投資のつもりでギャンブルを行っていないか、考え直す必要がある。

大王製紙の創業家経営者が、2010年4月からの1年半で総額100億円を超えるお金を不正に子会社から引き出していた事件は、記憶に新しい。この経営者はギャンブルにはまった理由を、「株式の先物取引やFX（外国の通貨を売買して、利益を得る）取引で多大な損失を出した後にたまたま訪れたカジノでもうけ、深みにはまったものです」と説明していた。この時、私たちは「えー！ギャンブルで100億円の損！」と大変驚いたことを覚えている。

同じ頃に、大手電機メーカーの工場閉鎖のニュースが飛び込んできた。パナソニックが2千5百億円を投資した尼崎工場の閉鎖と、シャープが5千億円を投資した亀山工場の別会社化である。この投資には、当初からギャンブル的な要素があったと思われる。このギャンブルは、大王製紙の場合とは比較にならないほど罪深いものである。尼崎工場は、兵庫県から90億円の企業立地補助金を受け、亀山工場は三重県から135億円の巨額な補助金を受けるなど、地元自治体から多額の補助金を得ていた。税金の無駄遣いであるばかりか、閉鎖に関連した数千人以上の首切りというリストラ策が計画されている。投資失敗の一因は円高だということだが、信越化学工業のように、円高の中でも安定して高い収益を出している企業もある（北島 2012）。

私たちは、投資とギャンブルの違いをどう考えればよいのであろうか？ まず、投資とギャンブルの定義について考えてみる。その後、いくつかの例を用いて、私たちが投資と考えているものの多くが、実はギャンブルであるかもしれないことについて考える。そして、企業や社会における投資リスクを軽減する方法について考えてみたい。

## 1 投資とギャンブル

### (1) 投資とは？ ギャンブルとは？

投資とギャンブルの定義を辞書で引いてみると、

- 投資—利益を得る目的で、事業・不動産・証券などに資金を投下すること。その将来を見込んで金銭や力をつぎ込むこと。
- ギャンブル—金銭や品物などの財物を賭けて偶然性の要素が含まれる勝負を行い、その勝負の結果によって賭けた財物のやりとりをおこなう行為の総称。

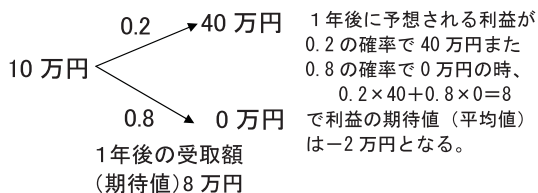
となっている。

投資とギャンブルの違いを、私たちの経験からもう少し分かりやすく定義してみよう。一般的にギャンブルというと、競馬、パチンコ、宝くじ、ルーレットゲームなどを思い浮かべるのではないだろうか？ これらは全て、参加者からお金を集め、その元手から、控除率（てら銭）と呼ばれる運営組織の取り分（手数料）を引き、残ったお金を参加者に対して分配するというものである。

ここで、賭け金に対して戻ってくると見込める金額を、期待値（予想される利益の平均値）で表わすことができる。

10人の参加者が、10万円ずつ賭けた場合を考えてみる。運営組織に入る元手は、 $10人 \times 10万円 = 100万円$ である。控除率を20%とすると、ここから、運営組織が20万円を引き、残った80万円を、参加者10人で分配することになる。たとえば、2人が40万円、残り8人が0万円を得るとするときの期待値は、0.2の割合で40万円、0.8の割合で0万円を得るので、 $0.2 \times 40 + 0.8 \times 0 = 8$ で、8万円となる。これは、初めに賭けた10万円と比べると-2万円と、マイナスの期待値になっている。（図X-1）

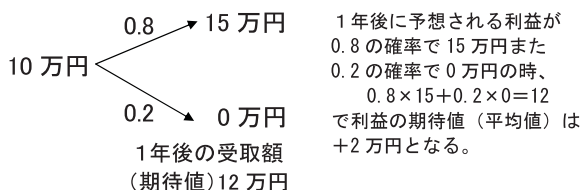
次に、投資について考えてみよう。代表的なものには、不動産投資、証券投資、投資信託などが挙げられる。投資では、出資者が出した元手を運用し、増えた資金から手数料や分配金が出されるという点が、ギャンブルとは大きく異



図X-1 ギャンブルにおける期待値の計算

なっている。当然、結果として元手の資金が減ることもあるが、少なくとも投資を決めるときには、資金が増えると考えることができる。

例を挙げて考えてみる。10人の出資者が10万円ずつ異なる運営組織に出資する。各運営組織はこれを運用することにより、8か所は運用に成功し15万円に増えたとする。運営組織の残り2か所は運用に失敗し0円になったとする。8人に15万円、2人に0万円を分配されることとなる。この時の期待値は、0.8の割合で15万円、0.2の割合で0万円を得るので、 $0.8 \times 15 + 0.2 \times 0 = 12$ で、12万円となる。これは、初めに出資した10万円と比べると、+2万円と、プラスの期待値になっている。(図X-2)

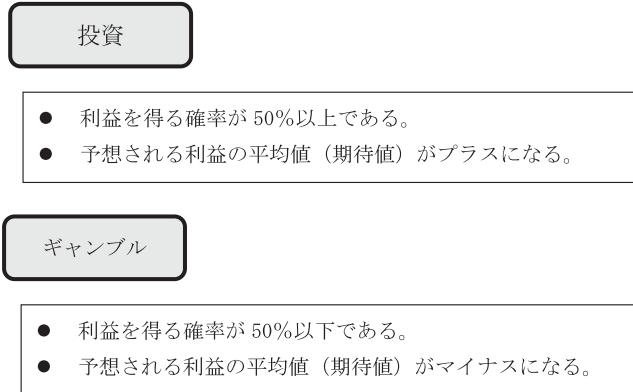


図X-2 投資における期待値の計算

このように、ギャンブルでは、参加者が出した元手が増えることなく、控除率というギャンブルを運営する組織の取り分があるため、利益の期待値(予想される利益の平均値)はマイナスとなる。一方投資は、利益を得る目的で資金を出すわけなので、利益の期待値がプラスであるものということができる。また、負ける確率も低いものである必要がある。ここでは、最低でも50%以上の

確率で利益を得ることができるものと定義することにする。

ただし、期待値がプラスであれば、高リスク高リターンな投資先のように、勝つ確率が低い場合でも、投資の対象となる場合がある。このような投資を行う場合、リスクを低減するための工夫が重要になってくる。（図X-3）

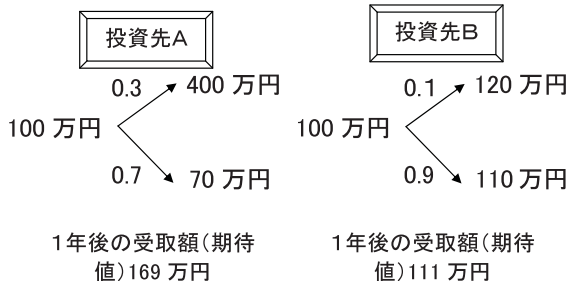


図X-3 投資とギャンブルの定義

## (2) 分散投資によるリスクヘッジ

2011年1月に大阪府豊中市で資産家老姉妹が餓死していたことが報道された。この姉妹がなぜ死亡したのか。室内には大量のゴミが散乱し、電気やガスは止められ、室内から見つかった現金は、100円硬貨が数枚だけだったそうである。自分たちの土地にマンションを建てたが入居者が思うように集まらず、経営に失敗し多額の借金を抱えていたという。この姉妹の間違ひは、一つの投資先にすべての資産を投資したことである。起こりうる様々なリスクを回避し、その大きさを軽減するように工夫するリスクヘッジ（Risk Hedge）が全く考えられていなかったのである。リスクヘッジとしては、将来のリスク低減策を考慮することや、分散投資によるリスクの低減などが代表的な方法である。

分散投資について、簡単な例を用いて説明する。図X-4のような、投資先A



図X-4 投資額100万円で投資先A、Bに投資した例

とBがあったとする。100万円を投資した場合、Aは、1年後に予想される利益が0.3の確率で400万円、0.7の確率で70万円である。一方Bは、1年後に予想される利益が0.1の確率で120万円、0.9の確率で110万円である。あなたなら、AとBのどちらの投資先を選ぶだろうか？ 投資先Aの期待値は、 $0.3 \times 400 + 0.7 \times 70 = 169$ 万円、Bの期待値は $0.1 \times 120 + 0.9 \times 110 = 111$ 万円となる。期待値の点からは、Aが有利だが、AとBどちらに投資するかと聞くと、大半の人がBを選択するだろう。Bは必ず儲かり、損をするリスクはゼロだからである。しかし、得られる収益はそれほど大きくない。Aは、確率的には、同様のものに10人が投資したら7人が損をする。高リスク高リターンのギャンブル的な要素を持った投資先と言える。しかし、もし、このリスクを低減することができたらどうであろうか？ 私たちが1,000万円を持っているとする。Aに1,000万円すべてを投資するのは高リスクであるが、Aと同様の確率であってリスク面で相関の少ないA1、…、A10という投資先があったとする。1,000万円をA1、…、A10の投資先に分散投資すると、確率の大数の法則から、ほぼ1,690万円の収益が見込める。Bに投資した場合よりも、高い収益が見込めるわけである。より多くの投資先に分散投資することで、収益はより確実なものになる。マーコビッツは、収益のパラッキ具合（分散）が小さくなるように分散投資することで、収益がより確実になることを示している。これは平均分散モデルと呼ばれ、ノーベル経済学賞の対象になった研究である。

先の例の姉妹は、賃貸マンションの経営をするのであれば、持っている土地を売って得た資金で、いろいろな場所に複数の賃貸用の部屋を買えばよかったのである。短期間に土地や建物の売買を行えば、価格変動のリスクは避けることができるし、バラバラな場所に部屋を持っていれば（すなわち分散投資をすれば）、地震や火事等、起こりうる様々なリスク要因で、一度にすべての資産が影響を受けることを避けることができたのである。

## 2 非線形ナップザック問題

先に述べたように、リスクを低減する有用な方策には、分散投資がある。近年、ビジネス・アナリティクスが重要視されているように、事業の分散投資を有効に行うためには、各事業のリスク回避の為の過去のデータに基づいた綿密なリスク分析と最適化が重要である。最適化のためには、様々な条件を数式モデル化し、それを解くことによって対策を講じることができる。しかし、多くの場合は、考えられる問題が複雑すぎ、解を導くことが困難である。このような複雑な数式モデルのひとつに、多目的非線形型ナップザック問題がある。筆者は長期にわたり、このような問題を、厳密に解くためのソフトウェアの開発を行っている。

### (1) 非線形ナップザック問題の背景

非線形ナップザック問題とは、数理計画の重要な分野で、組合せ最適化問題のひとつである。多次元非線形ナップザック（multidimensional nonlinear knapsack）問題は、多制約分離形非線形離散最適化問題（multiple-constraint separable nonlinear discrete optimization problem）のことである。非線形ナップザック問題の特別な場合として、非線形の資源配分問題（resource allocation problem）がある。多次元非線形ナップザック問題は、線形のナップザック問題のほとんどをその特別な場合として含んでおり、ナップザックと名前がつく問題の中では

もっとも解くことが難しい問題である。当然、実用面では、他のナップザック問題よりも応用範囲が広く重要な問題である。

非線形ナップザック問題が文献において最初に現れたのはIEEEの信頼性工学の分野であると考えられる。Moskowitz, McLean (1956)あるいは日本人として最初のMine (1959)の論文では、信頼度を最大化する最適化問題が取り扱われた。複数のサブシステムからなるシステムでは、サブシステムを複数個並列冗長することで、システムの信頼度を向上させることができる。このとき、全体のコストが許容制限内で信頼度を最大にする冗長配分を決定する問題が、最適冗長配分問題である。この問題は少し規模が大きくなると厳密に解くことができないため、ヒューリスティック解法が活発に研究されたが、厳密解法の研究は極めて少なかった。非線形ナップザック (Nonlinear Knapsack) の名前が初めて登場するのは、Morin, Marsten (1976)においてである。

非線形ナップザック問題の厳密解法としては、Marsten, Morin (1978)の動的計画法と分枝限定法のハイブリッド解法が有名である。しかしこの解法では、複数制約の大規模な非線形ナップザック問題を解くことは困難であった。制約が複数であるという困難 (DPでいう次元の呪い) を突破するための光が、Glover (1968)の代理制約の考え方である。複数の制約条件式の各制約に重み (代理乗数) を付けて足し合わせ一つの制約 (代理制約) とし、複数制約の代わりをさせるという考えである。この代理制約問題の最適な代理制約乗数を決定することは、線形の問題の場合は比較的簡単であるが、問題が非線形の場合は容易ではなかった。

この代理制約法に対して、多次元非線形ナップザック問題に利用可能な最適な代理乗数を決定するアルゴリズムを提案したのが、英国数学者Dyer (1980)およびNakagawaら (1981, 1984)の研究である。しかし、代理制約法を用いた解法は代理ギャップ (ギャップのため厳密解が見つからない場合) がある問題に対しては無力であった。この代理ギャップの問題を解決することは極めて困難で、Dyerらのグループも新たな成果を出すことができずに十数年が経過し



た。この代理ギャップの問題を解決したのが、Nakagawa (2003) である。このとき用いたのが標的解法で、代理ギャップがある近辺の解を完全列挙することで厳密解を見つけることに成功している。

2007年にこの代理制約法を信頼性工学の分野で超難問として知られていたマルチコンポーネント混合選択問題に適用し、世界で初めて厳密解と保証された解を見つけることに成功した。Fyffeら(1968)は、二つの制約条件のもとで、各サブシステムにおいて複数のコンポーネントから一つを選択し、並列冗長として用いるマルチコンポーネント選択問題を提案し、また、2制約の最適化問題をDP(動的計画法)で解くために制約条件の一つにラグランジュ乗数を掛けて目的関数に移動して、制約条件が一つの非線形ナップザック問題へ変換することを試みた。このシステム信頼性最適化問題はコンポーネント選択と冗長数を同時に決定するため、当時としては厳密に解くことが極めて難しい問題であった。Nakagawaら(1981)はこのマルチコンポーネント選択問題に対して代理制約を用いて、二つの制約条件を一制約条件の問題に変換し、原問題の代理双対問題を考え、さらに最適な代理乗数を決定する方法を提案し、Fyffeらのラグランジュ関数を用いたDPと性能比較するために、マルチコンポーネント選択問題の例題を変形し33問のテスト問題を作成した。実験結果よりラグランジュ関数を用いたDPよりも代理双対問題を解く代理制約問題の方が代理ギャップの面で優れていることが示された。その後、厳密解法の研究としての進展はなかったが、Coit、Smith(1996)はNakagawaら(1981)のマルチコンポーネント選択問題33問において、複数のコンポーネントの混合使用を許すことで困難度を更に高くした、マルチコンポーネント混合使用選択問題33問として再提案した。この組み合わせ最適化問題は、解空間の規模が $7.6 \times 10^{33}$ と非常に大きいため、既存の解法では厳密解を求めることができないと考えられ、様々なメタヒューリスティック解法を用いて近似解を求め、得られた解の品質を競う研究が十数年に渡り活発に行われた。Onishiら(2007)は、Nakagawa(2003)が開発した改良代理制約法(ISC法: Improved Surrogate Constraint Method)を、この問

題に適用して、短いCPU時間で厳密解を求めことに成功した。

この標的解法を多目的の問題に適用したのが仲川ら（2000）、Isadaら（2005）、仲川ら（2010、2011）の一連の研究である。仲川ら（2000）において、複数目的の離散最適化問題に対して代理乗数を用いて単一の目的関数の問題（代理目的問題）に変換し、この代理目的問題を解くことで原問題のパレート解（有効解、非劣解とも呼ばれる）を効率よく求めることができることを示した。Isadaら（2005）は単一の制約条件式をもつ多目的問題の大規模問題に対して、意思決定者にとって必要とされるパレート解の部分集合を実用的な時間で求めることが可能であることを示した。この時一部のパレート解が欠ける可能性があったが、仲川ら（2010）においては、欠けるパレート解がないように列挙の時の標的の値を決定する方法を提案した。また、仲川ら（2011）においてはある与えられた二目的のナップザック問題に対して厳密に全てのパレート解（欠けることがなくパレート解であることが保障された解）を列挙する解法を提案し、計算機実験で既存の解法と比べ格段に高速であることを示した。

## (2) 多目的多次元非線形ナップザック問題

一般的によく知られたナップザック問題は、子供が遠足に行くときに、できるだけ好きな品物をナップザックに一杯詰めて持っていきたいときの問題である。詰め込みすぎると重たくて持っていけなくなる。重さの制約のもとで好ましさを最大にする品物（代替項目）の組み合わせを決定する問題がナップザック問題である。 $n$ 個の品物の好ましさの度合いと重さをそれぞれ  $c_i$ ,  $a_i$  とし、重さの最大許容量を  $b$  とすると、0-1 ナップザック問題は次のように書ける。

$$\begin{aligned} P^1 : \max f(x) &= \sum_{i=1}^n c_i x_i \\ \text{s.t. } g(x) &= \sum_{i=1}^n a_i x_i \leq b \\ x_i &= 0 \text{ or } 1 \quad (i = 1, 2, \dots, n) \end{aligned}$$

ここで、 $x_i = 1$  または  $0$  はナップザックに品物  $i$  をそれぞれ入れるか入れないかを意味する。このナップザック問題で、重さの制約だけではなく容積やコスト等の制約を考えた場合、複数の制約条件式をもつ多次元<sup>2)</sup> ナップザック問題となる。また、同じ品物を複数個入れることを許した問題は、整数値ナップザック問題と呼ばれる。

ナップザック問題で子供に好きなものばかり入れさせると、弁当を入れずにお菓子ばかり入れてしまうかもしれない。そこで、お菓子のグループからは一つの品物、弁当のグループからは一つの品物というように採用する品物に制約を入れると非線形ナップザックになる。



図X-5 非線形ナップザック問題

多次元非線形ナップザック問題（分離形離散最適化問題とも呼ばれる）は、 $n$  個のプロジェクトがあり、そのプロジェクトに対して投入可能な  $m$  種類の資源（人、費用、原材料等）があるものとする。それぞれのプロジェクト  $i \in \{1, 2, \dots, n\}$  には  $k_i$  個の考慮可能なレベル（代替項目）があるものとする。もしプロジェクト  $i$  でレベル  $x_i \in \{1, \dots, k_i\}$  を採用したとき、資源  $j \in \{1, 2, \dots, m\}$  の消費量は  $g_{ji}(x_i)$  とし、その時のリターン（満足度、収益等）の量は  $f_i(x_i)$  とおく。

また、資源  $j$  の最大許容消費量は  $b_j$  とすると

$$\begin{aligned} P: \max f(x) &= \sum_{i=1}^n f_i(x_i) \\ \text{s.t. } g_j(x) &= \sum_{i=1}^n g_{ji}(x_i) \leq b_j (j \in M) \\ x_i &\in K_i (i \in N) \end{aligned}$$

と書ける、ここで  $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  は決定すべき変数ベクトルで、 $M = \{1, 2, \dots, m\}$  は資源に対する制約条件式の添え字集合、 $N = \{1, 2, \dots, n\}$  は決定変数の添え字集合、 $K_i = \{1, 2, \dots, k_i\}$  は各変数  $x_i$  の値は採用すべき代替項目を示す。

この多次元非線形ナップザック問題に  $q$  個のリターンを考慮したのが多目的多次元非線形ナップザック問題である。すなわち

$$\begin{aligned} P: \max f(x) &= (f_1(x), f_2(x), \dots, f_a(x)) \\ \text{s.t. } x &\in X \end{aligned}$$

ただし、 $f_s(x) = \sum_{i=1}^n f_{si}(x_i)$  ( $s = 1, 2, \dots, q$ )、 $X = \{x \in K | g_j(x) \leq b_j (j \in M)\}$ 、 $K = \{(x_1, x_2, \dots, x_n) | x_i \in K_i (i \in N)\}$ 。

### 3 企業と社会における投資リスク

#### (1) 企業における投資リスク

企業や社会のリスクを減らすには、長期的な視点に立つ必要がある。長期的な視野での企業経営、年金資金運用、社会システムの構築は、持続可能性と通じるものがある。

アメリカのビジネスでは、考慮されるのが売り手と買い手の二人だけであった。しかし、金融危機以降、社会を含めて考えるようになってきている。日本には、三方よしという近江商人の教訓がある。売り手と買い手がともに満足し、また社会貢献もできるのがよい商売であるということである。これは持続可能

な社会に通じる考え方である。実際、三方よしという考え方を経営の理念とした会社には、100年以上生き残っているものが多くある。持続可能な経営と通じる考えを含んでいることが分かる。

経営者の多くが、リストラという名の下で従業員の首切りを簡単に行う。これは短期的には企業の業績を回復させるが、長期的には会社の活力を削ぐことになる。米国の経営者は、投資家への気兼ねから、長期的な視野を放棄して短期的な成果をあげざるを得ない時期があった。しかしその結果、米国経済を衰退に向わせたとの反省から、近年では、米国でも長期的な視野の経営が重要視されている。企業の経営者には、短期的な経営視点と長期的な視野が必要とされる。長期的な視野の経営には何が必要なのだろうか？ リスクの正確な理解と、高リスク高リターンのものにはリスク相関のないものへの分散投資が必要である。あるいは、考慮されている高いリスクを下げるためのリスクヘッジを考えるべきである。

地上波のデジタル化の時にテレビの売れ行きがよく、液晶パネルの不足が表面化した。シャープは、自社のアクオスがよく売れていたために、自社生産の液晶パネルをアクオスの生産に優先的に回し、東芝などの他の有力顧客に対しては、納入遅延を起こしていた。その後、需給が緩和されると、顧客の多くはシャープの元を去るといった結果になった。堺工場の外販率は年を追うごとに減少し、2012年3月期の堺工場の外販比率は、約1割しかない状況になった。「堺工場を作った時点で、シャープはアクオスを捨てても、パネルの外販に集中すべきだった」と、業界関係者は一様に指摘している（東洋経済オンライン）。短期的視野から大きなリスクを見逃したか、無視をしたのがこの結果を招いたと考えられる。

リスクヘッジを賢明な方法で行っている例としては、ディズニーランドを経営するオリエンタルランドがある。地震で大きな損害が出るといわれた千葉県浦安市に、事業所施設が集中している。このためのリスクヘッジとして、オリエンタルランドは、1999年5月に、世界で初めて地震債券を発行し、間もなく

完売した。その後も、さらに発展させた方法で、地震を含めたリスクに対して賢明な形で対策を行っている。

また、信越化学工業の例は、「2008年秋に発生したリーマンショックを契機とする深刻な世界同時不況は、多くの日本企業に大きな損失をもたらした。こうした中、信越化学工業は、2010年3月期決算でも、800億円超という高水準の純利益を獲得している。深刻な不況においても、なぜ信越化学工業は安定した利益水準を保持できたのであろうか。それを可能にした要因は、高い市場シェア事業の選択と集中によるバランス良い事業構成の構築である。信越化学工業の3つの事業セグメントは、市況変動サイクルや製品特性に違いがあり、そのため相互補完的な構成となっている。」(北島 2011)に記載されているように、リスク分散とリスクヘッジがいかに企業経営に重要であるかを教えてくれる。

## (2) 企業の東アジア地域進出におけるリスク分散と最適化

企業にとって事業の新たな進出だけでなく、事業の縮小や撤退は重要である。一般的なリスク要因としては、政治、経済、環境、事故、災害などがあるが、ここでは、東アジア地域におけるカントリーリスクに限って考える。政治状況についてのリスクは、政権の安定度と政策の変更や法制度の改正等がある。経済状況に関連したリスクとしては、産業構造や技術水準等の産業の成熟度、電力等のインフラの整備状況、為替政策や規制の強化等の財政金融政策、対外債務の状況等の対外的な支払い能力、法人税等の税法上の特徴がある。社会状況に関するリスクとしては、政情不安、犯罪、健康に関する公衆衛生、宗教対立等の宗教問題、知的財産権、労働環境、人件費がある。また、事業を縮小・撤退することは、海外拠点を設立することに比べて何倍も難しいといわれている(原、古字、2011)。

ここで、東アジア地域進出や撤退事業所に関する多目的非線形ナップザック型最適化モデルを考えてみる。進出先や既存事業所のカントリーリスクの評価は、短期的(1年から3年)な場合だけではなく、中期的(3年から5年)、長

期的（5年から10年）に見た場合のリスクを評価する。このことを踏まえて、自社内で検討するのみならず、経験豊富な外部機関やコンサルタント等によるサポートも受けつつ、総合的な視点でリスク評価を行い数値化する。目的関数としては、短期、中期、長期のリスクと収益予想を取り扱う。制約条件としては、ここでは一例として、5年計画の予算を考える。一度に一事業所に巨額の投資を行うことは大きなリスクを伴う。このようなリスクを軽減するためには、数年かけて分散投資をすることしかない。変数となるのは、既存の事業所と進出予定地域の事業所  $i \in N$  である。また、複数のレベル  $x_i \in K_i$  が考えられる。このレベルは、進出または撤退レベルで、5年計画の各種の案の一つ一つがレベルとなる。各レベルにどの程度のリスク  $s = 1, 2, 3$  と収益  $s = 4, 5, 6$  が、短期  $s = 1, 4$ 、中期  $s = 2, 5$ 、長期  $s = 3, 6$  にたいして予想できるかを数値化したものを  $f_{si}(x_i)$  ( $s = 1, 2, \dots, 6, x_i \in K_i, i \in N$ ) とする。また、進出または撤退レベルごとの資源の消費量を  $g_{ji}(x_i)$  ( $j = 1, 2, \dots, m, x_i \in K_i, i \in N$ ) と数値化する。資源としては、費用や人材が考えられる。資源  $j$  最大許容消費量は  $b_j$  とすると6目的多次元非線形ナップザック問題となる。この最適化問題を解くことで、中長期的にも安定的に事業展開するための拠点となる事業所を選定することが可能となる。

### (3) 社会における投資リスク

あなたは、今の生活水準を維持するために原子力発電を推進し、そのために自分の子供の足を切ることができるだろうか？ 突飛な質問に聞こえるかもしれない。でも今、福島の子供たちが置かれている環境は、子供の足を切ったと同じ状況である。他の地域の子供たちが普通にしている、友達と野外でブランコに乗り、笑顔で走り回るということができなくなっている。以前に、筋ジストロフィーの病に侵されて寝たきりになった少女の話を読んだことがある。彼女の夢は他の子供たちが普通にしていること、野外で走りまわることだった。チェルノブイリの子供たちは足だけではなく、健康な心臓も奪われている。チ

ェルノブイリハートと言い、変形した心臓をもつ子供たちが生まれているのだ。チェルノブイリハートについてはいろいろな議論がある。ただはっきりしていることは、石綿（アスベスト）が皮膚についても洗い流せば大きな問題は起こらない。しかし、長期にわたり肺に取り込めば、癌の原因になる。自然界にはもともと放射線があり、人類は日常的にある程度の外部被ばくをしていることになるので、放射能の外部被ばくに対しては、免疫力を持っている。しかし、自然界にほとんど存在しない高い放射線量での外部被ばくや、内部被ばくの経験はまれだ。放射性物質を体の内部に取り込めば、その物質は長期にわたり（多くの場合人間の寿命以上）放射線を出し続ける。石綿の内部被ばくとほぼ同じ状況だ。特に妊婦が内部被ばくしていると大変な事態が起こることは想像に難くないといえる。

また、2010年での世界の稼働中の原子力発電所の431基だ。一基当たりの原子力発電所の重大事故の（故障）確率を  $q$  とおくと、 $N$  基のどれもが重大事故を起こさない確率は  $P = (1 - q)^N \cong 1 - Nq$  となり、原子力発電所の基数に比例して重大事故の確率が増えてくる。私たちは原子力利用でギャンブルをしてはいないだろうか？ 人々が安心して暮らせる豊かな社会を作るためには、社会のリスクを減らすための長期的な視野を持ったリスクヘッジを考える必要があるだろう。

2011年3月に起きた、福島第一原子力発電所の事故を受け、世論は大きく反原発へと傾いている。これまで日本は、原子力発電所の設置に多額の税金を投入し、その他の発電システムの開発をおろそかにしてきた。今、私たちは、日本のエネルギー問題をどのように解消してゆくのが問われている。電力、鉄鋼、セメント等の業界の施設からの燃焼排ガス等の排出源から  $\text{CO}_2$  を安価に分離・回収・貯留する技術が世界的に開発されている。日本でも開発競争に参戦する企業があり、火力発電や石炭での発電が、 $\text{CO}_2$  の元凶になると言われることが過去になる時代が近づいているのかもしれない。

原子力発電所の事故を機に、エネルギーの中では電力エネルギーに大きな焦



点が置かれ、それ以外のエネルギー消費についてはあまり議論がされていない。しかし、資源エネルギー庁「平成22年度におけるエネルギー需給実績」によれば、一次エネルギー（石油、石炭、天然ガス、原子力、水力など、自然界に存在するままの状態で使用されるエネルギーのこと）に占める原子力エネルギーの割合は、2010年当時でも11.2%にすぎない。また、日本全体のエネルギーの最終の消費量に対する電力としての消費量の割合（消費側電力化率）は24.0%程度に過ぎないのに、一次エネルギーの総供給量で発電用に投入されたエネルギーの割合（供給側電力化率）が43.6%もあるという。この原因は発電効率の悪さと送電ロス等にあり、改善の余地は極めて大きい。

原発か自然エネルギーかという短絡的な議論ではなく、エネルギー全体をみた議論が必要である。電力エネルギーだけを取り扱って最適化を考えても部分的最適化になり、合成の誤謬（個々人にとってよいことも、全員が同じことをすると悪い結果を生むこと）を実践することになる。エネルギー消費の中で大きな割合を占める（電気に変換することなく）燃料や熱としての使用に対しての再生可能エネルギーは、重要な役割を担うことが可能である。運輸や産業部門をはじめ、家庭や業務などあらゆる部門において、太陽熱や地中熱、バイオマスの熱利用などを積極的に活用していくことを選択できるようにすべきである。

ここで、エネルギー全体の多目的非線形ナップザック型最適化モデルを考えてみる。CO<sub>2</sub>等の環境リスクを考慮し、数年かけて資源を分散投資することを考える。変数となるのは、既存の発電施設と新規の発電施設  $i \in N$  である。また、複数の投資レベル  $x_i \in K_i$  が考えられる。このレベルは、新規建設または改修レベルで、5年計画の各種の案の一つ一つがレベルとなる。各レベルにどの程度の環境リスク  $s = 1, 2, 3$  とエネルギーコスト  $s = 4, 5, 6$  が、短期  $s = 1, 4$ 、中期  $s = 2, 5$ 、長期  $s = 3, 6$  にたいして予想できるかを数値化したものを  $f_{si}(x_i)$  ( $s = 1, 2, \dots, 6, x_i \in K_i, i \in N$ ) とする。また、新規建設または改修レベルごとの資源の消費量を  $g_{ji}(x_i)$  ( $j = 1, 2, \dots, m, x_i \in K_i, i \in N$ ) と数値化する。資

源としては、費用や人材が考えられる。資源 $j$ 最大許容消費量は $b_j$ とすると6目的多次元非線形ナップザック問題となる。この最適化問題を解くことで、中長期的にも安定したエネルギー問題の政策選定が可能となる。

2012年12月2日に起こった、笹子トンネル崩落事故は記憶に新しい。1960年代の高度経済成長期に建築されたものは、現在、建築後50年を迎え、社会インフラの老朽化対策など、維持・更新は待ったなしの状況になっている。社会インフラの補修計画の最適化も同様に定式化することは難しくない。

## おわりに

投資のつもりでギャンブルを行っていることが多くなっている。経済活動の広域化や科学技術の発達とともにギャンブルでの失敗は、過去には考えられなかったような大きな影響を及ぼす。最適化を用いて少しでも考えられるリスクを可視化することで、ギャンブル的な要素を減らし、リスクが軽減された投資を行えるようになる。社会における様々な問題を、多目的非線形ナップザック型最適化モデルを用いて最適化することで、よりよい解決法を選定することが可能になると考えている。

## 注記

- 1) 執筆協力者 近藤 幸
- 2) 多次元という言葉は、複数の制約条件式をもつナップザック問題を動的計画法 (Dynamic Programming) で解くときに多段階決定過程で複数次元の取り扱いを必要とするためこの言葉が使われるようになった。当初、ナップザック問題は動的計画法が最も有効な解法と考えられていた。

## 参考文献

甲斐良隆、仲川勇二、田畑吉雄 (2005) 『改良代理制約法の非分離形非凸計画問題への応用』、電子情報通信学会論文誌、Vol.J88-A、No.3、pp.422-424。

- 河口真理子（2009）『「百年に一度の危機」と持続可能性に関する一考察』経営戦略研究、VOL.21。
- 北島 治（2012）『シンプルな目標と柔軟なスピード経営企業の分析—信越化学工業の企業分析—』情報研究：関西大学総合情報学部紀要、Vol.36、pp.17-42。
- 仲川勇二、井垣伸子、伊佐田百合子、疋田光伯（2011）『離散最適化解法の金融工学への応用—年金等の長期運用に役立つ最適化技術の開発を目指して』オペレーションズ・リサーチ、Vol.56、No.5、pp.280-285。
- 仲川勇二、疋田光伯（2000）『多目的離散最適化問題のための対話型意思決定アルゴリズム』日本経営工学会論文誌、Vol.51、no.3、pp.197-202。
- 仲川勇二、施、阿辻、木村、仲川希（2010）『二目的多制約非線形ナップザック問題のための対話型改良代理制約アルゴリズム』日本経営工学会論文誌、Vol.61、pp.17-22。
- 仲川勇二、檀寛成、疋田光伯、仲川希（2011）『二目的多次元ナップザック問題の全有効解列挙のための標的解法』電子情報通信学会論文誌、Vol.J94-A、No.8、639-648。
- 清水祐希、西岡慎一、馬場直彦（2003）『わが国機関投資家の資産運用行動について—金融市場に与える影響を中心に—』マーケット・レビュー日本銀行金融市場局。
- ハジュン・チャン（2010）『世界経済を破綻させる23の嘘』（田村源二訳）徳間書店。
- 原敬敏、古字朗人（2011）『アジア諸国進出におけるリスクマネジメント』NKSJ-RM レポート、Issue E-6、p.16。
- Beasley, J.E., N. Meade, T. -J. Chang (2003) “An evolutionary heuristic for the index tracking problem,” *European Journal of Operational Research* Vol.148 pp.621-643.
- Coit, D.W., & Smith, A.E. (1996) Reliability Optimization of Series-Parallel Systems Using a Genetic Algorithm, *IEEE Trans. Reliab.*, Vol.45, pp.254-260.
- Dyer, M.E. (1980) Calculating surrogate constraints, *Mathematical Programming*, Vol.19, pp.255-278.
- Fyffe, D.E., Hines, W.W., & Lee, N.K. (1968) System reliability allocation and a computation algorithm, *IEEE Trans. Reliab.*, Vol.R-17, pp.64-69, 1968.
- Glover, F. (1968) Surrogate constraints. *Operations Research*, Vol.16, pp.741-749.
- Isada, Y., James, R.J.W., & Nakagawa, Y. (2005) “An approach for solving nonlinear multi-objective separable discrete optimization problem with one constraint,” *Euro. J. Oper. Res.*, Vol.162, pp.503-513.
- Mine, H. (1959) Reliability of physical system, *IRE Trans. on Qual. Contr.*, Vol.5, pp.138-151.
- Marsten, R.E., & Morin, T.L. (1978) A hybrid approach to discrete mathematical programming,

Math. Program. Vol.14, pp.21-40.

Morin, T.L., & Marsten, R.E. (1976) An algorithm for nonlinear knapsack problems, Management Science Vol.22, pp.1147-1158.

Moskowitz, F., & McLean, J.W. (1956) Some reliability aspects of system design, IRE Trans. Qual. Contr. Vol.RQC-8, pp.7-35.

Nakagawa, Y., & Miyazaki, S. (1981) Surrogate constraints algorithm for reliability optimization problems with two constraints, IEEE Trans. on Reliability, Vol.R-30, No.2, pp.175-180.

Nakagawa, Y., Hikita, M., & Kamada, H. (1984) Surrogate constraints algorithm for reliability optimization problems with multiple constraints, IEEE Trans. on Reliability, Vol.R-33, No.4, pp.301-305.

Nakagawa, Y. (2003) An improved surrogate constraints method for separable nonlinear integer programming. J. Oper. Res. Soc. Jpn. Vol.46, pp.145-163.

Onishi, J., Kimura, S., James, R.J.W., & Nakagawa, Y. (2007) Solving the Redundancy Allocation Problem with a Mix of Components using the Improved Surrogate Constraint Method, IEEE Trans. Reliab., Vol.R-56, No.1, pp.94-101.

東洋経済オンライン [newsbiz.yahoo.co.jp](http://newsbiz.yahoo.co.jp) <http://toyokeizai.net/articles/-/9845>

<http://blog.setojp.com/archives/65490976.html>

<http://okwave.jp/qa/q2529748.html>

[http://detail.chiebukuro.yahoo.co.jp/qa/question\\_detail/q1017825085](http://detail.chiebukuro.yahoo.co.jp/qa/question_detail/q1017825085)

<http://www.dir.co.jp/publicity/column/060629.html>