

設備投資計画ツール Riskmizer™

Riskmizer™ Facility Investment Planning Tool

半田 恵一 内平 直志

■ HANDA Keiichi

■ UCHIHIRA Naoshi

近年、事業環境を取り巻く変化が非常に速いため、不確実な事業環境下での的確で柔軟な意思決定が要求されている。例えば、鉄鋼、化学、電力プラントの投資計画においては、原料価格の不安定さ、将来需要の変動といった不確実要因を考慮し、変化に対して強健な意思決定を行う必要がある。

東芝は金融工学と数理最適化手法を用いた汎用的な設備投資計画ツール Riskmizer™ を開発している。ユーザーは、このツールによって種々の戦略オプションを比較・分析し、ユーザーにとって最良の戦略オプションと設備投資計画を得ることができる。

Decision-making in situations of uncertainty has recently become more important with the rapid changes taking place in business environments. For example, in investment planning for iron and steel, chemical, or electric power plants, uncertain elements such as material prices or demand movements must be taken into consideration in order to obtain a robust decision.

Toshiba is developing a facility investment planning tool called Riskmizer™, employing financial engineering and mathematical optimization methods. This tool will enable users to compare and analyze several types of strategies so as to formulate the best strategy and investment plan to meet their needs.

1 まえがき

バブル崩壊以降の長い期間、わが国全体の製造業の設備投資は減少傾向にあった。これは、需要低下による過剰設備の調整プロセスの影響もあるが、不確実な将来に対する投資に対して必要以上にしゅくしているケースもあった。高度経済成長期は、作れば売れる時代であり、設備投資に関して不確実性(リスク)を厳密に考慮しながら投資の可否を判断する必要は少なかった。しかし、将来に対する漠然とした不安から設備投資の意思決定ができない状況においては、不確実性を十分考慮したうえでの合理的な設備投資計画を支援する手法が求められている。従来の設備投資評価・計画手法としては、DCF (Discount Cash Flow) 法、モンテカルロ DCF 法、決定木分析、リアルオプション分析⁽¹⁾が知られており、ツールも整備されている。

ここで提案するドメイン特化網羅的 DCF 法では、起こりうる外部状況を決定木として網羅的に自動生成する。各外部環境における設備運用時の割引現在価値は、ドメイン情報を用いて計算し、決定木の各意思決定ポイントにおいては、利益の期待値が大きくリスクも小さい選択肢を決定する点が特徴である。

ここでは、現在東芝が開発中の、不確実性を考慮した設備投資計画手法⁽²⁾とその支援環境である Riskmizer™ の特長と適用事例について述べる。

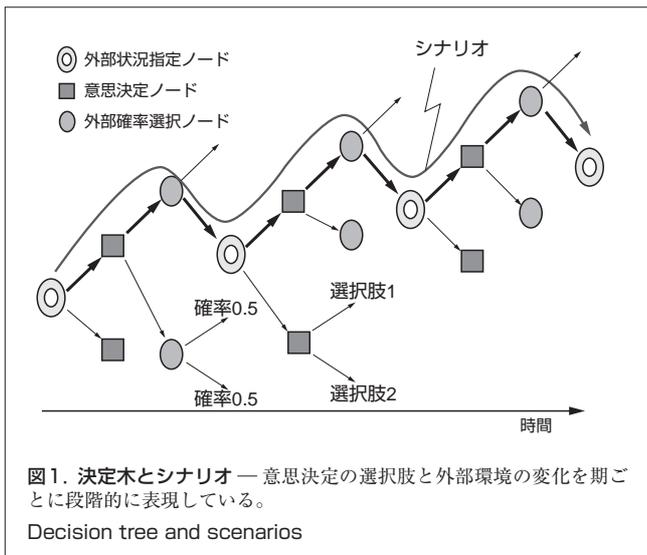
2 決定木とプロジェクト価値

ここで対象とする設備投資計画は、鉄鋼、化学、電力プラントなどの比較的長期間の計画であり、将来の不確実な外部環境の変化に対応して、各時点で意思決定を柔軟に行うことを前提とする。すなわち、「〇〇年に設備 A を新設し、△△年に設備 B を更新する」というシーケンス状の計画ではなく、「〇〇年に外部環境が××ならば設備 A を新設し、そうでなければ設備 B を更新する」という決定木状の計画を求めるものである。

不確実な外部環境には、将来の需要や原料価格の変動など確率的に表現可能なものと、当該事業に対する規制緩和や新規参入状況のように非確率的なものがある。意思決定の選択肢には種々の設備の新設や更新などがある。ここで対象とする決定木は、これら外部環境と意思決定の選択肢から想定されるあらゆるケースを、期ごとに段階的に表現した根付き木である(図1)。

決定木において、確率的及び非確率的な外部環境を表すノードを、それぞれ外部確率選択ノード、外部状況指定ノードと呼ぶ。意思決定ノードは主体的に選択可能な分岐を表し、決定木の根から葉に至るパスをシナリオと呼ぶ。

外部状況指定ノードの選択肢を固定した場合には、計画(プロジェクト)全体の割引現在価値を計算できる。これをプロジェクト価値と呼ぶ。われわれの経験では、最適な設備



投資計画の作成のほかに、新たな意思決定の選択肢（戦略オプション）の追加によってプロジェクト価値がどのように変化するかを評価したい場合も多い。例えば、「設備Aを新設する／しない」という選択肢に「設備Bを補修する」という選択肢を追加することで、プロジェクト価値がどの程度高まるかを評価したいという場合である。すなわち、戦略オプションの価値をプロジェクト価値の差分で評価することができる。

3 手法の特長と概要

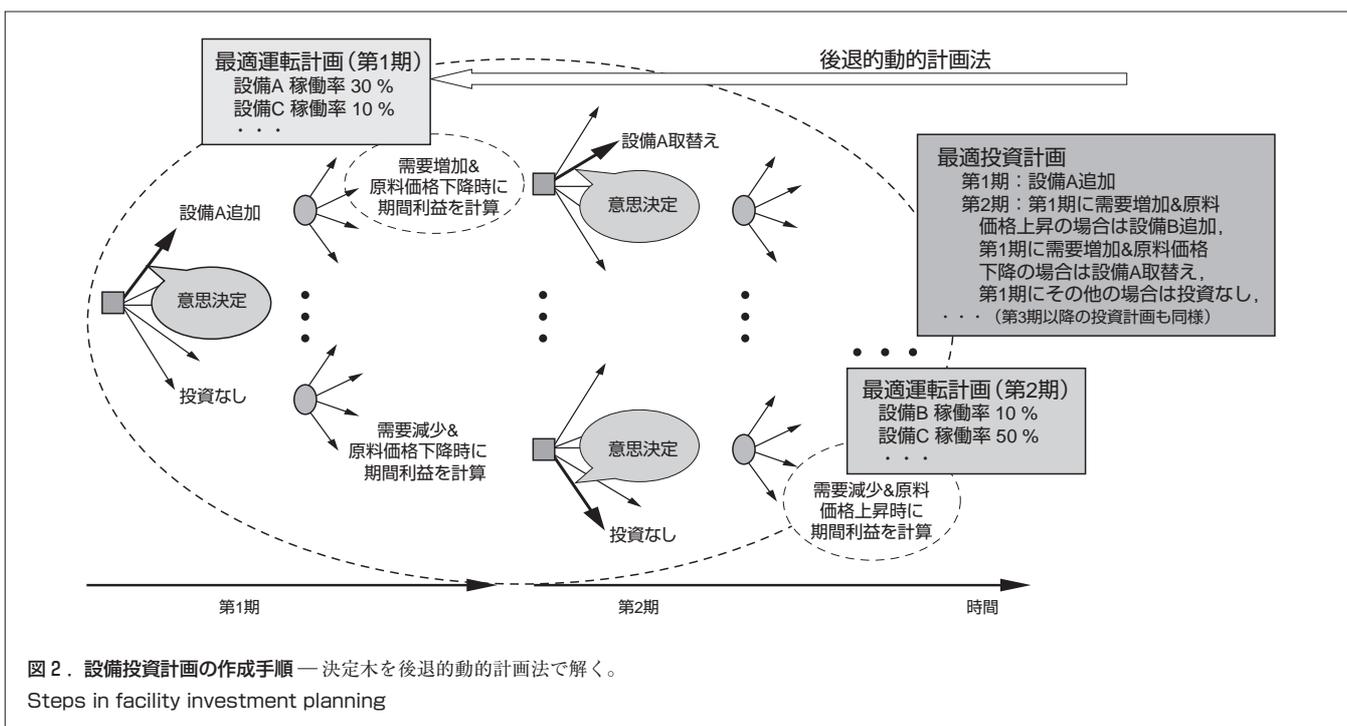
当社が提案する設備投資計画手法は、将来の不確実性に

伴う膨大な数のシナリオを自動生成し、各シナリオにおける各設備の稼働率や粗利益（＝収入－原材料費－固定費）を計算して、その結果を多元的に分析することによって最適な戦略オプションを評価することを目的とする。主な課題として、① 膨大な数のシナリオをどのように生成するか、② それぞれのシナリオに対する利益をいかに高速に計算するか、③ 膨大な数のシナリオをどうやって分析するか、がある。当社のドメイン特化網羅的DCF法は、これらの課題に対して以下の特長を持っている。

- (1) 外部状況指定ノードの分岐は評価サイクルの過程で評価者の指定により徐々に広げていくが、外部確率選択ノードの分岐は網羅的に自動生成する（前者をマクロ外部シナリオ、後者をマイクロ外部シナリオと呼ぶ）。
- (2) 設備運用時の利益計算モデル（ドメイン固有）を最適化問題として決定木に組み込み、与えられたマクロ外部シナリオを前提として、後退的動的計画法により最適な意思決定を高速に算出する。
- (3) 各意思決定ポイントでは、種々のシナリオに対する利益の平均値と分散を考慮した評価方式に基づき、評価者にとって最良の選択肢を決定する。

意思決定を算出する処理手順のイメージを図2に示す。ここでは、戦略オプション及びマクロ外部シナリオは既に与えられているものとする。

まず、入力データとして、各設備の仕様（建設年、人件費・減価償却費などの初期値、設備容量、稼働率の上限など）、年間需要量と原料価格の初期値・増減確率・変動確率、人



件費の増加率、減価償却費の減少率、現在価値への割引率、製品価格などが与えられる。

次に、それらのデータを用いて、決定木を基本的に最終期から第1期に向かって解いていく。すなわち、まず最終期のそれぞれの意思決定ノードにおいて、各選択肢に続くシナリオ分岐のそれぞれの利益を計算し、それらの利益の平均値などを評価基準として最良の意思決定を行う。次いで、最終期における意思決定の結果を用いて、一つ前の期の利益計算及び意思決定を行う。更に、第1期まで同様の処理を続ける。

このようにして、与えられた戦略オプションとマクロ外部シナリオにおけるプロジェクト価値が算出される。

プロジェクト価値は全期間を通しての利益の平均値と分散(標準偏差)で評価する。利益の平均値だけ高くても分散が大きければ、そのプロジェクトはリスクが高いからである。それぞれのプロジェクト価値を高めるために、各意思決定ポイントにおいて、次のような二つのタイプの評価関数を用意する。

$$\text{平均値} - a \times \text{標準偏差} \quad (1)$$

$$a \times \text{平均値} + \beta \times \text{最小値} \quad (2)$$

ここで平均値、標準偏差、最小値は、意思決定の個々の選択肢に続くシナリオ分岐の利益に対するものである。 a 、 β はゼロ以上の値をとるパラメータであり、(1)、(2)の値は大きいほど良い。最小値は平均値と同様に一つ前の期に継承していく。なお、(1)、(2)の評価関数はあくまで意思決定のためのものであり、最終的に得られるプロジェクト価値は、全期間にわたって得られる利益の平均値の割引現在価値とその分散である。

4 システム構成

前章で述べた手法にはツールによる支援が不可欠である。当社が開発中のツール Riskmizer™ のシステム構成例を図3に示す。各機能の概要は次のとおりである。

- (1) マクロ外部シナリオ選択部 シナリオプランニング手法^③などにより、起こりうる未来を分析し、マクロ外部シナリオの作成を支援する。
- (2) 決定木生成部 入力したマクロ外部シナリオ、戦略オプション、変動確率パラメータをもとに決定木を自動生成する。
- (3) 利益計算部 期ごとに、与えられた状況で生み出せる利益を計算する。
- (4) 意思決定部 指定した評価方式に基づき、利益の計算結果からシナリオの意思決定を行い、結果をデータベースに登録する。
- (5) 分析・表示部 データベースに蓄積されたシナリオを様々な視点から分析し、マクロ外部シナリオと戦略オプションを立体的に評価する。

現在は一部手動であるが、Riskmizer™を用いた意思決定者(ユーザー)の一般的な分析・意思決定手順を以下に示す。

- (1) 初期設定としてマクロ外部シナリオ、マイクロ外部シナリオ、戦略オプションの設計を行う。
- (2) ベースシナリオとなるマクロ外部シナリオを指定し、戦略オプションごとに決定木を自動生成し、評価方式に従って意思決定を行い、最終的な計画と利益データ(分布図、平均値、標準偏差)をシナリオデータベースに蓄積する。
- (3) シナリオデータベースに蓄積された利益データをグラ

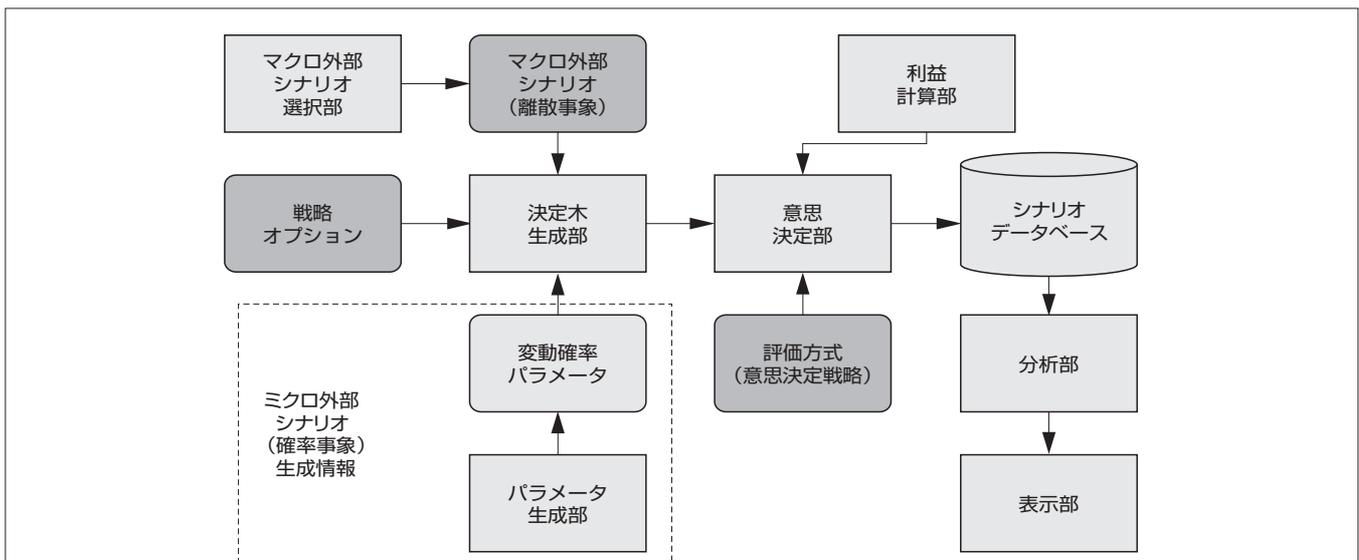


図3. Riskmizer™のシステム構成—シナリオ情報を元に決定木を生成し、利益を計算して意思決定する。
System configuration of Riskmizer™

フィカルに表示し、戦略オプションと利益データの関係を比較・分析する。具体的な分析事例は次章に述べる。

- (4) 各時点での意思決定の評価方式がユーザーのリスクに対する好みと合わない場合は、例えば、利益データの平均値と標準偏差を参照して、評価関数のタイプ及びパラメータを調整する。
- (5) ベースとなるマクロ外部シナリオの様々なバリエーションを指定し、各シナリオに対して同様の戦略オプションと利益データの関係を比較・分析する。
- (6) 様々な外部シナリオに対する比較・分析の結果を総合的に見て、ユーザーは最適な戦略オプションを決定する。
- (7) 選ばれた戦略オプションに対して、ベースケースにおけるマイクロ外部シナリオの変動確率パラメータを変化させ、比較・分析することにより、その戦略オプションのロバスト性を確認する。パラメータの多少の変動で結果が大きく変動する場合は、ロバスト性に欠けると判断し、見直す必要がある。
- (8) 所望の結果が得られない場合は、戦略オプションの再設計を行い、再度分析を行う。

上記の手順では、様々なシナリオにおける戦略オプションと利益データの関係をデータベースに蓄積し、立体的、総合的にユーザーの意思決定を支援することが特長である。マイクロ外部シナリオだけでなくマクロ外部シナリオにも発生確率を設定し、プロジェクト価値で一元的に評価することも可能であるが、マクロ外部シナリオの発生確率は恣意的であり、計算量も膨大になる。ここでは、ベースシナリオからマクロ外部シナリオのバリエーションを膨らませていく手順を支援している。これは、ソフトウェアの試験手順と共通する手法である。

5 適用事例

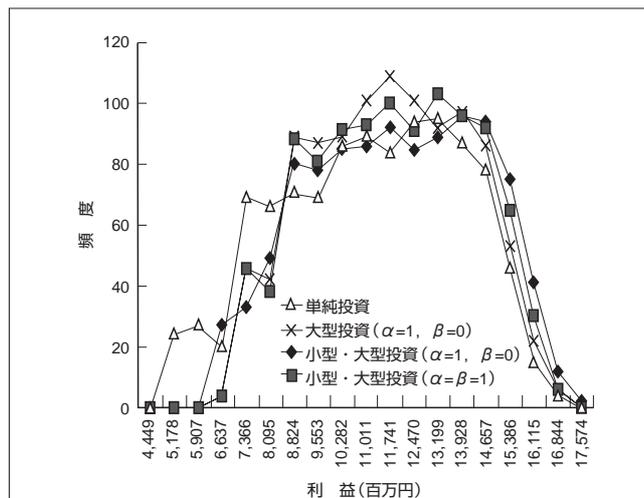
このツールをあるプラントの設備投資計画に適用した結果を紹介する。ここでは、ベースシナリオとなるマクロ外部シナリオは既に指定されているものとする。マイクロ外部シナリオとしては、年間需要量と原料価格のそれぞれの上昇・下降による4通りのシナリオ分岐を扱う。1期は3年とし、投資計画期間は5期間の15年とする。そして、次のような3通りの戦略オプションの評価を行う。

- (1) 単純投資戦略 年間需要量が每期上昇するケースだけを想定し、その年間需要量に対して設備容量が足りなくなる期に大型設備を追加する。
- (2) 大型投資戦略 投資なし、大型設備の追加、大型設備への取替えという三つの選択肢を用意して最適投資計画を求める。

- (3) 小型・大型投資戦略 投資なし、小型設備の追加、大型設備の追加、小型設備への取替え、大型設備への取替えという五つの選択肢を用意して最適投資計画を求める。

ここで、単位生産量当たりの運用コストは、大型設備のほうが小型設備よりも小さくなるように設定してある。したがって(1)の単純投資戦略というのは、既存設備では対応できなくなる可能性のある期に、コスト対効果の高い大型設備を追加することを意味する。また、取替えというのは次の処理を意味する。既存設備にはあらかじめ使用年数などを考慮に入れて取替えの順番を付けておく。そして、大型又は小型設備への取替えという意思決定が選択された場合には、その順番に従って既存設備を休止にし、代わりに新しい大型又は小型の設備を追加する。

年間需要量と原料価格のそれぞれの上昇・下降の確率は0.5ずつとし、期ごとの変動率は、過去の数値データを参考に今後の予測も含めて標準的な値を設定した。(2)と(3)の最適投資計画における意思決定の評価関数には“ $a \times \text{平均値} + \beta \times \text{最小値}$ ”を用いた。(1)～(3)に対する実行結果を図4(a)



*横軸の数値は、利益を等間隔に分けたときの各区間の代表値を表す。

(a)利益分布

(単位: 百万円)

戦略オプション	利益分布	
	平均値	標準偏差
単純投資	10,397	2,743
大型投資(α=1, β=0)	10,972	2,357
小型・大型投資(α=1, β=0)	11,163	2,576
小型・大型投資(α=β=1)	11,096	2,411

(b)利益分布の平均値と標準偏差

図4. 各戦略オプションに対する意思決定結果の利益分布 — 小型・大型投資(α=β=1)は分散が小さく平均利益も十分大きい。

Profit distributions for several investment strategies

6 あとがき

に示す。各グラフは、それぞれの戦略オプションに対する意思決定の結果を用いた場合の、5期間にわたって得られる利益を現在価値に直した値の分布である。各分布の平均値と標準偏差を図4(b)に示す。

具体的には、まず $a=1$, $\beta=0$ とし、平均値だけで(2)と(3)を評価し、(1)と合わせて利益データの比較を行った。図4(a)及び(b)から、分布の平均値は小型・大型投資 ($a=1$, $\beta=0$) がもっとも大きいことがわかる。次に、小型・大型投資と同じ戦略オプションで評価関数のパラメータを $a=\beta=1$ とし、平均値と最小値を同等に評価した場合の実験を行った。その場合の分布の平均値は小型・大型投資 ($a=1$, $\beta=0$) よりも少し減るが、標準偏差がほど良く改善されていることがわかる(図4(b))。投資計画の詳しい内容は割愛するが、小型・大型投資 ($a=1$, $\beta=0$) に比べて大型設備への取替えという意思決定が増え、投資の時期にも少し変化が見られた。

これらの実験から、大型設備だけの投資戦略よりも、小型設備を交えた投資戦略のほうがより大きな利益が得られることがわかる。単純投資戦略は、各期において年間需要量が上昇するケースを想定した戦略であるが、実際には年間需要量が下降するケースもあるため、利益分布の平均値はほかの戦略オプションよりも劣る結果となっている。

標準偏差は投資戦略のリスクを表すものであり、値は小さいほど良い。ここでの実験で、利益の平均値を優先したい場合には小型・大型投資 ($a=1$, $\beta=0$) の計画が良いが、リスクも考慮すると小型・大型投資 ($a=\beta=1$) の計画が採択されるかもしれない。

ユーザーはこのようにして戦略オプションと利益データの間を比較・分析し、場合によっては評価関数を調整して再度実行及び比較・分析を行い、最終的にユーザーにとって最良の戦略オプションと設備投資計画を得ることになる。

Riskmizer™は、不確実な環境下において大型プラントの最適な投資計画を求めるためのツールである。種々の戦略オプションに対する比較・分析も可能であり、ユーザーの意思決定を総合的に支援する。今後は、事業に対する新規参入状況などの非確率的な外部環境や、既存設備の補修計画にも適用していきたい。

文献

- (1) Trigeorgis, L. Real Options. Cambridge, Mass., MIT Press, 1996, 427p.(川口 有一郎, ほか訳. リアルオプション. エコノミスト社, 2001, 520p.)
- (2) 武田朗子, ほか. "不確実な事業環境下における設備投資計画手法". 第15回 RAMP シンポジウム論文集. 2003-09, 日本オペレーションズ・リサーチ学会. p.118 - 134.
- (3) Schwartz, P. The Art of the Long View: Planning for the Future in an Uncertain World. New York, Doubleday, 1991, 258p.



半田 恵一 HANDA Keiichi, D.Sc.

研究開発センター システム技術ラボラトリー研究主務, 理博。グラフ論応用, 最適化手法の研究に従事。電子情報通信学会会員。
System Engineering Lab.



内平 直志 UCHIHIRA Naoshi, D.Eng.

研究開発センター システム技術ラボラトリー室長, 工博。リスク管理技術, システム設計技術の研究に従事。経営情報学会会員。
System Engineering Lab.