

国土交通政策研究第9号

**不確実性を考慮した交通行政の新たな運営方式
に関する研究**

2002年9月

国土交通省 国土交通政策研究所

前主任研究官 日原 勝也

はじめに

不確実性やリスクという言葉は、今日のキーワードになっている感があります。紙面を見ると、景気動向の不確実性、テロのリスク、食の安全にまつわる不確実性、天候や自然災害のリスク、医療事故のリスクなどの文字が登場しない日は皆無に近いと言えます。

こうした状況を反映してか、内閣府の国民生活に関する世論調査によれば、日常生活において悩みや不安を感じている国民の割合は、感じていない国民の割合を平成4年に上回り、それ以降も増加傾向が続いて、昨年には調査開始以来最高の65%に達しました。老後の生活や自分と家族の健康、将来の収入などが不安の内容です。

翻って、行政内部にある者の一人としても、将来を見通すことはますます難しくなる一方、国民が行政を見る眼はますます厳しくなっており、今後仕事を進めるにあたり、どのように対処すべきか困惑と不安を覚えます。不確実性を考慮した新しい「やり方」を考える必要があるとすると、どのように取り組んだらよいのでしょうか。身近に接する行政官の多くも同じように悩んでいるように思います。

本研究においては、こうした問題意識から、国土交通行政の分野において、不確実性やリスクの意味をどのように理解したらよいのか、不確実性の増大は行政にどう関係し、今後行政の運営方式をどのように変えてゆくべきなのかについて考える際の基礎的な材料を提供することを目的としました。

具体的には、地震等の自然災害と、交通市場に関係する投資判断や規制を例として、不確実性のゆえにますます重要になると考えるリスク・コミュニケーションや、不確実性に対処して安定をもたらす技術革新としてのリスク・ファイナンス、不確実性を十分考慮し判断の誤りを防ぐ新たな意思決定方式であるリアル・オプションについて、関係する理論を整理し行政への応用時の注意点などを説明することを試みました。

本報告書により、不確実性に関する認識が少しでも深まり、行政の運営方式について不確実性に対応するため必要な改善がなされて行政サービスが質的に向上し、国民・行政の不安を幾許かでも和らげることにつながれば幸いです。

本研究を進めるにあたっては、福井大学教育地域科学部行政社会講座 手塚広一郎助教授から大変有益なご指導を頂きました。改めて心から感謝申し上げます。なお、本報告書の誤りなどについて、筆者のみがその責めを負うことは勿論です。

2002年9月

国土交通政策研究所
前主任研究官 日原勝也

要 旨

国土交通行政を取り巻く環境は大きな変化の途上であり、そうした変化に対応するため行政サービスの実施方式に対しても不確実性を明示的に取り扱う新たな方式への転換が求められていると考える。具体的には、IT革命の拡大、経済のグローバル化などにより社会構造が市場を中心とする自由で分権的な決定システムへ転換しつつあり、従来の制度・仕組みが大きく変更されることに伴って、経済社会全般にわたり不確実性が增大してきている。このため行政の意思決定にあたってはこうした不確実性を十分考慮する必要があるほか、行政等への不信も背景として、国民から、適切に開示した行政情報に基づき、個別の政策判断にもできる限り自らの声を反映するよう行政に要求する傾向が強まりつつある。

このような環境変化を背景に、行政サービスの実施方式に対しては、双方向コミュニケーション型行政の重要性が唱えられ、国民と行政双方が、相互の信頼関係に基づき、不確実性の避けられない判断の前提条件等の取扱いも含めて、政策についてできる限り合意してゆく方式が求められている。また、行政に対しては、不確実性に対処できる新たな技術革新の全てを活用し、従来以上に豊かで安定した国民生活を実現する施策の実施につき最大の努力を続けることや、不確実性を明示的に取り扱う最新の意思決定のツールについて研究・準備し、増大する不確実性により誤った行政判断を防ぐ工夫が要求されている。

本報告書では、こうした不確実性を明示的に扱う新たな運営方式を国土交通行政に実現するための基礎的な準備の一つとして、地震発生等の不確実な事項について双方向型コミュニケーションを行う場合の基礎的な理論であるリスク・コミュニケーション論を紹介し、次に、従来十分に対応できなかった地震被害の不確実性を新たな形で処理し安定した国民生活を実現する金融技術革新であるリスク・ファイナンスに触れ、最後に、不確実性を正面から取り扱う新たな行政の意思決定ツールとして、リアル・オプションを取り上げ、理論の基礎的内容と行政への応用に関する課題等をまとめた。

1. リスク・コミュニケーション

地震等の自然災害に関するコミュニケーションを例に、不確実な内容を含む事柄についての情報の伝達・共有等を扱う理論であるリスク・コミュニケーションの内容を簡単に説明し、不確実な事象についての国民と行政の認識モデルに関する基礎的な理論の整理等を行った。確率的な地震動予測地図が全国的に整備されつつあるなど、不確実な事象に関する情報の取扱いは現実の行政課題となっており、行政において国民及び行政自身双方のリスクに対する認知・判断の仕方について理解を深めることが重要と思われる。

自然災害に関する情報に対して国民はあまり反応しないとの指摘もあるが、認識モデルの一つであるプロスペクト理論によれば地震損失に関し国民はリスク選好的になり得るため、選択肢の提示の仕方如何により、行政の地震対策等について（特に災害発生後に）確実であるが平凡な結果をもたらす対策ではなく、リスクがあるがより良い結果をもたらす可能性のある対策を実施すべきであったと国民から指摘される可能性があることを示した。

2. リスク・ファイナンス

地震による住宅被害を例に、地震発生後の金銭的な負担軽減のため有効な金融技術

革新であるリスク・ファイナンスの内容について、基礎的な理論の整理等を行った。前出の確率的な地震動予測地図の整備など情報開示も進展しており、地震債券などの金融イノベーションの出現により、住宅に関する地震被害についても主に公共セクターのみがリスクを負担せざるを得ない状況は変わりつつあると考える。

住宅等の地震被害の金銭的負担を軽減するために、現在の政府の地震保険に見られるような画一的・固定的な手段にとどまらず、資本市場等への移転を通じて金融イノベーションの成果を活用することにより、国民自身が自らのリスク選好に基づき柔軟で多様な手段を選択可能とすることは十分検討に値すると思われる。特に個々の住宅等への地震被害には相関が想定されるため、金融イノベーションを用いて資本市場等へリスクを移転する新たな選択肢を提供することにより、社会的厚生を向上させる可能性があることを示した。

3. リアル・オプション

金融工学的知見に基づき、不確実性を明示的に考慮し意思決定を柔軟に行う場合の価値を考慮できる意思決定方式として企業の投資判断等における浸透が進んでいるリアル・オプション意思決定方式について、基礎的な理論の整理を行い、その応用例に則して現実の行政に適用する場合の注意点等を整理した。

ブラック-ショールズ (BS) の公式については、シンプルで使用しやすいモデルであるが、原資産に関するモデルが限定され、市場の完備性の仮定を必要とするなど金融市場類似の強い条件が必要となる点に注意するべきである。応用例として、仮想の A 空港株式会社が滑走路を段階的に拡張する既存計画を維持すべきか否か現在判断を迫られていると想定し、この判断に BS 公式を適用し分析した。滑走路からの収益の不確実性が大きい、投資の実行を待つ余裕がある等の条件が備われば、A 社は今後も段階的に拡張できるという選択肢を保持するべきとの結論となり得ることを示した。

BS 公式の簡略版として、2 項モデルも提案されている。必要な条件の少ない汎用性の高いモデルであるが、相当単純化した設定を必要とすることから、複雑な現実の状況に適用する場合には、現実の側を相当程度単純化するか、逆にモデルの側を相当複雑なものにすることとなる点に注意するべきと考える。また、行政の政策判断は、金融市場の価格形成のように多数の参加者による効率的な取引によって得られる決定と異なり、小数の参加者による相互作用により決定されることも多いため、2 項モデルを政策判断に適用するためには、ゲームの理論など他の分野との融合なども有効と考えられる。応用例として、小型書類運送市場における参加企業の投資判断について、2 項モデルとゲーム理論の基礎的知見とあわせて分析するモデルを紹介し、非対称な複占市場においては、投資の純現在価値が大きい場合等を除き、投資が延期されるという結論になる可能性があることを示した。

動的計画法 (ベルマン方程式法) については、これ以外のモデルに比べ必要とする条件がさらに少なく、応用範囲も相当広いものの、やや複雑なモデルであり、この意味で応用範囲が限られること等を整理した。応用例として、自動車排ガスの成分である粒子状物質 (PM) をゼロにする規制をいつ実施すべきかという最適な規制タイミングの問題について、動的計画法の最適停止問題の方法を用いたモデルを適用した。当該モデルの特性を分析しつつ、国民の嗜好・環境関連技術等の変化が激しい等の場合には規制の実施を遅らせ、PM の排出率が伸びる場合には早期に規制を実施することが社会的に望ましいことを示した。また、我が国への適用に関する留意点等も整理した。

本研究の概要

第1章 新たな運営方式：不確実性を明示的に扱う方式へ

1-1 背景

国土交通行政を取り巻く環境は大きな変化の途上にあり、そうした変化に対応するため行政サービスの実施方式に対しても不確実性を明示的に取り扱う新たな方式への転換が求められていると考える。実際一部行政の現場では、既にこうした考え方を取り入れたと考えられる例が出現しており、実現の方向へ徐々に移行しつつあると思われる。環境変化の具体的内容の主なものは以下のとおりである。

（構造改革の進展などにより）市場中心の自由で分権的な決定システムへの転換が進展し既存の制度等が変更されるに伴い不確実性が増大してきている。

（行政不信等を経て）国民が開示情報に基づきできる限り自己決定するモデル（自己責任原則に基づくモデル）が浸透してきている。その前提として不確実な内容をも含む正確できめ細かい情報開示が必要となっている。

少子高齢化・低成長の時代を迎え、国民の側において予測が外れることに対する許容度が低くなり、不確実な情報も共有し合意のうえで政策を実施することが必要になってきている。

予測技術等に関する知見の進展により、天候条件に関するカオスの存在などから一定期間後の予測不可能性や予測誤差の存在を明示して経済社会に関する長期の予測等を行わざるをえない状況がすでに到来していると考ええる。

不確実な状況の下、信頼に基づき双方向型コミュニケーションを経てできるだけ合意に基づき政策実施することが求められている。

1-2 新たな運営方式のイメージ

本研究報告書において述べる新たな運営方式について、内容を単純化して「新たな」点を抽出するとその内容は、以下のようにになると考える。

情報の流れ	：一方向型	双方型へ
方法	：説得のみ	信頼関係・合意へ
交信時	：政策実施時	恒常的・計画実施段階から
提示内容	：結論や「正解」のみ	不確実性に関する想定など含む。
行政の意思決定	：不確実性は限定的に考慮	不確実性を明示的に扱い、政策ツールに関する技術革新も活用

1-3 具体的な研究の3項目

こうした新たな運営方式を支えるため、具体的に研究項目として、以下の3つを扱い、今年度はそれぞれに記す範囲までの研究を行った。

リスク・コミュニケーション：地震等の自然災害発生に関する不確実な事項について双方型コミュニケーションを行う場合の基礎的な理論であるリスク・コミュニケーションの内容について、国民と行政双方の認識モデルなどに関する基礎的な理論の整理等を行った。

リスク・ファイナンス：従来十分に対応できなかった地震等による住宅被害に関する不確実性を新たな形で処理し安定した国民生活を実現する金融技術革新である

リスク・ファイナンスについて、基礎的な理論の整理等を行った。

リアル・オプション：不確実性を明示的に考慮し意思決定を柔軟に行える場合の価値を考慮できる意思決定方式として、金融工学的手法を用いて、民間企業の投資判断等に浸透が進んでいるリアル・オプション意思決定方式について、基礎的な理論の整理を行い、現実の行政に応用する場合の問題点等を整理した。

第2章 不確実性を考慮した双方向コミュニケーション型の国土交通行政に向けて

2-1 リスク・コミュニケーションの基礎と国民のリスク認識モデル

不確実な情報を含む地震発生に関する情報を行政の現場において扱う際には、国民や行政機関がいかにリスク情報を認知・判断するかについてできる限り認識しておくことが重要である。まず、国民の側について、従来用いられてきた期待効用理論に対して提案されているプロスペクト理論によれば、地震防災対策などの政策を提示する仕方如何により、国民の判断が変わる可能性がある(フレーミング効果)。具体的には、確実であるが効果の低い政策に比べより良い結果が含まれる可能性があれば、政策の効果が不確実でもそうした不確実な選択肢が選ばれる可能性があり、事後的に行政は不十分であったと非難されることも十分あり得ると考えられる。

2-2 行政のリスク認識モデルとマスコミとの関係

次に、地震等に関する不確実な情報を扱う際に、組織的な判断や行動に伴う問題点などを検証することも重要であり、行政組織に関する組織心理学的な分析は、今後の進展が待たれる。行政組織としては、慎重性・正確さを重視するバイアスが存在すると考えられ、国民がリスク選考的な判断をする場合には期待に反する結果となる可能性がある。地震等の災害の際重要な役割を果たすメディアについても、バイアスが指摘されており、行政との間で、互いのバイアスを認識し、相互不信の連鎖さを避ける努力が重要と考える。

第3章 地震リスク・ファイナンス・マネージメントの可能性

3-1 地震による住宅被害対策の画一性と最近の状況変化

住宅についての地震被害を軽減することを目的とする現在の地震保険については、米国の例と比べても改善の余地があると思われる。民間の居住用住宅について地震の物的被害を軽減する従来の方法は、政府が再保険カバーを提供する地震保険がほぼ全てであった。地震発生に関する情報開示についても、確率的な地震動予測地図の作成がなされるなど従来の東海地震地域のみならず全国に地震情報に関する開示が広がりつつある。こうした状況を受けて、政府が再保険する範囲やその限度等を変更し、自立的な個人が自らのリスク選好に合致した柔軟で多様なサービスを受けられる可能性を提供することが重要と思われる。

3-2 新たなリスク・ファイナンスの可能性

また民間レジャー施設事業者の例に見られるように、地震リスクを保険と異なる証券化の手法により海外の資本市場にヘッジするなどの金融イノベーションを用いて、リスクを市場に移転する可能性が示されている。こうした中で、個々の住宅の地震被害の間には一定の相関が認められると想定されるため、証券化等の金融イノベーショ

ンを用いて、地震被害による金銭的な負担をこうむる恐れがあるというリスクを市場に移転すること（「地震リスクの市場化」）により、社会全体の効用水準を高める可能性があると考えられる。

今後十分な検討が必要であるものの、個人が開示された情報に基づき従来のような画一的な保険形態のみの選択肢から、個人のリスク選考に応じて柔軟で多様なリスク・ファイナンスの手段を選択できる状況を実現するため、引き続き前提となる基礎的な検討を進めることが重要と考える。

第4章 不確実性を考慮した柔軟な意思決定方式（リアル・オプション）の国土交通行政への導入

4 - 1 リアル・オプション意思決定方式の基本的な内容

金融工学的知見に基づき、不確実性を明示的に考慮し意思決定を柔軟に行える場合の価値を考慮できる意思決定方式として、企業等における浸透が進んでいるリアル・オプション意思決定方式について、基礎的な理論の整理を行い、その応用例に則して現実の行政に適用する場合の注意点等を整理した。より現実の意思決定に近い方式であり、国土交通政策のように長期の投資判断や多くの不確実性を同時に考慮する必要がある場合にも有効であることを示した。

4 - 2 ブラック-ショールズ（BS）の公式と応用例

リアル・オプションの代表例であるブラック-ショールズ（BS）の公式については、シンプルで使用しやすいモデルであるが、原資産のモデルが限定され、市場の完備性の条件を必要とするなど金融市場類似の強い仮定が必要となる点に注意するべきである。

応用例として、仮定のA空港株式会社が直面する滑走路を段階的に拡張する既存計画の是非に関する判断について、BS公式を適用し分析した。将来の滑走路からの収益に関する不確実性が大きい、投資の実行を待つ余裕がある等の条件が備われば、A社は今後も段階的に拡張できるという選択肢を保持するべきとの結論となり得ることを示した。

4 - 3 2項モデルと応用例

BS公式の簡略版として、2項モデルも提案されている。必要とする条件の少ない汎用性の高いモデルであるが、相当単純化した設定を必要とすることから、大変複雑な現実の状況に適用する場合には、現実を相当程度単純化するか、逆にモデル自体を相当複雑化させることとなる点に注意するべきと考える。また、行政の政策判断は、金融市場の価格形成のように多数の参加者による効率的な取引によってなされる決定と異なり、小数の参加者による相互作用により決定されることも多いため、2項モデルを政策判断に適用するためには、ゲームの理論など他の分野との融合なども有効と考えられる。

応用例として、小型書類運送市場における参加企業の投資判断について、2項モデルとゲーム理論の基礎的知見とあわせて分析するモデルを紹介し、非対称な複占市場においては、投資の純現在価値が大きい場合等を除き、投資が延期されるという結論になる可能性があることを示した。

4 - 4 動的計画法（ベルマン方程式法）と応用例

動的計画法（ベルマン方程式法）については、これ以外のモデルに比べ必要とする条件がさらに少なく、応用範囲も相当広いものの、やや複雑なモデルであり、この意味で応用範囲に限られること等を整理した。

応用例として、自動車排ガスの成分である粒子状物質（PM）をゼロにする規制をいつ実施すべきかという最適な規制タイミングの問題について、動的計画法の最適停止問題の方法を用いるモデルを適用した。当該モデルの特性を分析しつつ、国民の嗜好・環境関連技術等の変化が激しい等の場合には規制の実施を遅らせ、PMの排出率が伸びる場合には早期に規制を実施することが社会的に望ましいことを示した。あわせて、我が国への適用にあたっての留意点等を整理した。

目次

第1章 新たな運営方式：不確実性を明示的に扱う。

1 - 1	不確実性とは？ 多義的であり整理して使用する必要.....	1
	(1)本報告書での使用法について.....	1
	(2)金融分野における不確実性（＝リスク＝ボラティリティー）について.....	2
1 - 2	不確実性を考慮した新たな交通行政の運営方式のイメージについて.....	3
	(1)背景.....	3
	(2)なぜ新しい方式が必要か？.....	4
	(3)新しい方式と従来方式について.....	6
	(4)どういう点が新たな方式であるか？.....	6
1 - 3	本研究では、地震等の巨大自然災害に関する諸問題（リスク・コミュニケーションとリスク・ファイナンス）及び不確実性を考慮した意思決定方式（リアル・オプション）を扱う。.....	8
1 - 4	リスク・マネジメント手法の体系 地震災害のケース（リスク・コミュニケーションとリスク・ファイナンス）.....	9
1 - 5	不確実性を明示的に考慮した意思決定方式 リアル・オプション意思決定法.....	11
	(1)リアル・オプション意思決定法について.....	11
	(2)空港の整備事業などに実質的には既に適用されてきている。.....	11
	(3)最近の事情の変化？金融工学やパーソナル・コンピュータの発達.....	12
	(4)行政の投資判断や規制政策の分析等国土交通行政に関しては、多くの適用範囲を有する。.....	12

第2章 不確実性を考慮した双方向コミュニケーション型の国土交通行政に向けて

2 - 1	リスク・コミュニケーションについて.....	13
2 - 2	不確実性下での意思決定主体の行動モデルについて.....	14
	(1)モデルの多様性.....	14
	(2)（交通）心理学的アプローチ.....	14
	(3)経済学的アプローチ.....	14
	(3) - 1 リスクに関する考え方について.....	14
	(3) - 2 期待効用理論.....	14
	(3) - 3 プロスペクト理論について.....	16
2 - 3	不確実性下の意思決定モデルとしてプロスペクト理論を考えた場合、地震防災対策はよりよい可能性を追求して（リスクをとって）より多くを行うことが必要となる可能性がある。.....	20
(1) - 1	損失について不確実な選択肢と確実な選択肢が示されプロスペクト理論によるモデルにしたがって国民が意思決定する場合には、より良い結果が生まれる可能性のある不確実な選択肢が選ばれることとなると思われる。.....	20

(1) - 2 不確実性の提供を契機に追加的な防災対策を国民が望む可能性が ある。.....	21
(2) 利得について不確実な選択肢と確実な選択肢が示されリスク回避型効用 関数により国民が意思決定する場合には、確実な選択肢が選択されるこ とになる。.....	22
(3) 政策についての選択肢を提示する仕方如何によって、不確実性下の意思 決定が変わる(結論が変わる)可能性がある。.....	23
(4) 自然災害の過小評価などの国民の認知特性との不整合について 事前評価と事後評価の違いか。.....	24
2 - 4 国民側の地震などに関するリスク認知について.....	24
(1) リスク認知に関する心理学的な蓄積について(総論).....	24
(2) 地震についての認知等に関する過去の社会心理学などからの研究.....	25
(2) - 1 社会心理学などからの地震に関する従来の研究.....	25
(2) - 2 不確実性を伴う地震発生等に関する情報提供の新しい状況と国民側 の認知に関する関心の高まり.....	25
(2) - 2 - 1 確率的地震動予測地図の作成・公表・活用.....	25
(2) - 2 - 2 地震発生に関する確率を用いた情報の伝達に関する注意点.....	27
(3) リスク・コミュニケーション研究からの地震災害に関する国民の認知 に対する(一般的な)示唆.....	30
(3) - 1 地震等の災害予測に、人々が反応しないことが指摘されてきている。 (ポリアンナ仮説).....	30
(3) - 2 地震等のリスクに対する国民の意思決定におけるフレーミング効果 と防災対策へ国民がより大きな期待をする可能性について.....	30
(3) - 3 地震等の自然災害は原子力事故等の科学技術関連災害に比べ生起 確率が低く見積もられる傾向がある。(自然災害の正常化バイアス).....	31
(3) - 4 長期的な準備としての事前のリスク・コミュニケーションは、重要 だが効果的に行うことが難しい。.....	31
(3) - 5 直前の地震災害警報に関し蓄積された研究の概要.....	32
(3) - 6 イタリアでの地震警報発令事例に関する概要.....	33
2 - 5 リスク・コミュニケーションの当事者たる国土交通省の側の組織心理学 的な知見について.....	36
(1) 組織心理学的な知見に関する研究の必要性は、今後、さらに高まると予 想される。.....	36
(2) 過去指摘された組織的な意思決定における問題点.....	36
(2) - 1 慎重な行政組織ゆえに誤る可能性 予測が外れる懸念から情報伝 達を控えるバイアスが存在する可能性がある。.....	36
(2) - 2 信頼される組織としてのブランドを国民との間で構築・維持してい く努力が必要と思われる。.....	37
(2) - 3 メディアとの関係 お互いのバイアスを理解して、相互不信の 連鎖を避ける努力が重要.....	38

第3章 地震リスク・ファイナンス・マネージメントの可能性

3 - 1	リスク・ファイナンスについて.....	39
(1)	リスク・ファイナンスとは？.....	39
(2)	リスク・ファイナンスの定義.....	39
(3)	地震に関するリスク・ファイナンスについて.....	40
3 - 2	世界の巨大リスク.....	40
(1)	地震以外も含めた世界の巨大リスクについて.....	40
(2)	地震リスクの代表例の日米比較 阪神・淡路大震災とノースリッジ地震.....	42
3 - 3	保険について.....	44
(1)	定義.....	44
(2)	保険の基本的な考え方.....	44
(3)	数理的な基礎 大数の法則.....	45
3 - 4	地震保険について.....	45
(1)	カリフォルニア州地震庁 (California Earthquake Authority, CEA) による保険制度について.....	47
(2)	我が国の地震保険と CEA による保険の比較について.....	50
(3)	災害リスクの証券化の例...オリエンタルランド (東京ディズニーリゾート) の場合.....	50
(4)	テロに対応した航空保険の例.....	58
(5)	その他公共セクターによる巨大リスクの再保険プログラムについて.....	61
3 - 5	地震を中心とする巨大自然災害リスクに関する国家レベルのリスク・ファイナンス・マネージメント (国家によるカタストロフィック・リスク・ファイナンス・マネージメント) の可能性について.....	62
(1)	問題の背景.....	62
(2)	居住用住宅についてのリスク・ファイナンスに関する考え方 自然災害「リスクの市場化」へ.....	63
(3)	巨大自然災害リスクに関する国家レベルのファイナンス・マネージメント・システム (国家によるカタストロフィック・リスク・ファイナンス・マネージメント・システム) の可能性について.....	64
(3) - 1	基本的考え方.....	64
(3) - 2	検討可能性のある内容.....	64
(3) - 3	今後への視点.....	66
(参考)	地震債券などのデリバティブ (証券化) 商品と保険商品との比較.....	68

第4章 不確実性を考慮した柔軟な意思決定方式 (リアル・オプション) の国土交通行政への導入

4 - 1	なぜ、リアル・オプション?.....	71
4 - 2	なぜ、国土交通省が?.....	71
4 - 3	従来の方法 (NPV法/CBA等) と限界.....	71
(1)	現在用いられている手法とリアル・オプション・モデル.....	71
(1) - 1	従来手法について.....	71
(1) - 2	従来手法の限界について.....	72

(1) - 3 従来の方法における限界の例.....	72
(1) - 4 リアル・オプションの場合は、より柔軟に不確実性をモデル化で きる。.....	73
(2) その他のモデルとリアル・オプションとの関連.....	73
(2) - 1 イベントツリー分析 主体に決定権自体なし.....	73
(2) - 2 ディジションツリー分析 意思決定を加味.....	74
(2) - 3 リアル・オプション分析 柔軟な意思決定を評価	74
4 - 4 リアル・オプションとは?	74
(1) リアル・オプション意思決定法.....	74
(2) 金融取引に関するオプションについて	75
(2) - 1 金融オプションに関する典型例としてコール・オプションについ て	75
(2) - 2 ブラック-ショールズ (BS)の公式について.....	76
(2) - 3 コール・オプションの価格とBS公式の各要素の関係	77
(2) - 4 BS公式における仮定.....	77
(2) - 5 BS公式の導出過程について.....	77
4 - 5 金融オプションとリアル・オプション	81
(1) 金融取引のコール・オプションとリアル・オプションとの関係	81
(2) BS公式を空港拡張事業等のプロジェクトへ適用する際の限界	82
(2) - 1 空港等のプロジェクトの便益の確率分布が、将来の任意の時点で、 (対数)正規分布すると仮定している。(= 交通プロジェクト価値 の変化が幾何ブラウン運動にしたがうとの仮定が必要。).....	82
(2) - 2 市場の完備性(一物一価の原則)を仮定する必要がある。	83
(2) - 3 いわば理想的な金融市場を仮定する必要がある。	83
(2) - 4 大変シンプルで実務的にも使用しやすいモデルであり、必要となる 仮定が実現した場合における、いわば一つの参照モデルとして用い ることは可能。	84
4 - 6 BS公式を用いた分析例 赤字を計上するA空港株式会社の意思決 定にリアル・オプション意思決定手法を応用する例	86
(1) - 1 問題の背景.....	86
(1) 2 「空港の赤字」は、主体の財務状況を示すが社会全体の評価と必ずし も一致しない。	86
(2) 将来の拡張オプションを考慮した「空港の赤字」に関する分析	87
(2) 1 仮定のA空港株式会社について.....	87
(2) 2 A会社の有する拡張オプションと意思決定問題.....	88
(2) 3 拡張に関する事業のキャッシュフロー.....	88
(2) 4 拡張オプションの価値評価	90
(2) 5 意思決定についての考え方	90
(2) 6 負のキャッシュフローの事業から、正のオプション価値が生まれ る。	92
(2) 7 空港の滑走路拡張事業に関するイプソイド・ポリティイ(感度分析).....	92
(3) 累積している「赤字」とリアル・オプションの価値について.....	94

(4)まとめ	94
4 - 7 リアル・オプション評価手法の整理 主な3手法の比較.....	95
4 - 8 2項モデル シンプルで汎用性の高いモデル.....	97
(1)準備	97
(1) - 1 リアル・オプションの基本構造(確認).....	97
(1) - 2 2項モデルの基本構造.....	97
(1) - 3 原資産の変動モデルには制限がない。ただし、幾何ブラウン運動 (対数正規分布)にしたがうと仮定することも多用される。.....	98
(1) - 4 市場の完備性(一物一価の原則)は必要とされないが、実務上そ れを前提とした2項モデルも多用される。.....	99
(1) - 5 「市場の完備性」、「一物一価の原則」及び「無裁定性の基本原理」 は、同一の効果を有する。.....	100
(1) - 6 複製ポートフォリオを刻々組み替えることで、原資産の価値(変 化)をリスクのない資産の利子率に連動させることができる。.....	100
(1) - 7 この解*は、一物一価の原則を前提とすると投資家の嗜好にかか らずリスク・フリー割引率(r)を使用できることを示してい る。(原資産の価値変化を示す上昇確率 p は、リスク中立確率 p^* と なっている。).....	101
(1) - 8 一物一価の原則などの仮定をおけば、期待収益率(μ)、実現確率 (p)とリスク中立確率(p^*)の3者は、2者が決まれば残り1者が定 まる関係にある。.....	101
(2)リアル・オプションによる価値の算出	102
(2) - 1 不確実性に対応する柔軟性価値 = オプションの価値を加味した原 資産の表現.....	102
(2) - 2 市場の完備性(一物一価の原則)を前提としない場合の2項モデ ルは、汎用性が増すが、操作性に劣る。.....	103
(2) - 3 その他の金融市場類似性を用いる必要がない。.....	104
(2) - 4 2項モデルはシンプルで扱いやすいが、様々な限界がある。.....	105
4 - 9 2項モデルを用いた分析例 複占的な競争状況における市場参加 者の投資タイミングに対するリアル・オプション(2項モデル)及びゲー ム理論的手法による分析	106
(1)「小型書類運送市場」を題材とする理由 競争市場から独占市場まで の広い可能性	106
(2)メール便と既存郵政サービスについて.....	106
(2) - 1 「小型書類運送市場」の実態.....	106
(2) - 2 現在のメール便市場.....	107
(2) - 3 競合サービス比較	108
(2) - 4 小型書類運送市場 市場構造と参加者の投資判断の關係に関 する分析.....	110
(3)交通市場における経済的レント(超過利潤)の存在について.....	112
(4)経済的レントについての基本モデル.....	112
(5)完全競争から独占までについての経済的なレントに関する変化.....	112

(5) - 1	完全競争の状況における経済的なレントの減少モデル.....	112
(5) - 2 - (1)	複占モデルにおけるモデル ゲーム理論の知見を 2項モデルへ導入.....	113
(5) - 2 - (2)	複占市場における経済的なレントの減少モデル.....	114
(5) - 3	独占における経済的レント減少のモデル.....	114
(6)	市場構造と参加者の投資行動に関する定性的な分析.....	116
(6) - 1	完全競争.....	116
(6) - 2	経済的レントの存在する競争的市场.....	116
(6) - 3	独占状況.....	116
(6) - 4	複占状況.....	116
(7)	複占状況の下の競争モデルを用いた「小型書類運送市場」における分析 (簡略モデル).....	117
(7) - 1	複占市場の分析の前提.....	117
(7) - 2	複占状況での数値(簡略モデル)分析の結果.....	117
(7) - 3	非対称型複占状況での分析のまとめ.....	119
(8)	実際の小型書類運送市場への応用の可能性について.....	120
4 - 1 0	動的計画法(ベルマン方程式法).....	121
(1)	準備.....	121
(1) - 1	動的計画法の基本的な考え方.....	121
(1) - 2	動的計画法の枠組みは交通関係社会資本等のプロジェクトその他 に適用することも可能と思われる。.....	121
(1) - 3	最適化問題への適用についての基本的考え方.....	122
(1) - 4	有限期間から無限期間への拡張も可能.....	123
(2)	動的計画法(ベルマン方程式法)を用いたリアル・オプションの考え方...123	
(2) - 1	原資産の不確実性のモデル化.....	123
(2) - 2	原資産の不確実性を反映した変動モデルは、通常幾何ブラウン運 動が用いられる。.....	123
(2) - 3	柔軟性価値を含めたプロジェクト価値の評価.....	124
(2) - 4	最適停止問題について.....	124
(3)	他のリアル・オプション評価法との違い.....	126
(3) - 1	市場の完備性(一物一価の原則)は必要としない。.....	126
(3) - 2	その他金融市場類似性も必ずしも必要としない。.....	126
(3) - 3	多くの条件を必要としないが、モデルとしてやや難しく操作性は 他の方法に比べ劣る。.....	126
4 - 1 1	動的計画法による分析例 自動車排ガス規制を実施するタイミ ングに対してリアル・オプション意思決定法(動的計画法)を応用.....	127
(1)	条件設定.....	127
(2)	モデルと仮定.....	127
(2) - 1	モデルについて.....	127
(2) - 2	モデルを用いた考え方について.....	128
(3)	具体的数値による分析.....	129
(3) - 1	具体的数値計算.....	129

(3) - 2 結果	129
(4) 実施タイミングに影響を与える要因とその影響.....	130
(4) - 1 環境負荷物質の排出量とタイミングとの関係.....	131
(4) - 2 自然界の吸収率とタイミングとの関係.....	131
(4) - 3 嗜好変化・技術変化の激しさとタイミングとの関係.....	132
(4) - 4 社会的割引率とタイミングとの関係.....	132
(5) 各要因によるタイミングへの弾力性について(モデルの総合的な特性).....	133
(6) 要因それぞれを同時に変動させるシミュレーション	133
(6) - 1 シミュレーションの前提条件等について	133
(6) - 2 シミュレーションの結果について	134
(7) 本モデルの特色と限界.....	135
(7) - 1 本モデルの特色について.....	135
(7) - 2 本モデルの限界について.....	135
(8) 我が国の状況への適用可能性について 実証研究が不可欠.....	136
補論 ディキジットとピンディックによる環境政策の実施タイミングに 対する動的計画法(ベルマン方程式法)の数値モデルについて.....	137
4 - 1 2 リアル・オプションの課題.....	139
 (参考) リアル・オプションをめぐる想定問答.....	140
 参考文献	142
 参考資料	147

第 1 章

新たな運営方式：不確実性を明示的に取り扱う。

第 1 章 新たな運営方式：不確実性を明示的に取り扱う。

1- 1 「不確実性」とは？ 多義的であり整理して使用する必要

「不確実性」の用語は、日常的に用いられ、使用される場面も、文脈も多様である。類義語も多く、それらもまた多様な場面で使用されている。例えば、使用者により、経済・金融（例；金利変動） 自然災害（例；地震） 医療（例；医療事故） 環境（例；汚染） 人工災害（例；事故） 社会心理（例；パニック・流言）など様々な文脈で用いられる。したがって、実際に使用する際には、分野等に応じ、意味内容を整理して用いる必要がある。

(1)本報告書での使用法について

本報告書では、主に地震等自然災害の発生に関する防災の文脈、及び、経済価値の変動に関する経済・金融関連の文脈で、「不確実性」の用語を用いる。いずれの場面でも、主に経済的な損失や価値に関する分析を行うことから、特に断りのない限り、経済・金融の分野にて伝統的に用いられてきた定義を用いることとする。以下に、従来の代表的な分類であるシカゴ大学教授の Frank Knight のリスクと不確実性に関する分類と、それを踏まえた最近のハーバード大学の Richard Zeckhauser の分類を以下に掲げる。

従来の代表的な分類¹

F. Knight の分類

区分	内容
リスク (risk)	生起事象とその発生確率が既知のもの
不確実性 (uncertainty)	生起事象のみ既知で、その発生確率が未知のもの

R. Zeckhauser の分類

区分	内容
リスク (risk)	生起事象とその発生確率が既知のもの
不確実性 (uncertainty)	生起事象のみ既知で、その発生確率が未知のもの
不知(ignorance)	生起事象自体もその発生確率も未知のもの

数多くの専門家が指摘しているように、生起事象の発生確率が正確に判明している場合は限られ、また、他方、真の確率が不明でも、既知の確率分布を仮定するなどにより相当の分析がなされる。したがって、以下では、リスクと不確実性の厳密な用語の分類にこだわらず、Knight の定義にいうリスクと不確実性を併せて、広義の「不確実性」と考え、両方の意味を含めて不確実性と記述することを原則とする。ただ、誤解のないと思われる文脈では、適宜「リスク」(= 生起事象とその確率が既知のもの) と狭義の「不確実性」(= 生起事象のみ既知で、その確率が未知のもの) の語も用いることとする²。

¹ この部分は、Cutler・Zeckhauser (1999)によった。

² リスクの字義による分類について、純粹リスクと投機リスク、動的リスクと静的リスクなど、詳しく

(2)金融分野における不確実性 (=リスク=ボラティリティー)について

金融の分野においても、リスクの用語が頻繁に用いられる。この分野のリスクは、(1)で説明したリスクをより限定して、以下の内容として使用されることが通例である。

「リスク」: 資産額、プロジェクト価値等の値が確実に決まらないこと³。(具体的には、以下に述べるように確率変数の期待値の周りのばらつきを示す標準偏差 (=ボラティリティー) をリスクと考える。)

こうしたリスクのある交通関係プロジェクトを扱うために、以下の諸用語を定義する。

「確率変数 (random variable): 値が一義的に定まらず、確率的にしか扱えない変数。 x などで表される。

つまり、交通関係プロジェクトの価値等が一義に定まらないので、確率変数 (x) により扱うこととする。こうした確率変数によるプロジェクト価値を評価するため次の尺度を用いる。

「期待値」 = 平均(mean): 確率変数の値を確率で加重した平均の値。 $\mu = E[x]$ で通例示される。 x の確率密度関数を $f(x)$ として、通例以下の計算による。

$$m = E[x] = \sum_x xf(x) \quad (\text{又は} \quad = \int xf(x)dx)$$

「分散」 (variance): 確率変数の期待値の周りのばらつき、散らばり具合を示す値。 $\sigma^2 = \text{var}[x] = E[(x - E[x])^2]$ で通例示される。通例以下の計算による。

$$\text{var}[x] = E[(x - E[x])^2] = E[x^2] - (E[x])^2$$

「標準偏差」 (standard deviation): 分散の正の平方根 (= (分散)^(1/2))。 で通例示される。また、金融商品に関する文脈では、ボラティリティーといわれることが多い。以下の計算による。

$$s = \sqrt{\text{var}[x]}$$

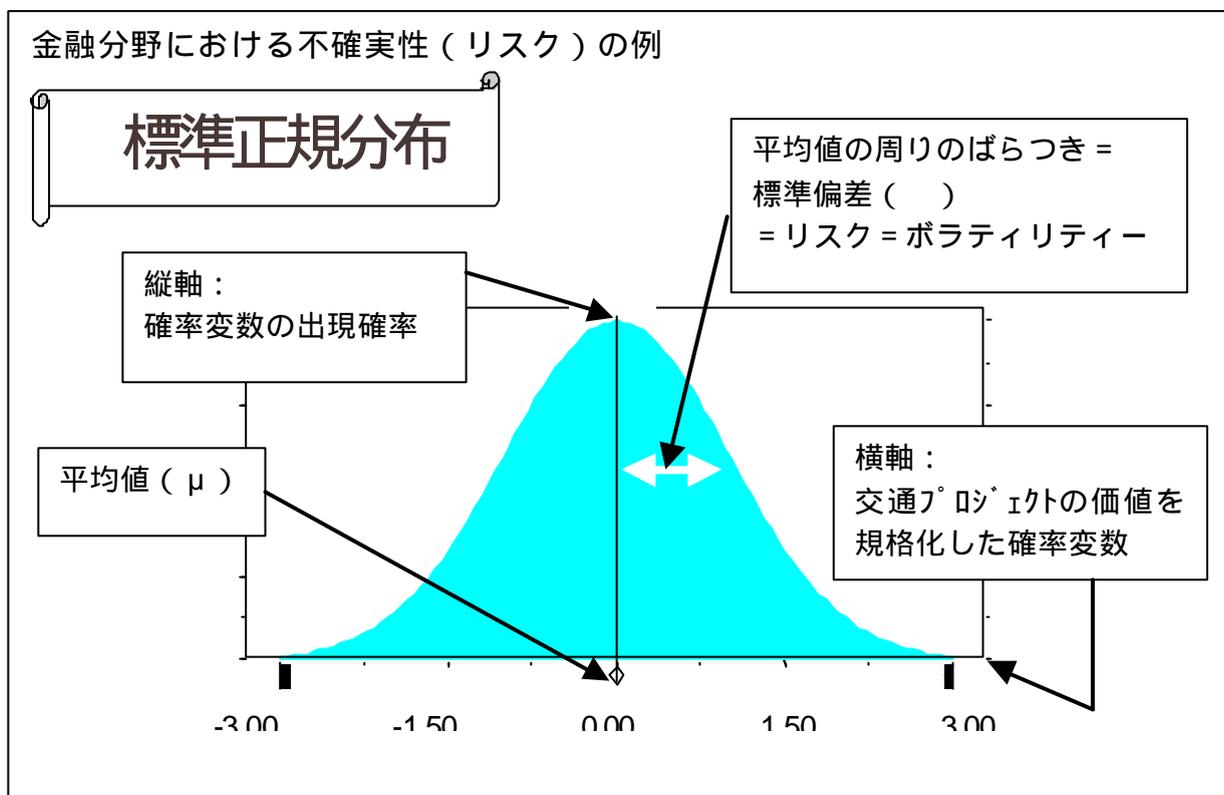
分散の値 (すなわち標準偏差の値) が大きいほど、平均値から離れてより分散していることになり、平均的な値の出現する確率が低くなる (平均的な値から離れた極端な値が出現する確率が増える) ことから、「リスクが大きい」と評価される。

は、石井(2002) pp 20-23。リスクの学問的な領域については、日本リスク研究学会編 リスク学事典 第1章リスク学の領域と方法 に詳しい。

³ 野口・藤井(2000)「金融工学」 p16-17

本報告書においても、第3章と第4章においては、以上に述べた金融分野におけるより限定された意味のリスクについて、議論する。

参考に、確率変数 x の確率密度関数を標準正規分布とした場合の例を以下示す。



1-2 不確実性を考慮した新たな交通行政の運営方式のイメージについて

(1) 背景

経済社会の大きな変化により、さまざま分野の不確実性が高まるなか、自己責任原則が国民の間にも徐々に浸透してきており、従来の行政運営手法は大きく変革を求められている。

国土交通省においても、過去公共事業によるインフラ整備において住民などと意見対立する困難に直面した場合には、住民と行政に加え学識経験者などの第三者を公平な仲介者（ファシリテーター）として交えた話し合いの場を設け、そこで合意された事項に基づいて行政を進めるなどにより、現在にいたるまで、大変深刻な意見対立状況を克服する努力が続いている。最近は、こうした、事例にとどまらず、情報公開制度の本格始動、説明責任を高める行政評価制度の開始や、パブリックコメント制の導入、ノーアクションレター制の導入など、行政運営のシステム全体について、徐々に自己責任原則の新しい時代にふさわしい改革が急速に進められてきている。

ここでは、こうした急速な改革の先にある、現時点で目標とすべき一つのモデルに関するおおまかなイメージを提案し説明する。具体的に活用できる政策領域としては、

実施に時間を要し、計画と実際の状況が乖離することから批判の激しい公共事業関連のプロジェクトや、一旦制度として法律などの形で導入されると容易にやり返すことのできない安全規制、環境規制などを念頭においている。

(2) なぜ新しい方式が必要か？

以下に掲げる最近の情勢から、新たな運営方式が必要ではないかと考える。

(大きな情勢の変化) 経済社会の劇的变化により不確実性が増大

市場経済の拡大と経済のグローバル化、IT革命をはじめとする科学技術の著しい進展などにより、社会経済のシステムが、市場を中心とする自由で分権的な意思決定システムへと移行しつつある中で、従来の制度や仕組みが大きく変更されている。これに伴い、社会経済全般にわたり様々な分野において、不確実性が増大している。このため、安定的な経済成長を想定し、いわば確実性を前提にした運営方式から、ますます増大する不確実性の存在を明示的に扱った運営方式が必要と考える。

(不確実性への社会としての対応) 自立した国民が自己決定し自己責任を負う時代の到来

社会経済のシステムが、このように大きく変化し不確実性が増大するにつれ、行政の判断にも不確実な部分が増えてきている。これに対応するため、国民の側からは、できるだけ自らの声を政策判断に反映する形で国民が自己決定し、その結果についても自己責任を負うべきとする方式が益々求められるようになってきている。不確実な状況については、国民のために行政などがリスクを負担するモデルから、国民自身がリスクを負って行動するモデル(リスクの民主化)が生じてきていると考える。また、ここの状況を保証するため、不確実な事態・状況についての情報を含め、より正確できめ細かい情報提供が必要とされてきている。

(行政サービスの需要サイド) 低成長時代に入り、予測の誤りへの許容性が低くなっている。

少子高齢化社会で、デフレ経済が続くなどの状況にある中で、今後も低経済成長が予想される。このため、高度成長時代には成長により吸収され問題にならなかった部分が顕在化し、国民の側が需要予測の誤りなど行政判断の誤りに対してより激しい痛みを感じない状況が生じてきている。昨今の過大予測などに対する厳しい批判が良い例であり、あらかじめ不確実性(=行政の判断が誤る可能性)についての情報も開示し、平素から築いた信頼関係のなかで、不確実な事項についてもできる限り合意した上で政策を実施する必要性が生じてきてきている。

(行政サービスの供給サイド) 不確実性・予測誤差を考慮せざるを得ない状況に

政策に関する選択肢やその前提としての需要予測等を供給する行政側としても、不確実性・予測誤差等を明示的に考慮せざるを得ない状況になってきていると考える。

例えば、交通計画の需要予測において用いられている非集計ロジットモデルによる交通モードごとの需要予測の手法を単純化すると、まず、万人に共通する交通サービスに関する効用関数を、費用や所要時間などの説明変数からなるモデルとして

構築し、既存データから統計的にパラメータを推定、そこから各交通モードを選択した場合の効用を全モードについて求め、各モードの効用が全モードの効用に占める割合から各交通モードの選択確率を算定する。次に、各モードの選択確率と発地着地ごとの移動予測量を掛け合わせて需要量を予測する⁴。こうして得られる個別の交通モードの需要予測値は、統計的に算出される量であり、人口推計やマクロ経済予測など他の仮定とともにモデルの前提とする仮定を基に計算した値であるため、現実の値から乖離する可能性を常に受け入れざるを得ないものである。

高度成長やバブルの時代においては、現実からの乖離は予測値より良い実現値として現れることが多かったことから問題とされることも少なかったと思われるが、低成長を前提とすると、予測の誤差自体に大きな注目が集まる傾向が生じていると考えられ、行政側としても誤差自体を無視し得ない状況にある。

さらに、より一般的には、気象現象に関するカオス論に典型的に見られるように、一定時間経過後は予測ができない現象があることが知られているほか、生体や社会を複雑系や自己組織系として特別の複雑なシステムと考える立場においては、社会の動きは、分析的・要素還元的な決定論的手法はおろか、確率論的手法によっても将来予測できないと考えて、新たなアプローチが盛んに研究されている⁵。

現実の経済社会活動を見ても、気象などの自然条件と人間が相互作用し、あるいは都市の盛衰などが示すように人間同志・人間と社会が複雑に作用した結果が実際の状況として現れている側面が認められ、そこでは、複雑系空間経済学など複雑なシステムに対する最新の知見を活用する可能性があると考えられる。

このように見ると、サービス供給側の行政としても、従来 of 予測等の手法には限界があることを前提として国民との間でコミュニケーションすることが最低限必要であり、予測精度に一定の制約が伴うことはやむを得ず、むしろ精度に影響を与える具体的な前提条件や仮定自体を国民により率直に明らかにして、政策について国民との間でできるだけ合意を求めていく運営方式が重要と思われる。

行政サービスの需給相互の問題として事後的に、だましたと批判されないため、合意形成型の意思決定が必要に

従来のように、専門家集団の判断に基づく「正解」を説得して政策を実施するのではなく、日常から国民との双方向のコミュニケーションを経て、合意に基づき政策を実施するスタイルへの転換が長期的に信頼関係を維持する上からも必要と考える。正解提示方式の場合、事後的に想定が外れる場合についての合意がないことから、国民の側から、だました、あるいは隠したとの批判がされやすいと思われる。

また、国際化や雇用の流動化、事前規制型から事後監視型の行政への転換とともに、自然科学・社会科学に関する専門的知見が行政などの一部領域にのみ独占されている状況は、急速に崩れつつあると思われる。我が国の行政組織における専門的な判断のみが、あり得る判断として唯一との前提は成立しにくくなっており、ますます、他の専門的集団との対話による合意形成の重要性が高まってきていると考える。

⁴ 藤井・中条(1992)p22-23

⁵ 杉本他(2002)pp171-172

(3) 新しい方式と従来の方式について

従来の方式と新たな方式について、極端に単純化してイメージを示すと以下のようになる。

従来の行政運営方式の極端なモデル

専門家（行政）から非専門家（国民・住民）に対し、一つの「正解」となる政策を提示し、説得により合意を得てその政策の実施を図る。

新しい運営方式の極単純なイメージ

通常より互いの不確実性に関する考え方等に関して双方向型コミュニケーションを経て、信頼関係を構築した国民・住民と行政専門家集団（国民・住民の代理人（エージェント））とが、政策の企画段階から、政策の前提条件等に関する不確実性について、双方向コミュニケーションにより具体的な情報を共有し、行政側は不確実性を明示的に扱う意思決定手法により分析・判断し、それを用いた不確実性に関する判断・処理を国民・住民に明示しつつ、政策の内容・実施時期等に関する一定の合意を得て、実際の政策（インフラ整備・規制の実施）を実行していく。

(4) どういう点が新たな方式であるか？

国民と行政との間の関係について、特色ごとに対比すると以下のようになる。

情報の流れ：行政から国民への一方向から国民から行政をも含む双方向へ

方法：行政による説得というスタイルから信頼関係に基づき関係者が合意して実施へ

交信時：政策実施の際に交信するスタイルから恒常的に、計画段階から交信するスタイルへ

提示・交信する内容：行政が「正解」と考える内容のみ提示するスタイルから政策の選択肢を前提条件に関する不確実性についての想定なども含めて提示するスタイルへ

行政の意思決定：不確実性を限定的に考慮した方式から明示的に考慮した意思決定方式へまた、金融のイノベーションも可能な場合には活用するスタイルへ

1-3 本研究では、地震等の自然災害に関する諸問題（リスク・コミュニケーションとリスク・ファイナンス）及び不確実性を考慮した意思決定方式（リアル・オプション）を扱う

前節で述べた、不確実性を考慮した新たな国土交通行政を実施していく場合、それを取り巻く不確実性についてまず確認する必要があるが、実際、国土交通行政を取り巻くについては、当然ながら、その関係分野については自然的条件、社会的条件、経済的条件、技術的条件など様々な分野にわたり、また、影響の程度についても軽いものから大きな影響を与えるものまで、実にさまざまな不確実性（意図した結果が生じない可能性）が存在する。また、こうした不確実性それぞれについて、そのマネジメント（コントロール）を考える場合にも、一義的な責任を負う担当のレベルは、さまざまなレベルが考えられる。行政官の個人のレベルから、組織としての課・局をへて、国土交通大臣以下の省全体のレベル、内閣（国家の行政）レベルから国会など3権全体が構成する政府全体のレベル、さらには、地方公共団体まで含んだ公共セクター全体のレベル、そして、究極には行政サービスの受けてとしての国民全体も含んだ、我が国全体のレベルまで、様々なレベルが存在する。

これらの不確実性について、その全てを思いつく限りリスト・アップし、端から分析していくことも一つの手法としてあり得ると思われる。あわせて、マネジメントの内容も各レベル全体を網羅的に列挙して整理・分析すると、大変複雑多岐なものになる。

しかし、本報告書では、そうした網羅的・鳥瞰図的なアプローチはとらず、以下の2つの視点から、この大きな問題に対して、若干の整理と分析の光を当てることとした。

第1の視点として、典型事例に着目して分析を行う。具体的には、国土交通行政の扱う不確実性の典型例として、影響が巨大で、及ぼす範囲も多岐にわたる巨大自然災害の例をとりあげ、その発生の不確実性に着目して、この巨大リスクに関するマネジメントの問題を取り上げる。第2の視点として、対象とする不確実性ではなく、対処する主体の意思決定方式に着目する。具体的には、（さまざまな）不確実性を明示的に考慮できる意思決定手法として、新たに提案されている手法（リアル・オプション）について整理・分析する。

まず、第1の着目点から、地震を主とする巨大自然災害に関する不確実性とを扱い、こうした巨大災害に関するリスク・マネジメントの一部として、不確実な情報の伝達・共有に関する問題点（第2章 リスク・コミュニケーション）や、自然災害による金銭的な被害を事前にコントロールする金融的な手法（第3章 リスク・ファイナンス）について検討する。

次に、第2の着目点から、同じくリスク・マネジメントの一部である意思決定方法の改善に関し、不確実性を加味した方式として、最近民間において提案・浸透されてきているリアル・オプション意思決定法（第4章）を取り上げる。このリアル・オプシ

ヨンの意思決定方式は、国土交通行政に応用する場合には、交通関係プロジェクトなどの投資判断の分析にとどまらず、例えば経済規制の実施に際し対象市場を分析する意思決定モデルとして使用すること、環境規制の実施時期に関する分析に用いるなど、対象として幅広い応用範囲を有している。

1-4 リスク・マネジメント手法の体系 地震災害のケース（リスク・コミュニケーションとリスク・ファイナンス）

一般的にリスクマネジメントの体系には、企業レベルから地方公共団体などの公的主体までを視野に入れて各種のものが提案されている⁶⁶。それらに概ね共通するリスク・マネジメントの骨格として、リスクの発見・認識、リスクの防止・軽減（リスク・コントロール）、監視・事後報告（フィードバック）とされることが多い。

ここでは、こうしたリスク・マネジメントの骨格に即し、政府レベルにおいて従来から防災対策の観点から比較的整備が進んでいる地震災害に関する対策及びまだ検討が十分になされていないと思われる対策について、リスクの発見・認識、リスクの防止・軽減の部分を中心に以下、整理を試みた。

地震リスクの事前コントロール（被害軽減・被害回避）及び事後的コントロール（応急措置と災害復旧など）については、既に周知のように、地震防災計画策定や各種の救助援助をはじめ多くの努力が従来より重ねられてきており、現在でも改良が行われている。

他方、最近の新たな状況や注目される点として、以下の点が挙げられる。

地震リスク（被害）の発見・評価段階において、唯一予知が可能とされている東海地震について、中央防災会議において想定震源域の約20年ぶりの見直しと、それに伴い関係対策を行う対象地域（強化地域）の改訂が行われていること。

7同じく、発見・評価段階において、我が国の海溝型地震・活断層帯の地震その他の地震について、兵庫県南部地震（阪神・淡路大震災）後に設置された地震調査研究本部を中心に政府・関係学会の総力を挙げて、確率的手法を用いた地震発生の長期的な評価を行い、我が国における地震リスクに関する地図（地震予測地図）の作成が計画されていること。

その一方で、被害（金銭的な負担）に関する事前マネジメントについては、地震保険の改良などあるものの、資本市場の利用という金融イノベーションを用いた新たな手法の模索が民間企業において始まっているにもかかわらず、目立った検討がないこと。

⁶⁶ 例えば、オーストラリアとニュージーランドの規格としてRisk Management within the Corporate Structure(AS/NZS4360-1995)、カナダの規格としてRisk Management Guideline for Decision-Makers(CAN/CSA-Q850-97)、我が国のJIS規格「リスクマネジメントシステム構築のための指針」(JIS Q2001:2001)など。

第2章において、上記及びの努力に関し、自然災害に関する不確実性を伴った情報が国民に伝達される場合に注目される、双方向コミュニケーション型行政について述べる。

第3章において、上記について、国家レベルにおいて、地震リスク・ファイナンスの可能性について述べる。

地震リスク(被害)対策をリスク・マネジメントの観点から整理した例

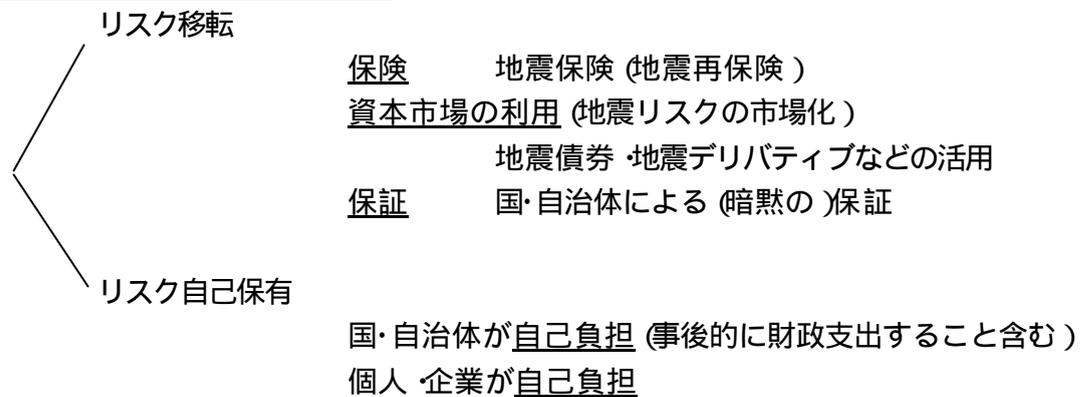
地震リスク(被害)の発見・評価

気象庁他の観測・研究・分析
 発生可能性に関する長期評価(長期発生確率評価)
 東海地震強化地域の指定・予知情報の発出
 強振動評価・地盤評価・構造物評価
 地震予測地図の作成

地震リスク(被害)の事前コントロール(被害軽減・被害回避)

地震防災計画(住民避難等)の作成・実施
 建物の耐震性強化
 東海地震に関する警戒宣言発令/地震防災応急計画の実施
 災害予報・警報・警告の発出
 避難の指示

地震リスク(被害)ファイナンス(金銭的負担に関する事前マネジメント)



地震リスク(被害)の事後的コントロール

応急措置(救助等)・応急対策(激甚災害への)の実施
 火災などの2次災害の防止
 災害復旧
 復興財政金融措置

様々な不確実性を明示的に考慮して意思決定する手法として、最近、エネルギー関連市場や医薬品開発市場などを中心に盛んに研究されているのが、リアル・オプション意思決定法と呼ばれる手法である。本報告書（第4章）においては、国土交通行政への応用を念頭に、必要となる概念の整理、注意点、限界等についての基礎的な研究・分析を行う。

(1) リアル・オプション意思決定法について

大規模投資・就職の決断など不確実性を有する決断は、慎重に。

リアル・オプション理論は、不可逆性を有する行動（容易にやり返しができないような決断、行為、コミットメント。大規模投資、就職、結婚など）について、不確実な状況において、いかなる意思決定を行ったら良いのか、に関する分析を行うものである。就職の例がわかりやすいと思われるので、以下短く紹介する。（厳密な定義等は、第4章を参照。）

職業選択は、個人にとって重要なものであり、多くの場合、その決定は不可逆性を有している。しかも、選んだ職種、自分自身の技能、向き不向きなど、将来に関して非常に多くの不確実性を有している。・・・リアル・オプションは、一つひとつ段階を追って決定を進めていくことを提案する。（段階的オプション、筆者注。）・・・大学一年生のときから医学部にしか進めなくなるような、専門的な授業ばかりに出席するのではなく、一般的な科目も受講して柔軟性のある技能を身につけたり、自分自身の志向についての理解を深めたりするように努力するべきである。そのような幅広い情報を蓄積するうちに、医学部に進む代わりに、異なる将来のキャリア---例えば科学技術者になった場合---についてデータ収集できれば、・・・しかるべき方向に、職業の決定を微調整してゆけるはずである。（学習オプション、筆者注。）・・・その投資からの収益率が費用に比べて十分に大きくない限り、つまり柔軟性のオプションを失ってしまうことを正当化できるほどの報酬が得られない限り、あまり専門的な方向に最終的かつ後で撤回できない決定を行ってはならない⁸。

(2) 空港の整備事業などに実質的には既に適用されてきている。

空港の建設等に関する意思決定は、巨額投資を伴い、相当の時間を費やして建設されるプロジェクトに関する決断であるため、簡単には撤回、修正しにくいという不可逆性を有する。よって、上記の就職の例と同様に、リアル・オプション理論の考え方からは、十分検討を行うべきこととなる。事実、例えば、関西国際空港の建設については、空港の全体計画全ての一括完成を目指して建設工事を進めるとの内容であった初期構想が、「諸般の情勢にも十分配慮しつつ、段階的に建設を進めること」と変更された⁹。これは、リアル・オプション理論のうち、就職の例にも現れた、いわゆる段階

⁸ 「日常生活における不可逆性と不確実性」金融工学のマネジメント ダイアモンド社(2001), pp94-95

⁹ 「関西国際空港の建設計画案について」(昭和55年11月 運輸省航空局)

的オプションの考え方に従って、差し当たり必要不可欠な滑走路1本を先行的に建設し、その後の状況を見て、2本目以降の事業に着手するという形で、事業を段階的に進めたこととなる。

また、空港等の社会資本整備にあたっては、先行的に、調査費等の形にて、前提となる気候、海象、地質その他の自然条件等についてボーリング調査等の調査を行うことが多い。これは、不確実な状況下で、将来の本格的な投資の前に、コストを払ってでも十分な情報を集めて学習し、本格的な投資を微修正することがその内容となっていると考えられる。具体的にリサーチして、状況を学習し、やり方を練り直すことであり、リアル・オプション理論のうち、就職の例でも一部触れた、学習オプションといわれるものに他ならない。

これらの例からもわかるように、リアル・オプション理論は、その基本的な考え方自体は、新しいものではなく、従来から意思決定主体が、将来等について不確実性があり予測が難しい状況の下、不可逆な決定を行う場合に、無意識のうちに行ってきたものであると思われる。

(3) 最近の事情変化 金融工学やパーソナル・コンピューターの発達

ただ、最近、株式のオプションの価格について、その考案者がノーベル経済学賞（1997年）を受賞して有名になったブラック-ショールズ（BS）の公式が注目され、金融工学の理論とその応用が幅広く議論されるようになってきていることや、コンピューターが大変身近な存在となり、投資の効果に関して数値シミュレーションが大変容易に行えるようになったことは、注目すべき変化である。その結果、プロジェクトへの投資などに関する意思決定について、（株式への投資のオプションのアナロジーから）実物資産等への投資機会・権利を「オプション」と構成し、その価値の評価にBS公式等の新たな知見・技術を適用する点について、各方面の関心を呼び、最近熱心に研究されている。

しかし、リアル・オプションとの呼び名を付すにせよ、その本質は意思決定方式と考えると、BS公式やシミュレーションは、意思決定を行うためのいわばツールに過ぎないこととなる。いかなるツールを使用しようと、不確実性の下、不可逆性のある意思決定を行う場合には、リアル・オプションが構成し得えて、どのように意思決定すれば適切かの問題は、構成されたリアル・オプションをどのように行使すれば適切かに関する問題と考えられるからである。

(4) 行政の投資判断や規制政策の分析等国土交通行政に関しては、多くの適用範囲を有する。

このように、最近大変注目されているリアル・オプション意思決定法については、上記の空港建設プロジェクトのような行政における投資判断に大変有効であるにとどまらず、より広く、経済規制の影響の分析や、環境規制の実施時期の分析など、およそ不可逆性を有し、様々な不確実性の要因について慎重な考慮を払う必要のあるさまざまな意思決定に、広く適用範囲を有するものである。この意味で、行政にける意思決定を、不確実性を明示的に考慮して行う手法へと導くものであり、不確実性を考慮した国土交通行政の新たな運営方式にとって、大変重要な意味を持つと考える。

第2章

不確実性を考慮した双方向コミュニケーション 型の国土交通行政に向けて

第2章 不確実性を考慮した双方向コミュニケーション型の国土交通行政に向けて

2-1 リスク・コミュニケーションについて

地震情報など不確実性を含んだ事象に関する情報の伝達過程に関する研究は、最近、「リスク・コミュニケーション」として進められてきている。リスク・コミュニケーションを取り扱っている社会心理学等の人文科学分野において、リスクとは、伝統的には、「被害の重大性と被害の生起確率の積」とされてきた。これは、リスクを確率密度分布の標準偏差（ボラティリティー）と捉える金融分野の定義に対して、損失の期待値として把握していることを示す。この点で本報告書の他の部分で金融分野の定義に則して使用している「リスク」（確率密度分布の標準偏差）＝「ボラティリティー」とは、厳密には異なるものであることに留意されたい。しかしながら、いずれのリスクも、確率的な事象を取り扱っている点は同じである。こうした意味で不確実な事象（いつ起きるか確実でない地震など）に関する情報をいかに伝達又は共有するかに関する研究が、リスク・コミュニケーションに関する研究である。なお、F. Knight の定義に戻ると、リスク・コミュニケーションにおける「リスク」も、何らかの損害という事象を想定し、かつ、何らかの確率を想定して期待値を考えていることから、広義の「不確実性」（生起事象が既知で生起確率が未知又は既知のもの）と同じと考えることも可能であろう。

こうした人文科学系諸分野においては、「リスク・コミュニケーション」を以下のように定義する。

「リスク・コミュニケーション」：個人、機関、集団間での情報や意見のやりとりの相互作用的過程¹

この定義においては、以下のような特徴がある。

一方向から双方向型コミュニケーションへ

情報の送り手と受け手との双方向型の相互作用的過程と捉えていることが第1の特徴である。情報の送り手から受け手へ一方的に送られるのみならず、受けてから送り手へも、例えば意見表明という形で情報が送られる。（双方向型コミュニケーション） 専門家集団たる行政のみが情報を独占したり、専門家のニーズのみから情報が送られるとういうことは、この定義にはあてはまらない、不適当なコミュニケーションとなる。

コミュニケーションにおける「技術的モデル」から「民主的モデル」へ

また、この双方向型コミュニケーションは、「正解」を伝達するという類の作用ではなく、むしろ、リスクに関する十分な情報を関係者に提供し、理解を深めて、可能であれば相互の信頼関係を築いていくことに力点がある。ここでは、必ずしも正しい決定やより良い決定を保証しないという点も重要である。リスクに関する意思決定の主体が、当該分野の専門家のみならず、住民・国民など関係者全てにあることを意味している。少数の優秀な専門家においても、科学技術の劇的な進歩等を目的

¹ National Research Council "Improving risk communication. (1989) p21、吉川 (1999) p19

前にして、判断に窮する又は時として誤る可能性があり、影響を受ける関係者全てで判断していこうという姿勢の転換が見られる。これが、リスク・コミュニケーションにおける、「正確な情報」を重視する「技術的モデル」から、信頼に基づく情報伝達と説得を重視する「民主的モデル」への転換といわれているものである。

交換される情報は、リスクそのものに関する情報に限定していないことも特徴である。背景状況や通常から相互の認識について幅広く情報を共有し、信頼関係を構築することなども、含まれる。

2-2 不確実性下での意思決定主体の行動モデルについて

不確実性下において、個人はどのように意思決定するのか。

(1) モデルの多様性

不確実性やリスクの下での主体の行動に関しては、心理学や経済・金融論等様々な分野において多くの研究が蓄積されてきた。しかし、現在までのところ、確立した手法が存在しないのが実状とされる²。最初にここでは、まず、交通心理学的アプローチを簡単に紹介し、その後、経済学的アプローチを述べる。

(2) (交通)心理学的アプローチ

交通心理学においては、個人の選考・傾向性を示す概念として、「リスク・テイキング」という概念が用いられ、危険を承知で行動するというドライバーの傾向性が事故を誘発する、と仮定されている。こうした「リスク・テイキング」の効用として、ストレスの発散、自立の表現、覚醒レベル上昇の手段、移動効率、大人の権威への反発、仲間からの賞賛等が上げられる。また、激しい感覚やスリルを得ること自体を目的とする「センセーション・シーキング」といわれる性向も注目されている。

また、交通心理学の分野では、リスクを認知する主観的、心的な過程が重視され、「ハザード知覚」、「リスク知覚」といわれる概念が用いられる。リスクを認識者の主観的により捉えようとするアプローチといえる。

(3) 経済学的アプローチ

(3) - 1 リスクに関する考え方について

伝統的なリスクに関する認知への経済学的な研究は、ゲーム理論で有名なフォン・ノイマン＝モルゲンシュテルンによる第2次対戦中の研究により（ゲーム理論の基礎として）考案された期待効用理論が原型とされる。現在でも、根強く、不確実性下の意思決定に関する規範的な分析にとって望ましい理論体系とされている。これに対する経験的な批判に基づき提起された理論の代表にプロスペクト理論と言われるものがある。以下、期待効用論から紹介する。

(3) - 2 期待効用理論

不確実性下での個人の行動モデリングにおいて中心的な役割を果たしてきた。こうした期待効用理論の代表的な考え方を、直感的に理解しやすいと思われる部分について

² この部分は、小林・横松(2000)に拠った。

概要を記すと、以下のようになる。

(期待効用論の要素)

意思決定の要素として、主体の選択する「行為」、主体によっては制御できない「状態」が与えられ、これらの選択した行為と外生的に与えられる状態によりもたらされる「結果」が定義される。

「結果」に対して、(一定の関数などを用いて)「効用」が与えられ、「結果」の生起確率により「効用」を重みづけし、これを「期待効用」とする。

この下で、一定の公理(推移性など)を設定し、これを、行為の合理性の基準とする。

この合理的な基準に従った個人の選択は、最も大きい「期待効用」をもたらす行為を選択することにより実現されるというものである。

こうした期待効用理論のアプローチには、さらに大きく、以下の2つがある。

(3) - 2 - 1 ラムゼイ、フォン・ノイマン=モルゲンシュテルンのアプローチ

確率を所与として扱い、効用関数のみをモデル化して、導出する点に特徴がある。意思決定主体の行動が以下の5つの公理を満たす場合には、確実な事態と不確実な事態の確率的な組み合わせについて、一連の選択を示すことにより、その主体の効用関数を導出できる。その主体は、その関数で示された効用の(確率に従って求められる)期待値を最大にするように行動する³。

(フォン・ノイマン=モルゲンシュテルンによる消費者行動についての5つの公理)

完全な順序付けの公理

2つのことについて選択可能であるときには、いずれかを選好するか、双方について無差別であるか、のいずれかである。また、選択可能な3つ以上の選択についての評価は、推移的である。すなわち、意思決定主体の選好が、 $A > B$ かつ $B > C$ ならば、その主体は、 $A > C$ のように選好する。

連続性の公理

意思決定主体の選好が、 $A > B$ かつ $B > C$ であると仮定したとき、連続性の公理の下では、次のような確率 P ($0 < P < 1$) が必ず存在する。すなわち、ア) 確実な結果 B と、イ) 確率 P で A という結果が生じ、確率 $1-P$ で C という結果が生じる場合があり、意思決定主体が、ア) とイ) について無差別となる確率 P が必ず存在する。

独立性の公理

意思決定主体にとって、 A と B とが無差別であり、 C を任意の事態とする。このとき、ア) A を確率 P で、 C を確率 $1-P$ で生じる場合と、イ) B を確率 P で、 C を確率 $1-P$ で与える場合とは、この主体にとって無差別である。

不均等確率の公理

意思決定主体の選好が、 $A > B$ であると仮定する。ア) とイ) の2つの選択肢が、それぞれ A と B を一定の確率で与える時には、ア) とイ) のうち、イ) を選んだときに A が与えられる確率がア) を選んだときに A が与えられる確率より大きいとき、また、そのときに限って、主体は選択肢イ) を選好する。

³この部分は、ハンダ・ツツ・クオット(小宮・兼光訳)(1973)、p54-62 に拠った。

複合の公理

一定の期待値を与える2つの選択肢、ア)とイ)があり、イ)を選んだ場合については、さらに、イ) - 1とイ) - 2という2つの選択肢が与えられているとする。ここで、ア)とイ)いずれを選んでも、同じ期待値が得られる(イ)を選んだ場合には、イ) - 1とイ) - 2のいずれを選んでも同じ期待値が得られる)ように決められていると仮定する。複合の公理によれば、このような場合には、意思決定主体にとって、ア)とイ)は無差別である。

(3) - 2 - 2 サベージのアプローチ

フォン・ノイマン=モルゲンシュテルンのアプローチでは、所与とされた確率について、個人の合理的な選択行動の観察を通じて各々の主体の主観的確率と効用関数が同時に導出されるとする。ここで、主観的確率とは、相対的頻度、すなわち、試行回数に対する生起回数の割合の極限值のことを指す。

(3) - 2 - 3 リスク回避型(リスク・アバース)モデルについて

意思決定に関する主体の行動をモデル化する場合に、リスクに関して回避的であると想定することが通常であり、その内容を、上記の期待効用論の考え方をを用いて以下確認する。

(添付図 参照)

(3) - 3 プロスペクト理論について

このような伝統的な期待効用論に対しては、不確実性下の意思決定行動のモデル化に大きな役割を果たしてきたことを認めつつ、その経験的妥当性に多くの批判が寄せられてきた。期待効用論への批判に基づき提起された、プロスペクト理論⁴を以下紹介する。

(3) - 3 - 1 従来の期待効用論への批判について

プロスペクト理論からは、リスクのある状況における選択行動に関し、期待効用理論の内容と相容れない幾つかの顕著な特色が見られるとの批判がなされている。具体的には、以下のとおり。

期待効用理論と相容れない経験上の顕著な特色：

確実に得られるものに比べて、得られることが単なる蓋然性にとどまる場合には、人々は、結果を過少評価する。(確実性効果：the certainty effect)

これにより、利得が得られることが確実な場合には、人々は、リスク回避型(risk averse)になり、損失をこうむることが確実な場合には、リスク志向型(risk seeking)となる。

考慮すべき状況に共通な要素がある場合には、人々は、概して、その共通要素を無視する。(分離効果：the isolation effect)

⁴ Tversky・Kahneman(1979), p263-291; Tversky・Kahneman(1981) p453-458; 小林・横松(2000);山本(2001), P21-26

添付図 リスク回避型モデルの概要

現在の代表的なリスク回避型行動のモデルの概要を以下に示す。
 所得等の増加関数（限界効用（ u' ）が正）であること、限界効用の変化率（ u'' ）
 が負（＝限界効用逡減＝凹型関数）であること、が必須の要素となっている。
 リスキーな状況（ z ）の存在により、効用の期待値（期待効用）を等しくす
 るために、余分な所得等（リスクプレミアム＝ p （ > 0 ））が必要となる。

1. 用語の定義

$$R_A = -\frac{u''(y)}{u'(y)} (> 0),$$

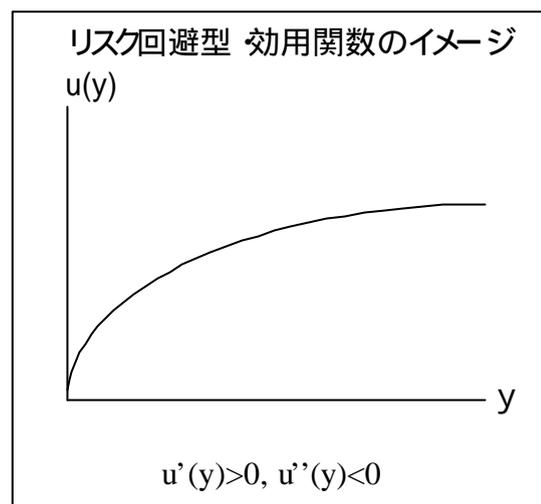
$$R_R = yR_A = -y\frac{u''(y)}{u'(y)} (> 0)$$

R_A : 絶対的リスク回避 (Absolute-Risk-Aversion)

R_R : 相対的リスク回避 (Relative-Risk-Aversion)

$u(y)$: 効用関数 (Utility-Function)

y : 所得又は消費 (Income-or-Consumption)



2. リスクプレミアム（ p ）の内容を以下のように定義する。(Arrow-Pratt のリスクプレミアム)

$$E[u(y+z+p)] = E[u(y)]$$

$$p \approx -\frac{u''(y)}{u'(y)} \frac{s^2}{2} = R_A \frac{s^2}{2} (> 0)$$

p : リスクプレミアム (Risk-Premium)

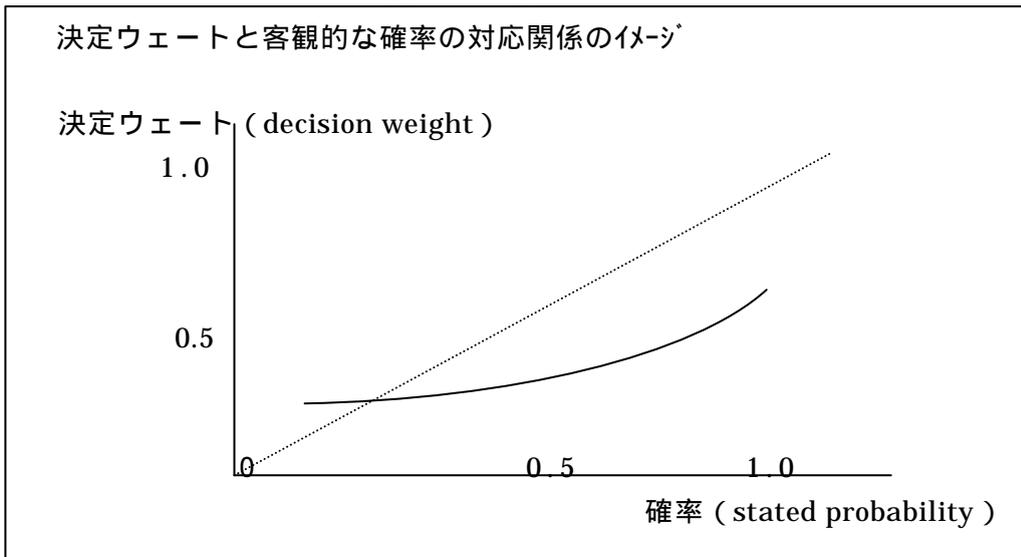
z : 平均ゼロのリスクな状況を表す確率変数 (mean-zero-risky-prospect)

s^2 = 確率変数 z の分散値 $\text{var}[z]$

$E[x]$: 確率変数 x の期待値

(出典 : Economist's Mathematical Manual (3rd. Ed.) Chapter28 p169,
 Knut Syds?ter, Arne Str?m, Peter Breck, Springer 1999)

プロスペクト理論による決定ウェートのイメージ



* : 確率の低い部分では、客観的な確率以上のウェートを与え、それ以外の確率の高い部分においては、客観的な確率未満のウェートを与えることになる。(Kahneman・Tversky(1979), p283)

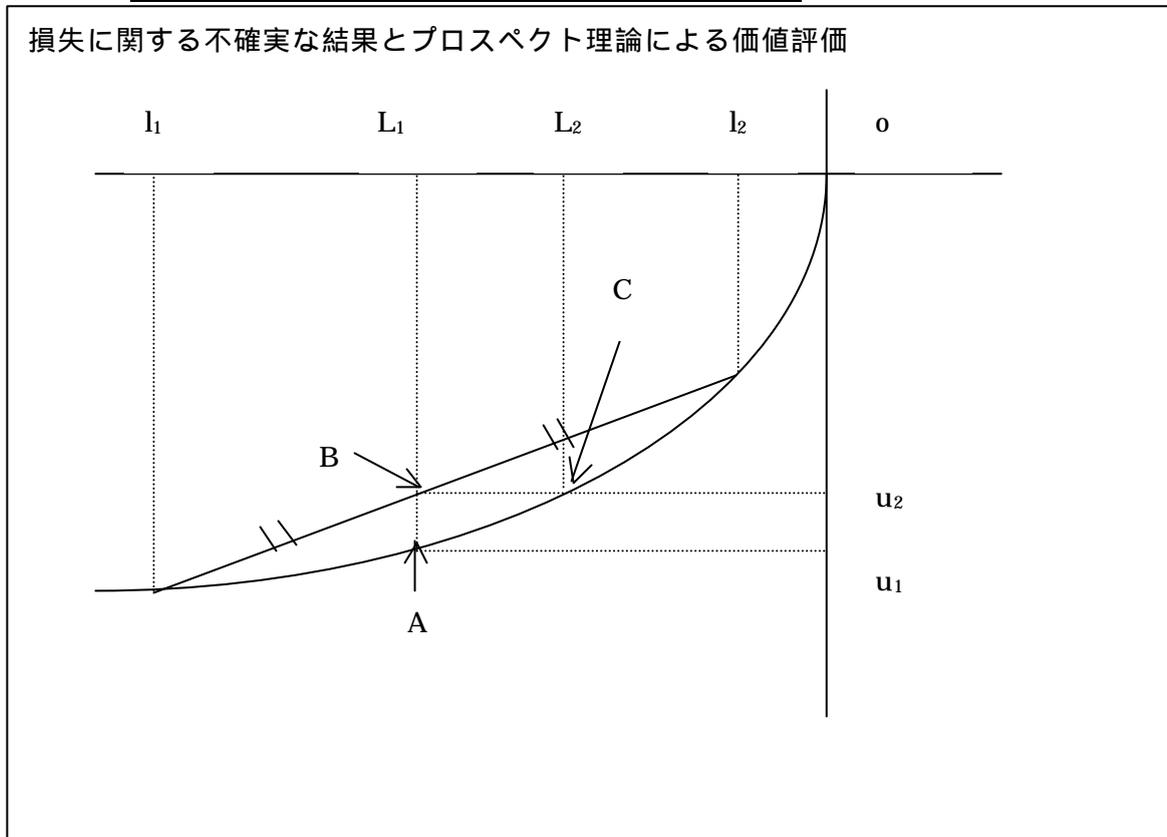
結局、不確実性の下での選択については、プロスペクト理論によれば、選択の対象は、期待効用論のように利得ではなく、利得と損失の形(frame)で提示される見通し(prospect)であり、期待効用論のような利得に関する効用関数の代わりに、評価関数と決定ウェートの2つの意味付けからなり、期待効用論の凹型(Jの字を裏返して寝かせた型)の効用関数ではなく、S字型の評価が対応し、決定ウェートは逆S字型の関数である⁵。

⁵ Tversky・Kahneman(1992)によれば、数万円程度の利得と損失に関しては、中程度から高い確率においては利得に対してリスク回避、損失に対してリスク選好になり、低い確率においては利得に対してリスク選好、損失に対してリスク回避という4つのパターンになることを示している。(P306) これに対し損失が巨大な地震等に関する考察は、次節参照。

2-3 不確実性下の意思決定モデルとしてプロスペクト理論を考えた場合、地震防災対策はよりよい可能性を追求して（リスクをとって）より多くを行うことが必要となる可能性がある。

地震災害等は、失われる人命や構造物の損害のように利得に対する損失の形で示されることが多い。このことは、プロスペクト理論における、同一の内容でも異なった形で提示されることにより異なる選択になるというフレーミング効果があると仮定すると、以下に示すように、国民の意思決定に関するモデルから判断して、従前の防災対策では不十分で、より多くの対策を行う必要があるとの結論を意味する可能性がある⁶。

- (1) 1. 損失について不確実な選択肢と確実な選択肢が示されプロスペクト理論によるモデルにしたがって国民が意思決定する場合には、より良い結果が含まれる可能性のある不確実な選択肢が選ばれこととなると思われる。



地震損害等に関する不確実な状況に関するプロスペクト理論による価値評価を、以上の図に従って考える。損失に関する評価であるため、プロスペクト理論の価値関数においては、上図のように横軸が0より左側＝損失の領域で、かつ、縦軸の評価も負の領域となる。

⁶ ここでは、プロスペクト理論の価値関数とこれに対応する期待効用論の効用関数の対比に焦点をあてて、議論を進める。プロスペクト理論における決定ウェートの議論は、興味深いものの、期待効用論に同様の働きをするものがないこと、地震等の巨大被害に関する実証研究が少ないことから、今後の課題とした。

ここで、確実に損失 L_1 が予想されるとの状況にある場合（点 A）、その状況（プロスペクト）に関する価値評価は、凸型の評価関数にしたがい、 u_1 の評価になる。これに対して、0.5 の確率（プロスペクト理論におけるウェイトのことを、判りやすさのため、ここでは仮に確率と標記する。以下も同じ。）で l_1 の損失、0.5 の確率で l_2 の損失になり、客観的期待値としては、さきの場合と同じく損失 L_1 になる場合（点 B、 $0.5 * l_1 + 0.5 * l_2 = L_1$ ）を考える。この不確実な状況（プロスペクト）は、価値関数から導かれる価値の期待値のみからすると、価値評価は、 u_2 のレベルになる（ $0.5 * v(l_1) + 0.5 * v(l_2) = u_2$ ）。

このことが意味するのは、こうした不確実な状況は、より悪い状況が実現する可能性とより良い可能性が実現する可能性があるものの、国民がリスク志向型の価値評価をする前提から、期待値としては同じ損失レベル（ L_1 ）でありながらより良い結果となる可能性がある不確実な状況の方を確実に状況より高く評価する（点 B の価値評価： u_2 > 点 A の価値評価： u_1 ）ことを意味する。

(1) 2. 不確実性の提供を契機に追加的な防災対策を国民が望む可能性がある。

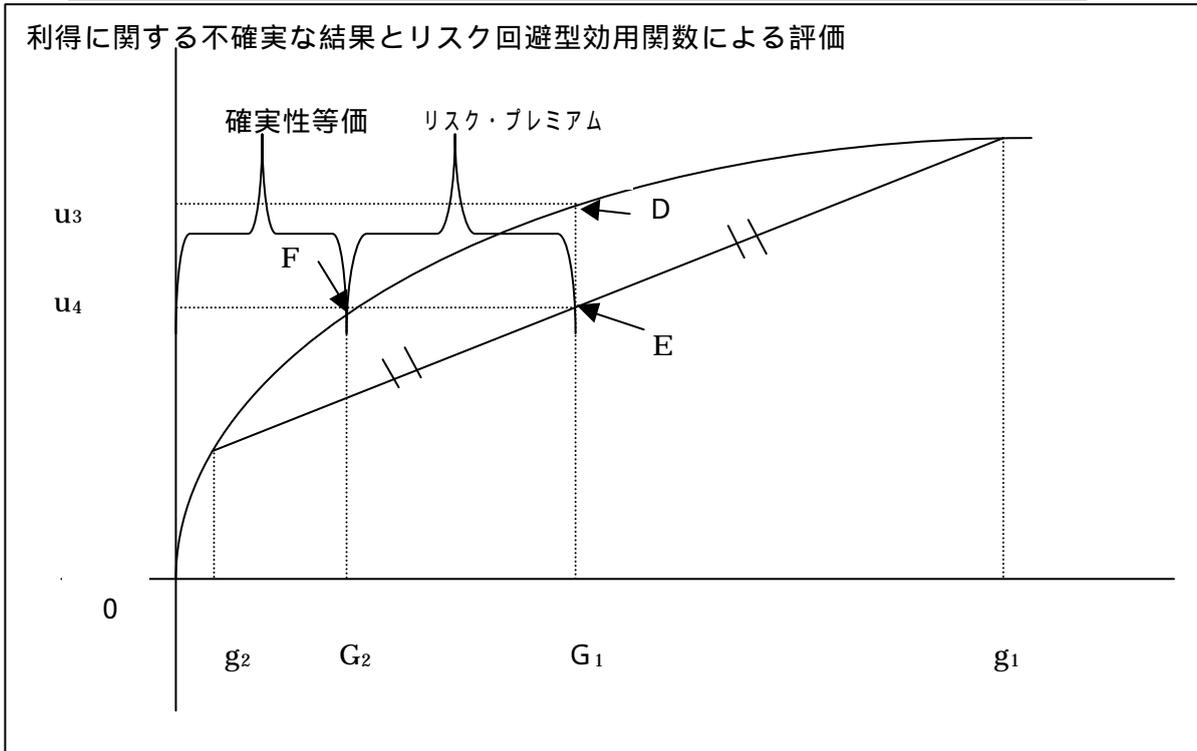
さらに、損失の確実な状況から、損失の不確実な状況に関する情報の提示（点 A から点 B）によって、より効用レベルの高い事象が起こる可能性に気づいた国民は、意思決定の基である評価関数にしたがって点 B と同一の効用レベル u_2 を与えてくれる点 C を選択したい（実現したい）と考えることとなる。これが意味するのは、国民が、不確実情報の提供を契機に、元の損失レベル（ L_1 ）をさらに小さくする追加的な防災対策を行い、より少ない損失レベル（ L_2 ）が実現されることを望むこととなると思われる。

地震防災対策について責任を負う国土交通省からみると、不確実な状況（点 B）においてより悪い結果（ l_1 ）が発生することを避け国民の価値評価レベルを u_2 のレベルに確実に保とうとすると、防災対策の（追加的な）実施により損失レベルを L_1 から L_2 とし防災対策実施の目標も点 B から点 C に変更する必要がある。逆にいうと、 $|L_2 - L_1|$ 分だけ損失を減らす防災対策の（追加的な）実施が求められることとなる。

結局、国民の不確実性に関する意思決定モデルの一つであるプロスペクト理論によれば、損失レベルが確定している選択肢 A（点 A）と、損失レベルの客観的な期待値がさきの損失レベルと同一となる不確実な内容を含む選択肢 B（点 B）が存在する場合、リスク志向型の評価関数にしたがって国民が意思決定するため、損失がより少なくなる可能性がある不確実な内容を含む選択肢 B（点 B）を選択することとなる。この場合、防災の責任の一旦を担う国土交通省は、より悪い結果が生じる可能性を回避しつつ国民の価値評価をより高いレベルに確実に維持しようとする、防災対策の（追加的な）実施により、損失レベルの確実な点 C を実現することが必要となると考えられる。

ちなみに、点 C においてもさらに不確実性を提示することにより、より損失を減らす努力が求められ、点 C より右上に位置する評価関数曲線上の新たな点が望まれることとなる。財政的に可能な限り、これを繰り返し、結局、均衡点としては、評価関数の接線の傾きが、上図に示した直線の傾き（これは、効果の不確実性の程度につながる防災技術の水準を示すと考えられる。）に等しい点に落ち着くと思われる。

(2) 利得について不確実な選択肢と確実な選択肢が示されリスク回避型効用関数により国民が意思決定する場合には、確実な選択肢が選択されることになると思われる。



仮に地震防災対策など防災対策を除いた、利得のみを効果とする公共投資（以下、利得目的の公共投資）を考え、対策の効果を、損失ではなく、経済成長などの利得の形で提示する場合を考える（例えば、投資によりGDP 1%成長など）。

利得に関する場合は、従来の期待効用論におけるリスク回避型効用関数で検討しても、プロスペクト理論による価値評価で検討することも可能であり、検討結果についても（決定ウェイトが客観的な確率を上回る部分を除けば）同一の結果になると思われる。ここでは、対比を際立たせる意味から、より単純な構造をしている従来のリスク回避型効用関数における場合をとりあげる。

確実に利得 G_1 が得られる選択肢 D（点 D）においては、伝統的なリスク回避型効用関数にしたがい、 u_3 の効用レベルとなる。ここで、不確実な選択肢 E（点 E）として、確率 0.5 でより高い利得 g_1 が得られ、確率 0.5 でより低い利得 g_2 が得られ、客観的な利得の期待値はさきと同じ ($0.5 * g_1 + 0.5 * g_2 = G_1$) という不確実な選択肢 E（点 E）を考える。効用関数がリスク回避型であるため、不確実な選択肢 E の効用レベル u_4 は、確実な選択肢 D の効用レベル u_3 より低いレベルになっている。（当然、確実な選択肢 D と不確実な選択肢 E の間では、必ず確実な選択肢 D が選択される。）

ここで、確実な選択肢 D を仮に提示することが（技術上その他何らかの理由で）出来ず、不確実な内容を含む選択肢 E を提示せざるを得ない場合を考える。このときは、人々は効用のレベルを保ったままであれば、利得を一部あきらめてもより確実な選択肢を求めようとする。したがって、同一の効用レベル (u_4) を維持できる条件のもとでは、一定の利得 ($G_1 - G_2$) をあきらめても、確実な選択肢である選択肢 F を選択することとなる。この場合、利得 G_2 は、良く知られているように、不確実な選択肢

E（点E）に対する確実性等価と呼ばれている。また、一定の利得（ G_1 、 G_2 ）は、リスク・プレミアムと呼ばれている。これは、例えば以下のように考えることができる。確実な選択肢である点Fの利得 G_2 から不確実な状況における期待利得レベル G_1 に対応する選択肢を選ばせるためには、結局、（ G_1 、 G_2 ）に対応する余計な利得（プレミアム）を保証し、点Eではなく、点Dを選択させる必要があることになる。

国民の不確実性に関する伝統的な意思決定モデルである期待効用論におけるリスク回避型効用関数を用いれば、利得レベルが確定している選択肢D（点D）と、利得レベルの客観的な期待値がさきの利得レベルと同一となる不確実な内容を含む選択肢E（点E）が存在する場合、リスク回避型の効用関数にしたがって国民が意思決定するため、常に確実な選択肢Dが選択される。仮に、利得レベル G_1 において不確実な選択肢Eしか提示できない場合には、利得がより大きくなる可能性がある選択肢E（点E）よりも、同じ効用レベルを保証する確実な選択肢F（点F）が存在するため、より低い利得のレベルであっても確実な選択肢Fを選択することとなる。この場合、利得目的の公共投資を国民のために行う国土交通省は、不確実な選択肢Eが含むより悪い結果（ g_2 の利得レベル）が生じる可能性を回避しつつ、不確実な選択肢しか提示できない利得レベル G_1 より劣るがより悪い利得レベル（ g_2 ）よりは高い利得（ G_2 ）を保証でき、かつ、選択肢Eと同じ効用レベル（ u_4 ）を実現する確実な選択肢Fが選択可能であればそれを実施することになると思われる。

結局、国土交通省は、国民がリスク中立的な選択をする場合に提示できる期待利得レベル（ G_1 ）に対応する選択肢Eに対して、国民がリスク回避型の選択をする場合には、より利得レベルは少ない（ G_2 ）が確実な（不確実性のない）選択肢Fを、利得目的の公共投資として提示すればよいことになると考えられる。よって、（ G_1 、 G_2 ）に対応する分の利得をもたらす公共投資は、確実性を得ることと引き換えに、追求する必要がないことになる可能性がある。

ここでも、確実な点にさらに不確実性をあらたに提示して行くことにより点Fよりさらに左下の効用曲線上の点が望まれ、均衡点としては、効用曲線の接線の傾きが、不確実性の程度を示す点Eを通過する直線の傾きに等しくなる点に行き着くものと思われる。

(3) 政策についての選択肢を提示する仕方如何によって、不確実性下の意思決定が変わる（結論が変わる）可能性がある。

以上の帰結としては、プロスペクト理論のフレーミング効果が存在する場合、インフラ整備のための公共投資については、地震防災対策などの防災目的で行い、効果を損害の程度として提示する（よって国民はリスク志向型の意思決定になる）か、経済成長などの利得目的で行われる公共投資として提示するか（よって国民はリスク回避型の意思決定になるか）の違いにより、国民の選択・評価の結果が異なる可能性がある。すなわち、地震防災対策として行われる場合には、よりよい可能性を求めて選択肢Aより選択肢Bを、同一の評価レベルであるため不確実な選択肢Bより確実な選択肢Cを、という形で、結局より多くの防災対策投資が求められる（選択肢C）ことになる可能性がある（このケース）。他方、利得目的で行われる場合には、最も望ましいのが確実で効用水準の高い選択肢Dだが、それが低成長時代を迎えて難しい場合には、不確実性のある選択肢Eよりは同一の効用水準で確実な選択肢Fが選択される

ことになり、投資水準としては、より少ないレベル(選択肢F)を求める(のケース) こととなる可能性がある。

(4) 自然災害の過小評価などの国民の認知特性との不整合について 事前評価と事後評価の違いか。

以上のような、防災関連事案のような、損失にまつわる場合には、国民はより多くを求める可能性があることに対しては、別に述べるように、地震のような自然災害のリスクには、国民は反応しにくい、と逆の指摘もある(ポリアンナ仮説など)。国民や人間の認知という高度な内容に関する分析・判断の難しさを示す例と思われる。この点には、以下の可能性を指摘するととどめる。

一見矛盾するように思える国民の認知に関するこの事情は、次のように考えることが可能ではないだろうか。すなわち、事前に地震発生確率など、不確実な情報を提示された場合には、現実には起こると思いたくないなど様々な理由により、その確率をより小さく評価したり、自ら回避行動を積極的にはとらない傾向が見られるものの、実際の地震災害発生後に、実はより多くの人命・財産を守ることができ、損失をより小さくし得たと国民が認知した場合には、国土交通省の防災対策は不十分であった、と国民が観ずる可能性があることを示している。

2-4 国民側の地震などに関するリスク認知について

(1) リスク認知に関する心理学的な蓄積について(総論)

心理学の分野において、人々がどのように特定のリスクを感じているかを、分析した研究の結果が明らかにされている。その代表例⁷によれば、米国人を対象に、航空機・自動車事故、喫煙、放射性廃棄物等の様々な領域の81のリスクについて、その認知構造を分析した。その結果は、恐ろしさ、未知であること、規模の大きさの3つの要素が抽出されている。これらの要素により、人々がリスクをどのように認知するかが分類整理できることを示していると考えられる。最初の恐ろしさ(dreadful)には、コントロールができない、結果が致命的である、自発的でない、将来世代に危険が及ぶなどの評価が含まれている。の未知であること(unknown)には、観察することが出来ない、結果が現れるのに時間がかかる、新しいリスクであるなどの評価が含まれている。

さらに、日本人と米国人の認知について比較した代表的な研究⁸によれば、日米において同程度に恐ろしいとされているものでも、原子炉の事故・核戦争などは日本人は既知と考え、米国人は未知と考えること、家電製品や自転車などについては日本人は未知のものと考え、米国人は既知と考えることが示されている。また、遺伝子研究と化学防腐剤は、日本人にとっては恐ろしいものと認知されているが、米国人にはそれほど恐ろしいものとは認知されていないなどの違いが指摘されている⁹。

⁷ Slovic(1987)

⁸ Kleinhesselink・Rosa(1991)

⁹ 岡本(1992) pp-49-56 に要約が掲載されている。

(2) 地震についての認知等に関する過去の社会心理学などからの研究

(2) 1. 社会心理学などからの地震に関する従来の研究

地震災害に関しては、東海地震の予知とその対策に関する大規模地震対策特別措置法が昭和 53 年（1978 年）に制定されたことに伴い、その前後において、多くの社会心理学的な研究が学会及び行政双方においてなされてきた。手法は主に大規模なアンケート調査により、予知情報などへの反応について、対策地域内とそれ以外の地域の比較など、様々なパターンについて、多くの情報が集められてきている。東京大学新聞研究所（現在の社会情報研究所）による昭和 53 年から 54 年にかけて行われた地震予知と社会的反応に関する調査と、旧国土庁による昭和 53 年度から 58 年度にかけて行われた地震予知情報への対応調査が代表例である¹⁰。

(2) - 2. 不確実性を伴う地震発生等に関する情報提供の新しい状況と国民側の認知に関する関心の高まり

(2) - 2 - 1. 確率的地震動予測地図の作成・公表・活用

兵庫県南部地震後に発足した政府の地震調査研究推進本部（本部長：文部科学大臣、本部員：官房副長官及び国土交通事務次官など関係 5 府省事務次官）においては、当面推進すべき地震調査研究の主な課題の一つとして、現在平成 16 年度末を目途に、強い地震動の発生の確率的な予測情報を含む全国を概観した（確率論的）地震動予測地図の作成作業を行っている。

（確率論的）地震動予測地図：

確率的な地震動予測は、地震の発生自体の確率的な予測と強振動予測を有機的に統合し、対象地域に影響を与える可能性がある現時点で考えられる全ての主要な地震について考慮するもの。これを踏まえた（確率論的な）地震動予測地図は、全国を概観し、ある一定の期間内に、ある地点が強い地震に見舞われる可能性を確率を用いて予測した情報を示したものが一例とされる。一般には、期間、地震動レベル（例：震度、最大加速度）及び確率のうち、2 つを固定し、残りの 1 つの分布を地図上に等値線図として示したものである¹¹。

地震調査研究推進本部においては、一定の成果が得られ次第、随時、こうした地震発生自体に関する長期的な確率評価や一定の地域に限定した試作版の確率論的地震動予測地図を公表しつつある¹²。これまでに公表されている海溝における地盤を震源とするいわゆる海溝型の地震について、試算として公表されている地震発生自体に関する確率を用いた長期評価の結果を紹介する。（最近予測された主な（海溝型）地震発生確率の概要）

¹⁰ 廣井 脩他 東京大学新聞研究所編(1979)「続地震予知と社会的反応」、旧国土庁「地震予知情報影響調査報告書」(1978)、「地震予知情報への対応調査報告書」(1984) など。

¹¹ 地震調査研究推進本部(1999)いわゆる「総合基本施策」

¹² 主に山梨県の地域に限定した確率論的地震動予測地図の試作版では、今後 30 年以内に震度 6 弱以上の揺れに見舞われる確率を示した（確率の高さに応じて地域を色分けした）地図や今後 30 年以内に 3% 以上の確率で地震に見舞われる地域を示した（震度の強さに応じて地域を色分けした）地図などを公表した。（2002 年 5 月）

東海地震に関する旧国土庁住民アンケート調査比較表

調査名	地震予知情報への対応調査	調査名	(地震予知情報への対応調査)	調査名	(地震予知情報への対応調査)	調査名	(地震予知情報への対応調査)	調査名	(地震予知情報への対応調査)
時期	昭和58年度	時期	昭和56年度	時期	昭和55年度	時期	昭和54年度	時期	昭和53年度
調査主体	国土庁震災対策課	調査主体	国土庁震災対策課	調査主体	国土庁震災対策課	調査主体	国土庁震災対策課	調査主体	国土庁震災対策課
調査概要		調査概要		調査概要		調査概要		調査概要	
調査地域	平塚・飯田・甲府・清水の4市	調査地域	平塚・飯田・甲府・清水の4市	調査地域	平塚・甲府・飯田・新城・中津川の5市	調査地域	清水市	調査地域	清水市・袋井市
調査方法	アンケート調査	調査方法	アンケート調査	調査方法	アンケート調査	調査方法	アンケート調査	調査方法	アンケート調査
標本数	1100 清水市 500 他3市 各200	標本数	1300 清水市 550 他3市 各250	標本数	1250 各250	標本数	1250	標本数	1650 清水 990 袋井 600
回収数	960	回収数	1173	回収数	1115	回収数	1137	回収数	1482
調査時期	昭和58年11月21日 ～ 12月1日	調査時期	昭和56年12月11日 ～ 12月20日	調査時期	昭和55年9月25日 ～ 10月6日	調査時期	昭和55年2月22日 ～ 3月4日	調査時期	昭和54年2月21日 ～ 2月26日
調査対象	20歳から69歳の一般男女	調査対象	20歳から69歳の成人男女	調査対象	20歳から69歳の成人男女	調査対象	20歳から69歳の成人男女	調査対象	20歳から69歳の成人男女
調査目的	昭和56年度の調査より2年経過した時点での実態の変化を把握するため実施。	調査目的	予想される東海地震の震央の遠近による対応行動差、時系列変化の把握 国、地方公共団体の行った防災上の諸施策の浸透状況や効果を、 時系列比較を中心としながら震央に近い清水市と震央から遠い3市の比較も同時並行して行えるよう設計し実施したもの。	調査目的	予想される東海地震の震央から遠い強化地域内住民の地震予知情報への対応行動及び心理要因との関連把握	調査目的	地震防災対策強化地域指定後における地震予知情報接受時における対応行動の基礎データ収集	調査目的	地震予知情報接受時における対応行動の基礎データ収集

これらの作業と同時に、このような確率を用いる意味で不確実性を伴う地震発生に関する情報をいかに社会において活用していくか、また、その前提としていかに不確実性を含む事項に関する情報をそもそもいかに伝達・公表していくかについても、検討が進められているところである。

(2) 2-2. 地震発生に関する確率を用いた情報の伝達に関する注意点

地震の発生全般に関して、確率的な内容を含む情報を伝達する場合に、成果を社会に活かす部会が提案する注意点は以下のようなものである¹³。

確率評価の解説及び補足的な情報も同時に提示する必要がある。

数値情報が安心情報にならないようにすべきであり、社会一般が理解でき、解釈の予知を広げないために解説的な情報や補足的な情報を、同時に提示すべき。

確率評価のランク分け（高い、やや高い、その他）をする必要がある。

地震に関する発生確率は、特に活断層についての場合に低く出る傾向にあり、我が国の活断層全体での位置付けにより、発生する確率が高い、やや高い、その他というランク付けもあわせて提示すべきである。

確率評価の対象期間は、30年間を基本とすべき（今後30年間に発生する確率××%など）

人々が、確率評価を身近なものとして受け取れるように、人生設計の基本とされるであろう期間30年間を対象に、地震の発生確率を提示することを基本とし、建物の耐用年数とされる50年間や、地震対策の長期性を考慮してさらに100～300年などの長期の期間における確率評価もあわせて提示することが必要である。

これらの注意点については、既に、地震調査研究推進本部の地震調査委員会が発表する長期的な評価において、取り入れられ、具体的に情報提示に活かされている。

また、活断層帯における地震発生に関する長期評価については、以下のような改善点・注意点が提案されている。

活断層がなにか、その調査の現状はどのようなものかについて、説明する。

確率に関する補足的な情報（過去の地震の直前での発生確率など）も提示すべき。活断層のランク分けを、将来、他の要素（地震の規模、強震動）も加味して行うべき。

国において確率評価・規模・強振動予測などを総合して被害予想を行い、自治体などの防災機関で活用できるような努力（ガイドラインの作成など）をすべき。

これらの提案についても、取り入れられ、兵庫県南部地震（阪神・淡路大震災）の発生直前における地震の発生確率を、事後的に現在の手法にて計算した数値が公表されるなどしている。

¹³ 地震調査研究推進本部 政策委員会 成果を社会に活かす部会(2001)「政策委員会成果を社会に活かす部会報告 - 地震調査研究における長期評価を社会に活かしていくために -」

最近予測された主な(海溝型)地震発生確率の概要

(対象地震)	予測規模	予測方法	モデル	予測(公表)時点	30年以内の発生確率
東海地震	M 8級	更新過程	対数正規分布	1999年1月	36.7%
東南海地震	M8.1 ~ 8.5	時間予測モデル	BPT分布	2001年1月	50%
南海地震	M8.4 ~ 8.5	時間予測モデル	BPT分布	2001年1月	40%
宮城県沖地震	M7.5前後	更新過程	対数正規分布	2000年11月	90%より大

文部科学省

地震調査研究推進本部地震調査委員会 のホームページ等から作成

(発生確率等の厳密な前提条件等については、地震調査研究本部地震調査委員会長期評価部会による「長期的な地震発生確率の評価手法について」(平成13年6月1日)を参照のこと。)

(注)

更新過程： 地震の発生間隔 T_1, T_2, \dots が互いに独立で、同一の分布をする確率過程 (stochastic process) を指す。Renewal Process
同一とする分布には、BPT (Brownian Passage Time) 分布や対数正規分布などが用いられる。

ポワソン過程： 更新過程のうち、特に発生間隔が同一の指数分布に従う場合 (時間の経過にかかわらず、発生確率が一定となる) を指す。

時間予測モデル： 地震直前の応力(ひずみ)レベルが一定である、すなわち、断層の破壊強度が時間によらず一定とするモデル。
定性的には、大きな地震の後では次の地震までの間隔が長く、小さな地震の後では、この間隔が短いこととなる。
最新の地震時のずれの量と長期的な断層のずれ速度から、次の地震までの期待される経過時間を求めることができる。
モデルに用いる確率分布には、BPT分布などがある。
最新地震時におけるずれの量と次の活動時期との関係が求められていることを前提。
活動間隔のデータのみを用いる方法(更新過程など)に比べ、活動間隔のばらつきを示すパラメータは、一般により小さい値を選択するべきとされる。

過去の活断層帯における地震の、発生直前の発生確率（公表試算値）

地震名 実際の規模 (マグニチュード)	活動した活断層	地震発生直前におけるその後30年間の発生確率	地震発生直前の集積確率	断層の平均活動間隔 (千年)
1995年 兵庫県南部地震 (M7.3)	野島断層 (兵庫県)	0.4% ~ 8%	2% ~ 80%	約 1.8 ~ 約 3.0
1858年 飛越地震 (M7.0 ~ M7.1)	跡津川断層 (岐阜県・富山県)	ほぼ 0% ~ 10%	ほぼ 0% ~ 90% より大	約 1.9 ~ 約 3.3
1847年 善光寺地震 (M7.4)	長野盆地西縁断層帯 (長野県)	ほぼ 0% ~ 20%	ほぼ 0% ~ 90% より大	約 0.8 ~ 約 2.5

(注)

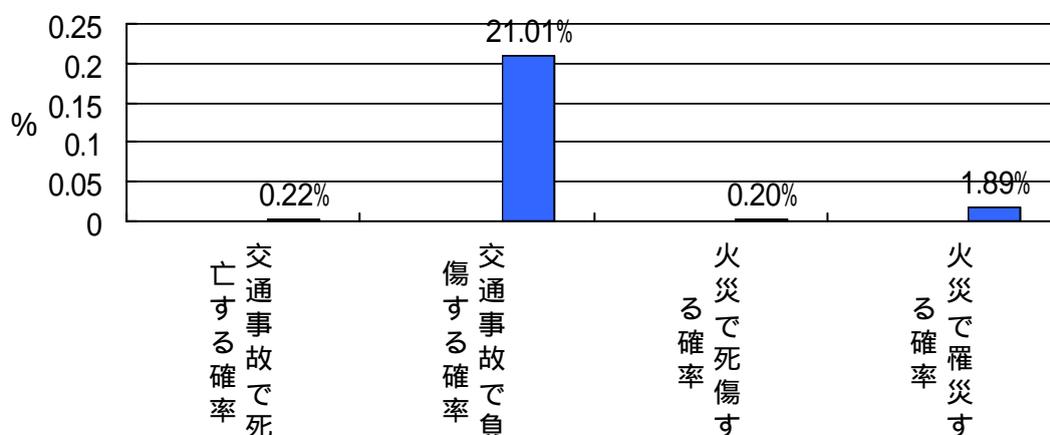
地震調査研究推進本部 「長期的な地震発生確率の評価手法について」(平成13年6月8日) p28

1995年兵庫県南部地震及び1858年飛越地震については、「長期的な地震発生確率の評価手法について」(地震調査研究推進本部地震調査委員会 2001)による暫定値

成果を社会に活かす部会においては、引き続き海溝型の地震についての長期評価に関する検討等が進められており、その成果が期待されている。

以下には、地震発生確率と比べ得る確率として公表されている日常の危険に関する確率を参考に掲載する。

(参考) 今後30年間に遭遇する確率



出典：地震調査研究推進本部地震調査研究委員会長期評価部会「長期的な地震発生確率の評価手法について」(平成13年6月)

(3) リスク・コミュニケーション研究からの地震災害に関する国民の認知に対する(一般的な)示唆

地震等の災害のリスク・コミュニケーションについては、災害前の、いわば予防行動の啓蒙、災害発生直前の予知情報・災害警報情報、発生後の流言やデマの研究、避難警報など多くの研究が行われてきている。ここでは、地震などの不確実性を伴う災害に関する情報を伝達する場合の注意点を、リスク・コミュニケーションの立場から整理した内容を紹介する¹⁴。その際、上記のような事前における地震災害に関する確率的な予測情報が公表されつつあることを踏まえ、主に を中心とし必要に応じて やも含めた局面における地震リスクの認知特性を扱うこととする。

(3) 1. 地震等の災害予測に、人々が反応しないことが指摘されてきている。(ポリアンナ仮説)

まず、従来より、地震等災害のリスク・コミュニケーションについては、実際の災害予測や避難警報に対して、人々が反応しないことが問題として指摘されている。

一例として、神奈川県平塚市において、東海地震に関する内閣総理大臣による警戒宣言が発令された際に放送を予定していた市長のメッセージ内容が、警戒宣言が発令されていないにもかかわらず誤って放送された場合に、平塚の住民のうち、警戒宣言が発令されたとの報道内容を人づてなどの何らかの方法により知っていたのは、約20%、そして、本当に発令されたと思ったのは、わずかに約4%であった¹⁵。

過去の研究によれば、そもそも、災害・事故など望ましくない事象は、望ましい事象より生起確率が過小評価されるという研究結果が示されている。(ポリアンナ仮説)人々がリスクを回避しようとする防衛的になるため認知がゆがめられることが指摘されている。他方、まれな出来事に関しては、望ましい事象よりも危険性が過大に評価されると推測される。航空機事故は、現実には自動車事故より生起確率が低い、一般の人々は航空機事故のリスクの方が自動車事故のリスクよりも大きいと見なす傾向が、指摘されている¹⁶。

(3) 2. 地震等のリスクに対する国民の意思決定におけるフレーミング効果と防災対策へ国民がより大きな期待をする可能性について

不確実性下の意思決定に関するプロスペクト理論から、リスクに対する同じ事象であっても表現の仕方が変わると、受け取られ方が異なること(フレーミング効果)が指摘されている¹⁷。この考え方によれば、例えば同一の地震リスクであっても、死亡率で表現される場合と生存率で表現される場合とでは、発生確率の期待値が同じであっても人々の選択が異なってくることになる。ある地震の発生に関する情報について、地震発生の不確実性を死亡率で表現して伝達する場合には、プロスペクト理論により、マイナスに関する意思決定との思考構造になることが充分考えられて、その場合には、人々のリスクへの態度がリスク選考型になる。

¹⁴ この部分は、吉川(1999)に拠った。

¹⁵ 岡本浩一 リスク心理学入門 サイエンス社(1992年) p109

¹⁶ Slovic(1987), pp280-285

¹⁷ Tversky・Kahneman(1981), pp453-458

これが意味するのは、仮にこの地震に対する防災対策が、確実に一定の成果を収める対策 1 と、不確実な内容であるが、より大きい（死亡率をより低減する）効果を有する可能性がある防災対策 2 が選べる場合には、防災対策 2 を選ぶことを人々が望むということになる。対策 1 の確実な効果と、対策 2 の不確実な効果の期待値が同一の場合には、（対策 1 の確実な効果に比べてより悪い結果が出る可能性があっても、対策 1 の確実な改善効果より良い結果が得られる可能性が伝達され、それを国民がプロスペクト理論によりフレーミング効果を伴って認知する場合には、対策 1 ではなく対策 2 の選択と実施を行政に対し求める可能性が十分に考えられるのである。

(2 - 3(1) - 1における議論参照。)

(3) 3.地震等の自然災害は原子力事故等の科学技術関連災害に比べ生起確率が低く見積もられる傾向がある。(自然災害の正常化バイアス)

災害のリスク・コミュニケーションにおいては、地震、火山噴火等の自然災害についての人々の認知は、科学技術の事故（technical disaster）についての場合に比べ、自然災害の生起確率を実際の生起確率より低く見積もっていると指摘されている。このことにより、自然災害に対しては、科学技術の事故の場合に比べ、避難行動が行われにくく、地震においても警報が無視される可能性が高いことが指摘されている。（災害情報とパニックをすぐに結びつけるのは、マスコミのパニック盲信が原因との指摘すらある¹⁸。）これが、自然災害における正常化バイアス（normalcy bias）といわれるものである。逆に、科学技術関連の原子力事故などでは、過剰な避難行動が見られることも報告されている。

(3) 4.長期的な準備としての事前のリスク・コミュニケーションは、重要だが効果的に行うことが難しい。

将来起こるであろう災害に対して、長期的な準備として災害教育の重要性が指摘され、確率的な地震動予測地図の作成とその成果を社会に活かす努力が積み重ねられていることは既に述べた。他方、緊急災害が起こる前の（pre-emergency）リスク・コミュニケーションの効果については、あまり確認されていないことが指摘されている¹⁹。啓蒙活動をあらかじめ行っていたことによって、いざ緊急事態に直面したときの逃避行動が増大するというような強い関係が見られないという。事前のリスク・コミュニケーション効果を簡単に上げることが難しいことを示している。他方、地震災害については通常時から人々の行動に良い影響を与えることにより大きな効果が期待できる。例えば、木造建物の耐震化補強などにより死者を劇的に減らす可能性などがある。したがって、事前の啓蒙効果に関するこうした困難な研究結果を念頭におきつつも、災害軽減のための工夫を重ねていく必要があり、逆に、効果があがった場合には、人命などの大きな利益が社会全体に得られることになると思われる。

啓蒙活動については、メディアの役割が重要である。しかし、メディアには、良く知られている報道のバイアス（センセーショナルなことを中心に伝える、科学の不確

¹⁸ 岡本（1992）p110

¹⁹ 吉川(1999)p96、Sorensen・Dombrowsky(1988)

実性や権威の信頼低下にかかわるようなことを中心に伝える)があり、この点を認識しつつ、災害リスク伝達に関するメディアの重要な役割につき、メディア、受け手たる国民、発信者である行政の関係者間で、建設的な向上のための対話がなされることが、社会全体のために、必要不可欠と考える。(2 - 5 参照。)

(3) 5.直前の地震災害警報に関し蓄積された研究の概要

(1)まず、警報に必要な3要素として、特定できる情報(どこで、どのくらいの確率で起こるのか)、緊急性の程度、予想される結果、が実施に避難した家族へのアンケートをもとにまとめられている。

(2)次に、効果的な警報の内容として、以下の10の要素が挙げられている。

情報源が信頼できるものであること。科学者、気象庁などの行政機関からのものであること。

警告メッセージの内容と調子(tone)が一致していること。地震が起こりそうだが、心配することは全くない、などの類は、これにあたらぬ例といえる。

伝えられていることが正確であること。時間的にふさわしく、正確、かつ完全なデータを警報が含んでいることが必要である。全ての事実が伝えられていないと人々が疑うようになれば、警告メッセージの指示にしたがわない事態が生じうる。

メッセージが明瞭であること。簡単で明瞭な言葉遣いが求められる。

何が起きているか、人々が何をすべきか、について確実に伝えること。曖昧な状況であっても、メッセージは確信をもって伝えられるべき。

メッセージが十分な(sufficient)情報を含んでいること。不十分な情報は、混乱や不安を引き起こす。昭和53年1月の伊豆大島近海地震直後に静岡県庁の災害対策本部からの余震情報が社会的混乱を起したことが指摘されているが、これは、余震が予想されるのが、あと半月ほどの間(正しい)なのか、すぐに(誤り)なのかについて、後に述べる組織側の意思決定問題により、伝えられず、社会的な混乱につながったとされている。

人々が何をすべきか、そのためにどのくらいの時間的な余裕があるのかについて、明確な指示をしていること。この指示が明確でないと間違った方向への非難などにより被害が大きくなる可能性がある。

メッセージが繰り返されること。繰り返しにより人々が正しい情報を受ける確率が高くなり、情報の確認をすることができる。

災害の場所を明確にすること。どこに災害の影響が及ぶのかを正しく伝えなければ、人々は自らに関係する情報か否か知ることが難しい。

1つ以上のチャンネルを使って情報を伝達すること。これによりより多くの人に、しかも複数回にわたり、情報に接する機会が増えることになる。

(3)警報より時間的にさらに前の段階において、災害の際に伝えられる情報に関して、以下の4つの要素が周知されていることが必要と指摘されている。

災害用に特別の警報システムがあると知らされていること。サイレンや防災無線など、特別のシステムがあると周知されていなければ、警報が伝えられていると理解できない。

異なる警報を識別するための情報が伝えられていること。具体的にどのようなサイレンはどのような音がするのかを知らされていることにより、住民は警報であると理解することが可能となる。

実際の警報と、それ以外の使用（テスト使用など）とが区別されていることを知らされていること。テスト使用が周知されていないと、テストを誤報と誤る可能性があり、システムの信頼が低くなってしまう。

警報を聞いたときに、どう行動すべきかを知らされていること。屋内にはいって、ラジオをつけるなど、警報に接した後、どのように行動すべきかが明らかである必要がある。

(3) 6. イタリアでの地震警報発令事例に関する概要

誤報等でなく、実際に地震警戒宣言が発せられた例が報告されている²⁰。1985年1月にイタリア北部トスカナ州において、日本の気象庁地震火山部にあたる国立地球物理研究所の観測に基づき、マグニチュード4程度の地震が観測され、これが、1920年にこの地域で大被害をもたらしたフィヴィツィアノ地震（マグニチュード6.6）の前震に類似していると結論づけられた。報告によれば、震源、規模等の複数の要素において20年の大きな地震の前震に類似しており、同程度以上の地震発生の可能性を否定できないとされた模様であり、その内容が防災省に伝えられ、防災省から当該地域に警報が発令されたというものである。しかし、実際には地震はなく、2日後に警報は解除された。特に大きな混乱もなく、自動車道の混雑が伝えられた程度であったと報告されている。

我が国で従来行われてきた東海地震の予知や、最近の地震に関する調査とは、大変異なるアプローチといわざるを得ないものであるが、以下において、本件警報の時系列的な経過をまとめた資料と事後に旧国土庁が実施した現地住民に対してなされたアンケート調査の結果の概要を参考のため紹介する。

²⁰ 谷川(1985) p27-35

1985年1月イタリアでの地震警報発令事例

(地震警報発令前後から解除まで)

時系列	地震警報関連事態
1985年 1月23日 11時10分頃	M4.2の地震発生 (トスカナ州ルッカ県バルガ市付近)
17時頃	<u>伊・国立地球物理研究所 (我が国の気象庁地震火山部に相当): 防災省へ1920年の震災時と類似の状況である旨連絡</u>
19時10分頃	防災省: 大災害対策委員会召集、対策協議
19時50分過ぎ	防災省: <u>警報発令を決定、関係機関への連絡開始</u> (トスカナ州ガルファニャーニャ地方を対象) 緊急対策委員会 (対策本部) 召集
20時10分過ぎ	国営放送: <u>定時ニュース中で警報発令を速報</u>
・ ・ ・	警報の概要: 過去の地震の前震 に類似の地震を観測」 この間、関係機関のとった措置: 市町村を通じた住民への周知 食料の供給 病院ベッドの確保 その他
1月25日 11時10分	防災省: <u>警報解除</u>

(警報のポイント)

- 約65年前の地震の前震に類似した地震が観測された。
(予知ではなく、過去の地震パターン再現可能性に基づく予測)
- 警戒を呼びかける。
(特別な計画に基づくものではなく、一般的な警戒の呼びかけ)

(警報の対象地域に関するデータ)

警報対象地域	イタリア北西部トスカナ州ルッカ県及びモデルナ県の10市町村 (=トスカナ州ガルファニャーニャ地方)
対象地域人口	約5万人

(参考)

- 今回の事例で潜在的に不利であった点
本地域では、耐震性に乏しい石造りの建築がなされており、地震への恐怖心が強いこと
警報が、科学的「予測」と言うべきもので、心構えや取るべき行動が明確でなかったこと
- 今回の事例で潜在的に有利であった点
人口の少ない山間の村落であったこと
オープンスペースも十分あり比較的簡単に避難できたこと
- 実際に混乱として指摘された点
地域を出ようとした自動車で道路が一時的に混乱したこと

1985年1月イタリアでの警報発令 :住民アンケート概要

サンプル数 200 (対象地域の全人口の約0.4%)

期間 1985年4月20日から2週間 (警報後約3ヶ月後)

対象 警報発令対象地域住民

調査主体 国土庁(旧)防災局震災対策課

地震警報の入手先	<ul style="list-style-type: none"> 国営放送 70 % 近所の人つて 10 % 家族、親戚、知人からの電話 5 %
警報への感じ方	<ul style="list-style-type: none"> 非常に不安になった 53 % 不安になった 32 % 多少不安になった 10 %
不安の内容	<ul style="list-style-type: none"> 大規模地震が必ず発生すると思った 10 % 起きる可能性が高いと思った 50 %
対応行動 (複数回答可)	<ul style="list-style-type: none"> 家族、親戚、知人等と集まる、又は電話で連絡をとり相談した 85 % 非常持ち出し品、食糧、貴重品等を準備した 40 % テレビ、ラジオ等を通じて情報を得ようとした 35 % 火の不始末等をした 30 %
避難したか	<ul style="list-style-type: none"> 避難した 75 % 自分の家にとどまった 25 %
避難先	<ul style="list-style-type: none"> 自宅そばで車のなか 21 % 近くの広場で車のなか 13 % 警報対象地域外の親戚、知人宅等 16 %
避難の手段	<ul style="list-style-type: none"> 自動車 80 % その他 20 %
避難しなかった理由	<ul style="list-style-type: none"> 大規模地震が起きるとは限らないと 20 % 自宅の耐震性に自信があった 40 % その他 40 % (年寄り、病人等がいた、雨が激しかった等)
警報が発令されていた間の情報源	<ul style="list-style-type: none"> テレビ・ラジオ 85 % 市町村の広報 9 %
防災省が警報を発令したことは	<ul style="list-style-type: none"> 大変良かった 42 % まあ良かった 37 % その他
近い将来再び警報が発令された場合	<ul style="list-style-type: none"> 再び避難する 65 % その他
警報を積極的に出すべきか	<ul style="list-style-type: none"> 積極的に出すべき 40 % もっと慎重に出すべき 60 %

2-5 リスク・コミュニケーションの当事者たる国土交通省についての組織心理学的な知見

(1) 組織心理学的な知見に関する研究の必要性は、今後、さらに高まると予想される。

現代の高度に専門化した社会においては、地震等の災害に関するリスク・コミュニケーションにおいては、当該地震リスクについての情報は、それを多く有している専門家の集団である国土交通省から、国民に送られることが多い。また、どのような情報を伝えるのか、伝え方をどのようにするのかということも、当該国土交通省が組織として決定する。したがって、個人が単独で判断して情報を伝える場合とは異なり、集団としてどのように意思決定するのかについて分析・理解しておくことが重要である。この点、従来のリスク研究では、組織の属性（どのような組織文化であるのか、判断者の地位は組織内でどのようなものか）を考慮していないことが問題と指摘されており、これから、さらに多くの研究がなされるべき領域であると考えられる。組織によるリスク・コミュニケーションについての決定が、コミュニケーションの過程にゆがみを与えて、結果として、過剰なリスクを社会に与えてしまう危険性もあり得る。

最近においても、9月11日の米国同時多発テロに関し、米国政府は数ヶ月前から関連情報を入手していたが、CIA と FBI の間の連携不足などが指摘され、大統領府が早期に適切な情報を国民に開示しなかったのではないかと、などの興味深い点が問題とされている。ここでも、仮に、情報が実際適切に開示されておらず、かつ、その原因が組織における意思決定にあったとした場合には、原因究明のため組織心理学的な観点からの研究が大変重要である。

国際的な組織心理学的比較研究も進められている。代表的な研究によれば、我が国の職場における組織文化は、海外と比較すると、リスクを嫌い、職場内での衝突を嫌い、個人でなく組織を志向する傾向があり、例えば、英米の2倍程度その傾向が強いことが示されている²¹。また、日本を含む19ヶ国の航空パイロットへの対象調査(1998年)によれば、一定の指数にあらわされる不確実性を回避する志向の強さは、日本人パイロットが第1位との報告もある²²。

こうした知見にもかかわらず、日本のみならず、米国の Enron 事件等、世界において組織が意思決定を誤る可能性が残っており、なぜ、正しい意思決定に至らないのかについて、組織心理学的な観点からの検討は、専門家からも十分でないとしており、今後解決すべき課題は多い。

(2) 過去指摘された組織的な意思決定における問題点

組織心理学の観点から、組織による意思決定の問題点について、幾つかの指摘がなされているが、ここでは、行政組織としての問題点に絞って、以下、説明する。

(2) 1. 慎重な行政組織ゆえに誤る危険性 予測が外れる懸念から情報伝達を控えるバイアスが存在する可能性がある。

従来から、行政は、法律に従って授權されている権限の執行にあたって、誤りを嫌

²¹ The Culture in the Workplace Questionnaire™ (Dr. Geert Hofstede 他)
www.itapintl.com/ITAPCWQuestionnaire.htm

²² 山本(2001), p23

い、慎重の上にも慎重に確認して、情報を伝達、事業執行等を行うことを少なくとも心がけてきたと思われる。最近においては、さらに、行政の事前予測が、事後的に大きく外れたことが明らかになり、こうした誤りに対して、メディア・国民から大変な批判が存在している。このため、行政組織として、誤った場合の責任問題を回避する意味からも、不確実性を含む情報については、伝達を控え、より十分な検証・確認が出来るまで待とうというバイアスがかかっていると思われる。明示的に不確実性を含む情報については、行政自らがこうした伝達を控える従来からの慣性があることを自覚して、意思決定することが重要であると考えられる。

プロスペクト理論によれば、局面や伝達の仕方により国民はリスク志向型の意味決定をする可能性があり、不確実でも、より良い可能性を求めて思い切った情報伝達・対策の実施を行政に求めることも十分考えられる。ここにおいては、できるだけ幅広い情報伝達を行政には求め、それをもとに自らの行動には自ら責任を負うという、自己責任原則とも非常に良くなじむ。逆に、行政機関において、不確実性に慎重に対応する慣性が存在すれば、国民の真の要請にこたえる点からは、大変不利に働くものと思われる。

1978年（昭和53年）の伊豆大島近海地震後において、自治体の災害対策本部長から「余震情報についての連絡」として県民に余震情報が伝えられ、住民に混乱が生じたことが知られている。この件に関する過去の研究からは、当初、消防庁から自治体に伝えられた情報では「あと半月ほどの間に」となっていたにもかかわらず、予測が誤っていたときの責任をどうとるかといった議論が本部内で優勢になり、時間的な内容が伝えられなかったため、結果として住民の間に「数時間以内に大地震が起こる」との内容になって伝わったことが、混乱の原因と指摘されている。

なお、行政が情報の公表を控える理由には、予測を誤る恐れのほか、地震等の災害関係の情報に対し人々がパニックを起すのではと懸念すること、災害情報により地域経済に悪影響を与えるのではないかと懸念することなども指摘されている。ただ、人々のパニックのおそれに対しては、逆に、地震において警報が無視される可能性が大きいとの指摘があることは既に述べたとおり。

(2) 2. 信頼される組織としてのブランドを国民との間で構築・維持していく努力が必要と思われる。

地震等の自然災害に関する情報は、非常に高度な内容を含む上に、不確実性があり、国民からは大変に理解が難しいものと思われる。このため、国土交通省としても、専門家集団の認知や意思決定と非専門家集団の認知・判断とは十分異なる可能性あることなどを踏まえて、国民に、信頼される高度な専門家組織としてのブランドイメージ²³を、通常から構築し、維持する努力が重要と思われる。一旦信頼を失うと、自然災害の直前に伝えた危険情報が国民に十分受け入れてもらえない事態も想定される。昨今、行政不信が高まる可能性が見られ、また、一度喪失した信頼を回復するのが大変困難であることを考えると、この点、真剣な努力が必要であろう。

²³ 自然災害に関するものではないが、政府によるブランド・イメージ構築の例としては、観光に関し、オーストラリア政府が、国家としてのオーストラリアについてのブランド・イメージ（Brand Australia）を専門家を交えて構築し、関係団体等を用いて海外に積極的に発信することで、訪問する外国人を増やす努力をしていることが報告されている。高桑(2001) pp40-41。

(2) 3.メディアとの関係 互いのバイアスを理解して、相互不信の連鎖を避ける努力が重要

防災関係の情報伝達には、テレビ・ラジオなどの速報媒体を含むメディアの役割の重要性は、従来から指摘されてきた。メディアと行政は、特に近時、対立関係に立つことも多く、相互不信が増幅しているのではないかと懸念される。行政には、先に触れたように、意思決定主体として、慎重であるなどのバイアスがあると思われるが、他方、メディアには、以下のようないわゆるメディア・バイアスがあることが指摘されている²⁴。

メディアのバイアス；

- センセーショナルな出来事を中心に伝える。
- 科学の不確実性にかかわる事態を中心に伝える。
- 権威の信頼の低下にかかわる事態を中心に伝える。

防災対策に、国土交通省をはじめとした行政機関の役割が欠かせないものであるのと同様に、リスクコミュニケーションにおいてメディアの役割が欠かせないものであろう。いたずらに対立するのではなく、相互が互いのバイアスを良く認識した上で、信頼関係を築き、国民に対する最大のパフォーマンスを提供できるよう、共同で努力するべきであると考えます。

²⁴ 吉川(1999)p96、Covello・Slovic von Winterfeld(1988)

第3章

地震リスク・ファイナンス・マネージメントの 可能性

第3章 地震リスク・ファイナンス・マネージメントの可能性

3-1 リスク・ファイナンスについて

(1) リスク・ファイナンスとは?

リスクの事前回避手段として通常考えられているのは、リスクの発生する原因となる事象に対して事前に何らかの措置を講じて、損害の発生自体を回避・軽減しようとすることである。また、リスクの事後的な回避手段として、事態発生後に被害の拡大を防止したり、軽減するための措置が求められることもある。

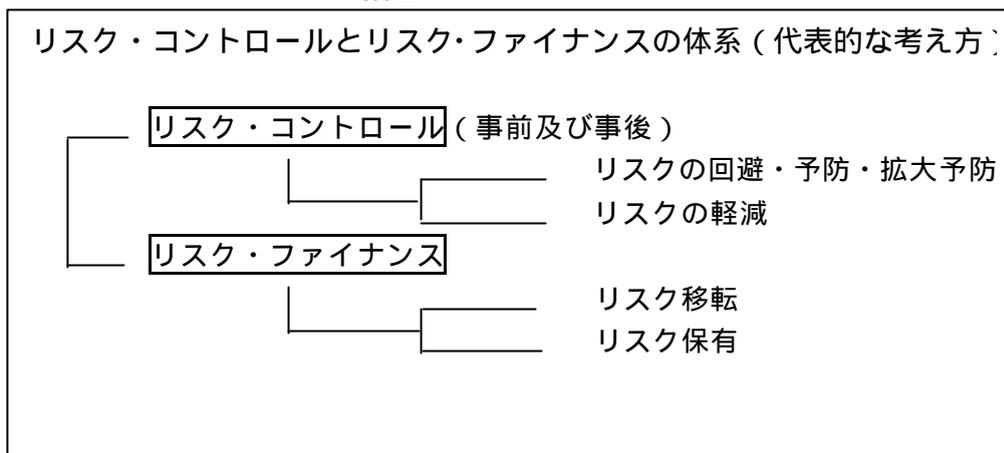
ここでは、こうした伝統的なリスク回避手段に加えて、損害の一定の発生可能性を前提に、損害額への負担を軽減する手段を事前に講じておくリスク・ファイナンスと呼ばれる手法を併せて考える必要があると思われる。地震リスクについては、我が国全体として見ても巨大な損失が生ずるものであり、個人レベルでも居住家屋の喪失など大変甚大であるため、地震防災計画の策定、耐震補強など通常のリスク回避手段に加えて、地震が発生した場合の金銭的な負担軽減のため、あらかじめ地震保険に加入しておくなどの措置を講じておくことが重要である。

(2) リスク・ファイナンスの定義

リスクへの対処方法について、米国のリスク管理学者 G. L. Head が 1976 年に提唱したリスク・コントロールとリスク・ファイナンスを区別する代表的な分類とその定義を以下に紹介する¹。

「リスク・コントロール」(事前及び事後): リスク発生の未然防止・軽減のための措置・事後的拡大予防・軽減措置

「リスク・ファイナンス」: リスクが発生した場合の金銭的負担軽減のため講ずる事前の措置



リスク・コントロールは、さらに、リスクの回避・予防とリスクの軽減に分類されるの

¹

この部分は、石井(2002)pp50-56、山口(1998) pp106-112 などに拠った。

が通例である。

他方、リスク・ファイナンスは、リスク移転とリスク保有に通例分類される。

リスク移転とは、通常の保険、再保険のほか、資本市場を利用したリスクの他者への移転があり、各種デリバティブなどを利用してリスクヘッジする手法がこれに含まれる。また、国・自治体が、地震などの巨大リスク発生の際に結局事後的に損害を補填することが期待される場合など、黙示の保証なども他者へのリスク移転に含めて考えることができると思われる。

リスクの自己保有とは、単に自己負担する場合以外に、保険と自己負担の中間形態が幾つか考案され利用されている。自家保険は、損失に備え、自らにおいて一定の保険料相当を積み立てるなどにより支払に備える擬似的な保険の手法である。キャプティヴ（全体としてはリスク保有するが子会社などにリスクを集めて本体のリスクを軽減する手法）やファイナンシャル・ラインシュアランス（自らのリスクを一旦保険会社に負担してもらい、事後的に清算する手法で、リスクの時間的平準化を図るもの）、さらに通常の保険とファイナンシャル・ラインシュアランスの組合せであるファイナイト（期間を定めてリスクの一部を通常の保険の手法で保険会社に移転し、残りの部分をファイナンシャル・ラインシュアランスの手法で時間的平準化を図る手法）などが活用されている。

(3) 地震に関するリスク・ファイナンスについて

地震に関して、想定し得るリスク・ファイナンス手法に則してこうした考え方を整理すると以下ようになる。

地震リスク・ファイナンスの体系（可能性のある程度の手法も含む。）

(1) リスク移転

保険（居住用財産その他の）地震保険、地震再保険

資本市場の利用（地震リスクの市場化）地震債券、地震デリバティブなどの活用
保証 国・地方公共団体による明示又は暗黙の保証

(2) リスク保有

自己保有（負担）

自家保険

キャプティヴ

ファイナンシャル・ラインシュアランス

ファイナイト

3-2 世界の巨大リスク

(1) 地震以外も含めた世界の巨大リスクについて

地震、台風等の自然災害や戦争、テロなどの人工的な災害は、その損害額の大きさ・

影響の大きさに着目して、巨大リスク（Catastrophe Risk）と総称されることがある。確かに、地震や戦争などは、社会の人口構成を変化させたり、人々の考え方に大きな影響を与えるなど、経済的な損害を超えた大きな影響を社会にもたらす面も重要である。しかしここでは、巨大リスクの社会・文化的な影響については触れずに、最も客観的に計量できる経済的な損害だけに着目し、損害保険からの支払額にしたがって最近における世界の代表的な巨大リスクを挙げると以下ようになる。

巨大損害のもたらす巨額の損失のため、リスク回避型の個人は、保険料を払ってでも実損害による負担を回避し、リスク移転をすることが望まれると考えられる。こうした動機により契約された保険により支払われた保険金の額は、通常、損失自体の大きさをあわすものであると同時に、被害を受けた直接の当事者に対して保険会社から金銭的な支払がなされる意味で、物的損害についてリスクの移転がなされており、リスク移転型のリスク・ファイナンス機能の大きさを示しているとも考えることが可能である。

世界の巨大リスク

事故・災害	発生年月	発生地	損害保険支払額（100万US\$）
ハリケーン・アンドリュー	1992.8	アメリカ合衆国	18,286
ノースリッジ地震	1994.1	アメリカ合衆国	13,529
台風19号	1991.9	日本	6,542
暴風ダリア（90A）	1990.1	ヨーロッパ	5,636
ハリケーン・ヒューゴ	1989.9	米国・プエルトリコ	5,427
暴風87J	1987.1	ヨーロッパ	4,230
暴風ビビアン（90G）	1990.2	ヨーロッパ	3,917
パイパー・アルファ（石油プラットフォーム火災）	1988.7	英国	2,712
兵庫県南部地震（阪神・淡路大震災）	1995.1	日本	2,603
ハリケーン・ジョージ	1998.9	米国・プエルトリコ	2,500
（米国同時多発テロ）*	2001.9	アメリカ合衆国	（40,000）

土方（2001）p22 を基に、作成。

* 米国同時多発テロは、保険請求額の推定。（The Economist February 9th 2002 p71）

これによれば、リスク・ファイナンスの先進国、米国と欧州各国においては、ハリケ

ーンや地震等の巨大リスクによる被害に対して、保険がリスク・ファイナンスの手法として大いに利用され、被害者の金銭的な負担軽減に寄与していることがわかる。他方、我が国についてみると、大変興味深い内容となっている。

保険金支払額でみると我が国の巨大リスクのうち、最大のものは、1991年の台風19号による被害であり、第2位が1995年の兵庫県南部地震（阪神・淡路大震災）である。確かに91年の台風19号は、実際の被害が沖縄から東北まで広い地域にわたり、その内容も、死者40人、負傷者131人、被害を受けた住家（全壊、半壊から一部損害まで含む。）16,541棟にのぼる大きな被害をもたらした。しかし、この程度の実損害は、兵庫県南部地震に比べるべくもない。阪神・淡路地区を中心とした兵庫県南部地震においては、実損害が、死者のみで6,400人を上回り、全半壊した住家のみで24万棟を超えている²。ところが保険金額の大きさ、したがってリスク・ファイナンスの程度で見ると、驚いたことに、兵庫県南部地震は、91年の台風19号の半分以下となっている。地震国といわれる我が国にあって、この事実は、地震リスクに関して、リスク・ファイナンス改善の余地がいかに大きいかをうかがわせるに十分である。

(2) 地震リスクの代表例の日米比較 阪神・淡路大震災とノースリッジ地震

同じ地震リスクについて、米国の例と阪神・淡路大震災（兵庫県南部地震）とを比較してみると、地震リスクに対するリスク・ファイナンスを改善する余地の大きさを再確認できる。1994年に米国カリフォルニア州ロサンゼルス近郊で発生したノースリッジ地震（NR地震）と、1995年の我が国の阪神・淡路大震災とを比較すると別添図のようになる。

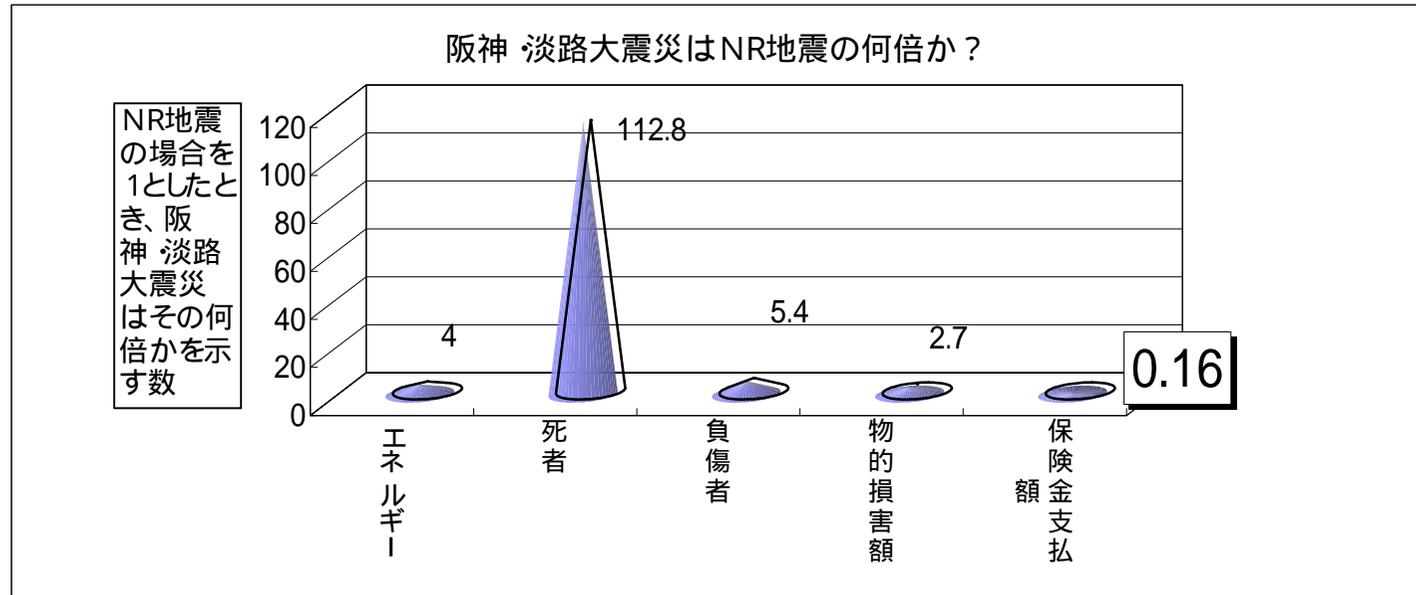
カリフォルニア州で発生したNR地震の大きさを基準に、ほぼ一年後に発生した兵庫県南部地震の大きさがNR地震の何倍かにあたるかを比較した。これによると、兵庫県南部地震は、マグニチュードから換算した地震エネルギーとしてはNR地震の約4倍であり、死者の数では約112倍、負傷者の数では約5倍、物的損害額では約2倍強の地震で、いずれもNR地震の被害を相当上回るものである。他方、保険金の支払についてみると、驚いたことに、兵庫県南部地震は、NR地震の約5分の一と、大変小さい規模となる。

これが意味する³のは、被災した居住用住宅の復旧が大変緩慢であることである。居住用の住宅は、震災復興のため積極的に行われた公共事業の対象では当然なく、個人財産であるためそもそも復旧のための公的な資金支援が大変困難であり、加えて、地震保険による支払が米国に比べて低い水準であったため、事後的な金銭負担の軽減が十分行われずに、まさに、自己責任により、緩やかに解決してゆかざるを得ないことになる。

² 台風19号の被害の大きさについては理科年表により、阪神・淡路大震災の被害については国民生活白書（平成8年度版）、山口（1998）等により、1997年12月24日現在のもの。

³ 死者の数が多いことも阪神・淡路大震災の特色であり、既存耐震基準に不適格な木造建物の取扱いなど興味深い点を含むが、ここでは事後的な金銭的負担に関する議論に焦点を絞る。

阪神・淡路大震災とノースリッジ (NR) 地震比較



地震名	発生時	マグニチュード	死者	負傷者	物的損害額	保険金支払額	政府負担
阪神・淡路大震災 (兵庫県南部地震)	1995.1.17	7.2	6,432	43,782	9兆9,268億円	1,872億円(*1)	60億円(*2)
ノースリッジ(NR)地震 (米国ロサンゼルス近郊サンフェルナンドバレー付近)	1994.1.17	6.8	57	8,000	270億米ドル (約3兆5,910億円)	85億米ドル (約1兆1,305億円)	---
兵庫県南部地震の規模を、ノースリッジ地震の規模を1として比べた指数 (倍数)	---	約 4.0(*3)	112.8	5.47	2.76	0.166	---

(注)

気象庁資料、平成8年度国民生活白書(経済企画庁) 山口光恒(1998)等から作成。

*1: 保険金支払額 = (損保支払分)780億円 + (JA共済支払分)1,092億円 = 1,872億円

これ以外にも、生保が、地震免責にかかわらず、任意に、約550億円の支払を行った模様。

*2: 政府負担 = 政府による地震再保険金支払額(1966年制度創設以来初)、保険金支払額の内数。

*3: マグニチュードMを、以下の関係式により、地震波として出されたエネルギーEに換算して測った倍率

$$\log E = 4.8 + 1.5M$$

事実、内閣府による阪神・淡路大震災の教訓情報資料集⁴によれば、生活の再建に関する教訓として、仮設住宅から恒久住宅への移行がなかなか進まなかったことを挙げており、被害の集中した兵庫県は、県内の応急仮設住宅につき98年9月までには全て解消する計画であったが、その全面解消は地震発生からほぼ5年後の2000年1月までずれ込むことになった。

こうした居住用住宅に関する地震保険は、地震保険に関する法律に基づき、独禁法の適用除外がなされた損害保険会社による共同保険が用意されており、政府による再保険が附帯されている。こうした政府による再保険制度により、4.5兆円の保険カバーが用意されており、このような政府による関与が必ずしもなされていない海外から注目を集めていると指摘されている。このような地震保険を含め、地震リスク・ファイナンスについて、最近の金融技術を用いた手法なども視野に入れ、リスク・ファイナンス全体としての改善の可能性について、本章の最後に検討を加える。

3-3 保険について

リスク・ファイナンスの代表的な手法として従来より保険の手法が用いられてきているが、国土交通省関連でも、自動車損害賠償保険制度や、航空保険、地震保険（ただし、地震保険に関する法律の所管は、財務省）などがある。ここでは、保険の手法の基礎的な考え方である、大数の法則に則して、その内容を概観すると、以下のようになる。

(1) 定義

「保険」の金融面からの定義⁵

不測の損害のてん補に要する費用を再分配する金融的制度

(a financial arrangement that redistributes the costs of unexpected loss)

(2) 保険の基本的な考え方

損害発生に関し同様に個々独立の危険を多数集めることにより危険を分散するという考えに基づく。リスク回避型の多数人は、それぞれ、損害発生の可能性があることから、そうした不安定な状況を回避するため、一定の金銭（プレミアム）を支払ってそうした損害発生時の損失を他の主体に負担させることを希望する。大数の法則により、同一・独立の分布にしたがう確率変数を多数集めて平均すると、漸近的に一定の値に近づく。これから、多数の危険を集めた主体は、リスク中立的になり得る。よって、リスク回避的な多数人がリスク中立的な保険料を超える水準のプレミアムを保険者に払うことにより、リスク中立的な保険者は費用と報酬分をカバーすることが出来ることとなる。

⁴ <http://www.bousai.go.jp/>

⁵ ドーフマン (1993) p2 に拠った。

(3) 数理的な基礎 大数の法則⁶

平均値 μ の同一かつ独立の確率分布にしたがう確率変数 X_i ($i=1,2,\dots,n$) について、 $S_n=X_1 + \dots + X_n$ を考えると、以下が成立する。(ここで、 X_i の確率分布について、平均値 μ のみ既知であれば充分で、分散値などは不明でよいことに注意。)

(強い大数の法則) 確率 1 で、

$n \rightarrow \infty$ の場合に、

$$\frac{S_n}{n} \rightarrow m$$

(弱い大数の法則) あらゆる $\epsilon > 0$ について、

$n \rightarrow \infty$ の場合に、

$$P\left\{\left|\frac{S_n}{n} - m\right| \geq \epsilon\right\} \rightarrow 0$$

3-4 地震保険について

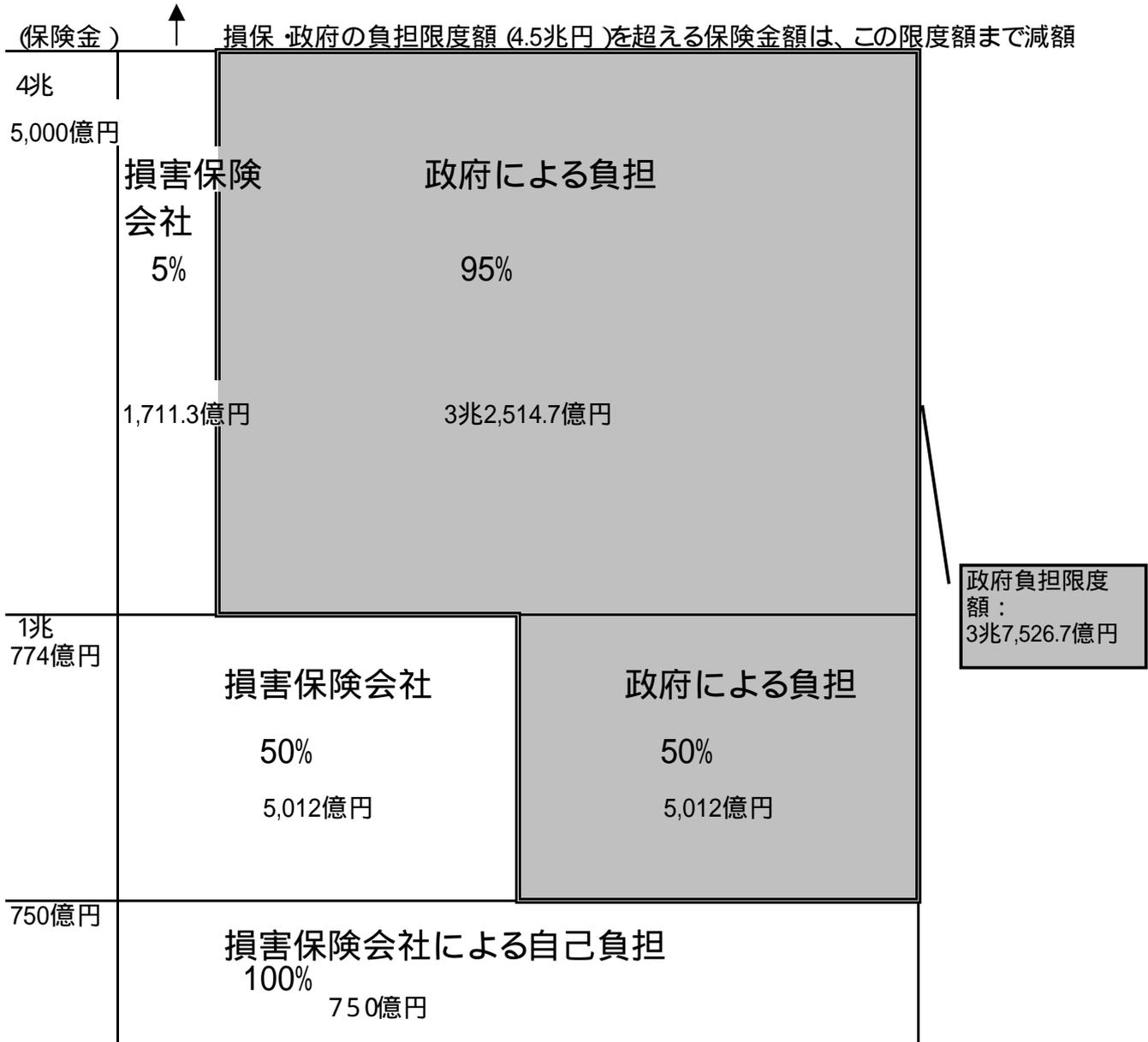
地震リスクに関するリスク・ファイナンスの代表例として、地震保険がある。地震保険については、以下に示すように、幾つかに分類が可能である。狭義では、居住用の建物と生活用動産を保険契約の対象とする、いわゆる「地震保険」がある。これは、地震保険に関する法律に基づき、政府の地震保険特別会計による再保険が制度的に備わっている。この場合、損害保険会社の負担部分がカバー・レイヤーごとに 100%～5% まで(参考図)のように定められている。政府による再保険の負担は、残りの部分であり、0%～95%までと定められている。これらをあわせて、狭義の地震保険によるカバーは、4.5兆円用意されており、政府の負担は、合計3.75兆円となる。このほか、

個人が被災して代替家屋等を賃貸する際の出費に対する保険(間接損害への保険)も考えられる。また、企業が事業用に所有する不動産・動産に対する保険や、企業の事業活動による収入そのものが地震により中断等されることに対する損害、間接的な損害に対する保険も考えられる。

⁶ Economists' Mathematical Manual (3rd. ed.)(2000) p185

(参考)

地震保険に関する法律 (昭和 41年法律第 73号) 公布・施行 :1966年 5月 18日
に基づく公的な再保険の概要 (1回の地震等あたり) 最終改正 :1999年 12月 22日



2002年 4月 1日以降の金額 (数値は、財務省資料とこれに基づく筆者の計算。)

対象 : 地震・噴火・これらによる津波を直接・間接の原因とする物的損害。
居住用建物 (5,000万円限度) 及び生活用動産 (1,000万円限度) のみ。

条件 : 火災保険等に付帯して締結される場合に限る。
火災保険等の金額の 30 ~ 50% 又は上記 5,000万円・1,000万円の低い方の限度まで。

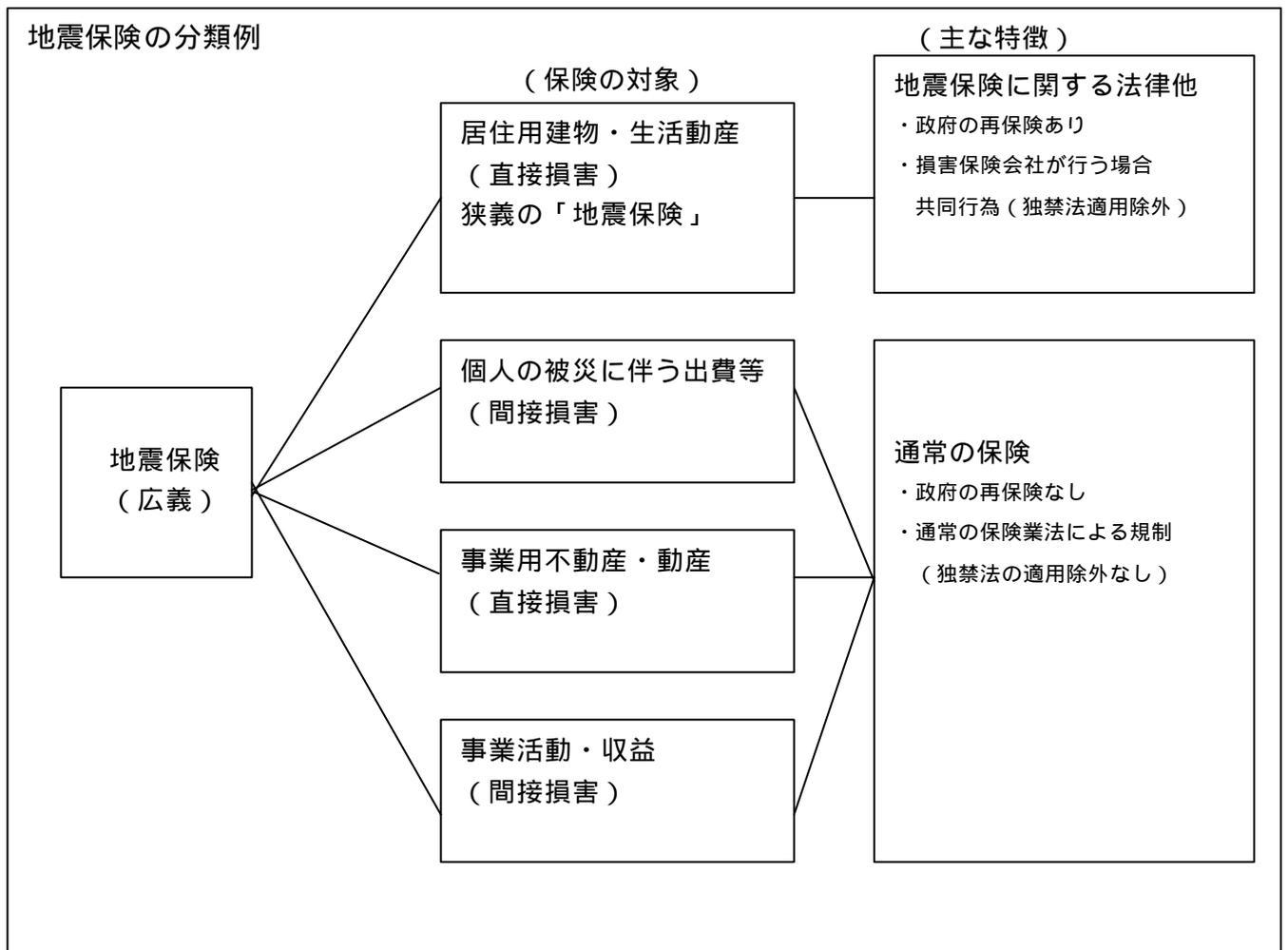
再保険者 政府 地震再保険特別会計
損害保険会社 損害保険業免許事業者、外国損害保険業免許事業者又は火災共済事業法人

損害保険会社等による再保険負担額合計
1,711.3 + 5,012 + 750 = 7,473.3 (億円)

政府による再保険負担額合計
32,514.7 + 5,012 = 37,526.7 (億円)

再保険における総支払合計額 = 4兆5,000億円
7,473.3 + 37,526.7 = 45,000 (億円)

支払われるべき保険金の合計額が、4兆 5千億円を超える場合には、保険会社は、支払額を減額可。
(地震保険に関する法律第 4条)



ここでは、まず、狭義の居住用建物に対する地震保険について、同様に、居住用不動産・動産への保険を州政府が関与することにより、提供している米国カリフォルニア州の地震保険と簡単に比較してみる。

(1) カリフォルニア州地震庁(California Earthquake Authority, CEA)による保険制度について

次に示すとおり、民間からの拠出により設立され、カリフォルニア州の保険当局により監督されているカリフォルニア州地震庁(California Earthquake Authority, CEA)により、我が国と同様、統一内容により提供されている (CEA 統一保険)。

我が国の地震保険が政府による再保険という型の公的な支援があるのに対し、CEA の場合には、損害負担の内訳にあるように、保険会社への課徴金や欧州への再保険、州債の発行など大変多様な手段により負担力を高めているのが特徴といえよう。特に、一時 CEA が資本市場に対して、いわゆる地震債券 (Catastrophic Bond, キャットボンド) を発行して負担の一部のレイヤーのリスクについて市場化を図ったことが注目される。ただし、この試みは、米国内の再保険会社への再保険により代替され、実現しなかったと報告されている⁷⁾。

⁷⁾ CEA のホームページ(www.earthquakeauthority.com)、山口 (1998) p172 等に拠った。

(参考)

CEA 保険制度の概要¹

CEA : California Earthquake Authority (カリフォルニア地震庁)

1996年カリフォルニア州法により、民間からの拠出に基づき設立され、公的に監督されている、世界最大の地震保険機関。

参加民間保険会社を通じて、地震保険をカリフォルニア州内の居住家屋所有者、集合家屋所有者、賃貸人等に販売している。提供する地震保険は、CEAにより統一されている。カリフォルニア州法により、保険会社は、家屋所有者等に家屋保険を販売する場合には、地震保険も購入可能としなければならない。1994年のNorthridge地震の巨大損害により、保険会社が地震保険ばかりか、家屋保険自体から撤退し始めた事態に対応するために、1996年に新たに設立された。

保険の対象

- ・ 倒壊損害
- ・ 地震直接起因火災損害

支払負担の方式

- ・ 支払責任：CEA (カリフォルニア地震庁)
- ・ 総支払限度額：10,500M\$ (これ超えると削減払い。)
- ・ ただし、本スキームへの参加保険会社のマーケットシェア (71.6%) により、さらにCEAの負担分は減額される模様。
- ・ 損保の証拠金：1,000M\$
- ・ 詳しくは、「CEAの損害負担の内訳」参照。

対象商品内容

- ・ 15%までは、自己負担、家財は5,000\$までが限度額。
- ・ (この範囲内なら、対象建物の価額100%まで付保可能で、日本の地震保険のような50%~30%までといった制限はない。従って、保険のみで、建替えすることが可能。)
- ・ ガレージ、プールなどは適用除外。

¹ CEAのホームページ等から作成。

(参考)

カリフォルニア地震庁 (CEA) の損害負担の内訳

参加社の割合 (71.6%) による減額後の CEAによる損害カバー 75.18 億ドル	CEAによる損 害カバー 105 億ドル	層化した損害請求額	負担の分散方法
9,998.94 億円	13,965 億円	20 億ドル (2,660 億円)	保険会社への第2次賦課金
60.86 億ドル 8,094.38 億円	85 億ドル 11,305 億円	15 億ドル (1,995 億円)	資本市場からの資金調達 結局、再保険会社との再保険契約
50.12 億ドル 6,665.96 億円	70 億ドル 9,310 億円	10 億ドル (1,330 億円)	州の債券発行 (保険契約者から追徴)
42.96 億ドル 5,713.68 億円	60 億ドル 7,980 億円	20 億ドル (2,660 億円)	ロイズ等へ再保険
28.64 億ドル 3,809.12 億円	40 億ドル 5,320 億円	30 億ドル (3,990 億円)	保険会社への第1次賦課金
7.16 億ドル 952.28 億円	10 億ドル 1,330 億円	10 億ドル (1,330 億円)	保険会社からの拠出金
料金収入により変動	料金収入により変動	保険料収入	保険料収入

CEAに参加する保険会社の割合 (火災保険のマーケットシェア) 71.6%
1ドル = 133 円で換算

(注)

山口光恒 現代のリスクと保険」(1998) p172に拠った。

CEA (カリフォルニア地震庁) :

家計地震保険専門の引き受け機関で、CEAに参加する保険会社を通じて地震保険を販売し、CEAは支払責任を負う
保険会社の参加は、任意。

CEAによる負担上限 (105億ドル (75.18億ドル)) を上回る損害については、削減払い。

商品概要 : 15%の自己負担、家財支払上限額 = 5,000ドル、ガレージ・プールなどの適用除外、などを内容とする。

10億ドルまでは、保険会社の負担・拠出金により賄い、これを超えると、「負担の分散方法」にて記載の方法により負担。

(2) 我が国の地震保険とCEAによる保険の比較について

両者の地震保険の制度内容を比較すると以下のように、特色が明らかになると思われる。また、両者の制度内容と、実際の保険料について、簡単な試算を行った例についての図を添付する。

- 契約者は、日本が各損保会社であるのに対し、CEAではCEA自身が契約者である。
- 契約内容は、保険の対象、料率等について、日本、CEAともに統一内容になっている。
- 政府による再保険制度は、我が国の地震保険制度のみに用意されている。
- 他方、CEAは、保険責任の処理が大変多様であり、欧州再保険市場の活用（ロイズ等への再保険）や、州内の債券市場の活用（州債券の発行）地震債券の発行も可能としている。

ここから判明するのは、我が国の地震リスクは、いわば国家が集中的に保有している構造に対して、米国カリフォルニア州においては、CEAの保有する地震リスクを、再保険、証券化等の金融工学的的手法により市場において投資家に移転しようとしている多様な構造をとっていることである。

その結果、リスクは細分化され、我が国の保険料水準を下回るレベルから倍以上に上る保険料など、大変多様なレベルのサービス内容となっていることが判る。

制度内容	日本の地震保険	CEA保険
政府再保険	政府（特別会計）	なし
契約者	損保会社	CEA (損保会社を通じて販売)
契約内容	統一内容（料率他） 独禁法適用除外	統一内容（CEAが設定） (独禁法適用除外)
リスクの「市場化」	(再々保険)	欧州市場へ再保険 Cat Bondの発行も可能 (州債によるファイナンス)

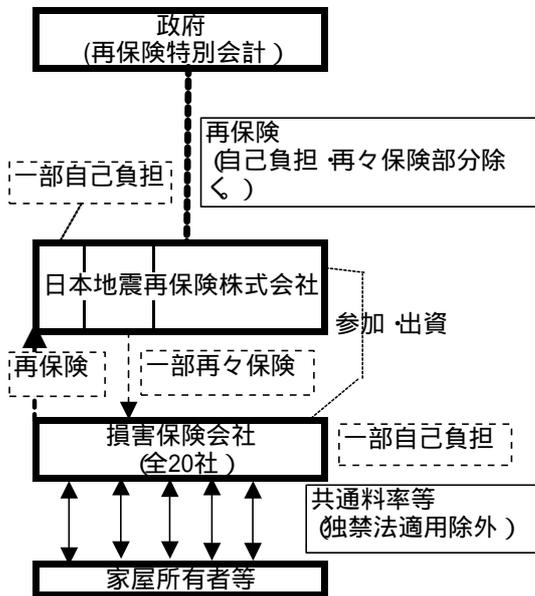
(3) 災害リスクの証券化の例---オリエンタルランド(東京ディズニーリゾート)の場合

こうしたカリフォルニア州における例のように、地震等の自然災害について、そのリスクを細分して証券化することで、資本市場において、投資対象として引き受ける投資家にリスク移転する例が最近注目されている。

このうち、事業会社として、大規模娯楽施設を運営するオリエンタルランドが、東京舞浜地区における地震（南関東地震）により、事業活動が中断することによる間接被害を、国際資本市場において、証券化の手法によりリスク移転した事例が明らかにされており、興味深い事例として、以下紹介する。

日本の地震再保険とCEAシステムの比較

日本の地震再保険のイメージ

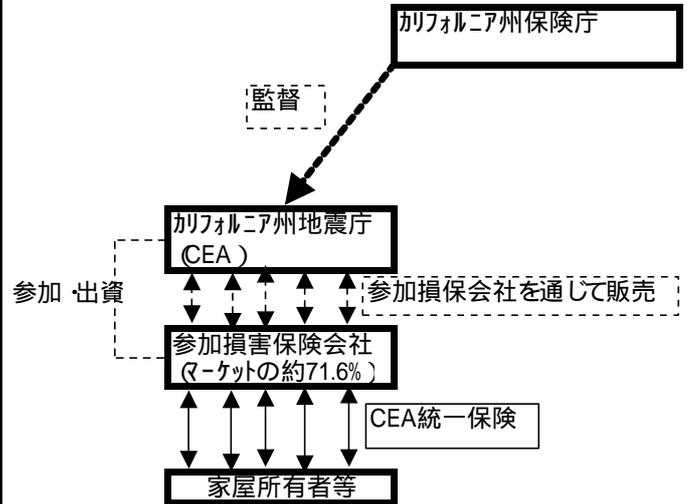


(具体的計算例)
東京都、神奈川県又は静岡県において
1,000万円の地震保険に加入した場合の
1年間の保険料

	保険料
約	15,800 円

(前提)
昭和56年6月以降に建築した
非木造建築物を対象と仮定。
(平成13年10月現在)
耐震性、建築時期等による割引
(10%)のみ考慮。

カリフォルニア州地震庁のシステムのイメージ



(具体的計算例)
カリフォルニア州サクラメント(州都)において
100,000\$ (約1,330万円)のCEA地震保険に加入した場合の
1年間の保険料

	保険料
約	80 ドル
約	10,640 円

(1\$ = 133円と仮定)

(前提)
15%の自己負担で、骨組構造建築物
(1991年以降建築したものと仮定)
私財保険5千ドルと代替家賃保険1千5百ドル
(選択可能な最低レベルの選択肢)
を付保した場合を計算。

カリフォルニア州ロサンゼルス市において
100,000\$(約1,330万円)のCEA地震保険に加入した場合の
1年間の保険料

	保険料
約	270 ドル
約	35,910 円

(1\$ = 133円と仮定)

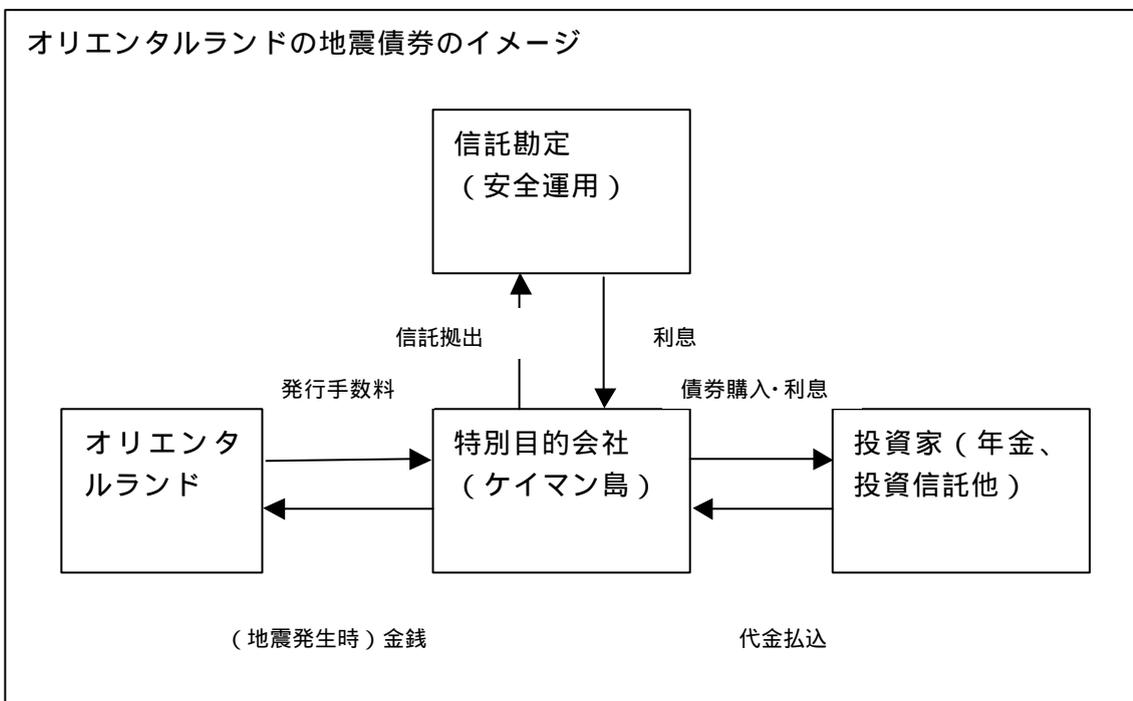
(前提)
同上

自然災害リスクの証券化

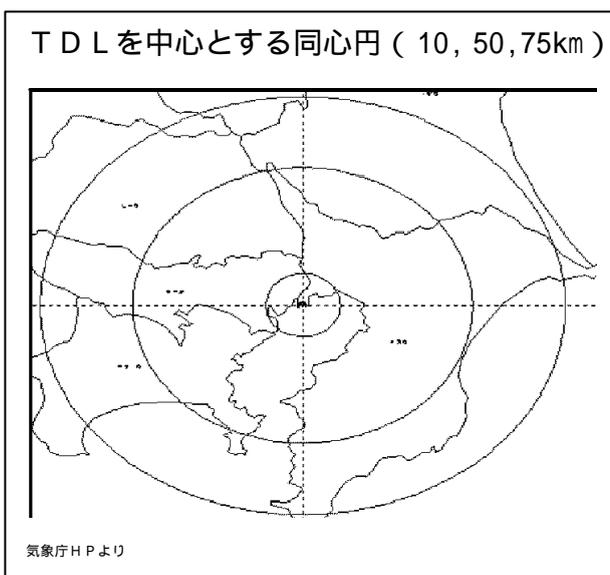
対象リスク	発行会社 (特別目的会社・所在地) <投資銀行>	発行日	リスク期間	リスク相当額 (USM \$)	債権元本相当額 (USM \$)	リスク指標
世界中の巨大災害 (St. Paul Reの引き受けたもの)	St. Paul Re (Georgetown Re: ケイマン) <ゴールドマン・サックス>	1996.12	3~ 10年	45.3	68.5	実損填補 (比例再保険)
スイスのひょうりスク (自動車損害)	ウインターツール <クレディ・スイス・ファースト・ポストン>	1997.1	1年	6.5	2.9 (転換社債)	ウインターツール引き受けポートフォリオ中の事故件数
アメリカ合衆国東海岸ハリケーン (ホームオーナーズ)	USAA (Residential Re: ケイマン) <メリル・リンチ、ゴールドマン・サックス、リーマン・ブラザーズ>	1997.6	1年	400	477	実損填補
カリフォルニアの地震	Swiss Re (SR Earthquake Fund: ケイマン) <クレディ・スイス・ファースト・ポストン>	1997.7	2年	112.2	137	保険業界ベースの損害額 (PCSインデックス)
日本・南関東の地震	東京海上火災保険 (Parametric Re: ケイマン) <ゴールドマン・サックス、スイス・リー・キャピタル・マーケット>	1997.11	10年	90	100	気象庁マグニチュード
東京 (舞浜) 地区を中心とする地震	Concentric Ltd/Circle Maihama Ltd/オリエンタルランド (ケイマン) <ゴールドマン・サックス>	1999.5	5年	200	200	気象庁マグニチュード/舞浜からの距離/震源の深さ

土方 (2001) p22を基に、作成。

1999年に発行された地震債の仕組みは、オリエンタルランドが手数料を払い、海外の特定目的会社を通じて、地震債券を投資家に販売する。得られた金銭は特定目的会社が信託勘定に入れて米国債などにて安全運用する。地震が発生した場合には、あらかじめ約定された内容にしたがい、一定の金銭がオリエンタルランドに支払われることになっている。



具体的な内容は、オリエンタルランドの経営する東京ディズニーリゾートが存在する千葉県浦安市舞浜を中心に、半径10、50、75kmの同心円内で、それぞれ気象庁マグニチュード6.5、7.1、7.6以上の地震が発生した場合（こうした条件は、トリガーと呼ばれる。）に、金銭の支払が行われるように約定される。



この場合、元本リスク型といわれる債券は、地震の規模に応じて投資家に最終的に支払われる元本が減額されるため、地震発生の際のリスクがオリエンタルランドから投資家に移転されている。これと引き換えに、投資家は通常の債券より相当条件の良い利息を受け取る。他方、信用リスク・スイッチ型と呼ばれる債券は、地震発生時にオリエンタルランドに信託元本を融資し、オリエンタルランドは、一定期間後に返済するものである。

(参考)

オリエンタルランドの地震債(地震デリバティブ)について*

1999年5月発行

担当投資銀行: ゴールドマン・サックス

(特色)

事業会社として、世界初の地震債発行

目的が、地震による物的損害(直接損害)ではなく、地震発生に伴う収入減(間接損害)

実際に利益減少が起こらなくても、支払いがなされる(利益保険ではなく、保険デリバティブ)

(地震費用保険に比べた優位性)

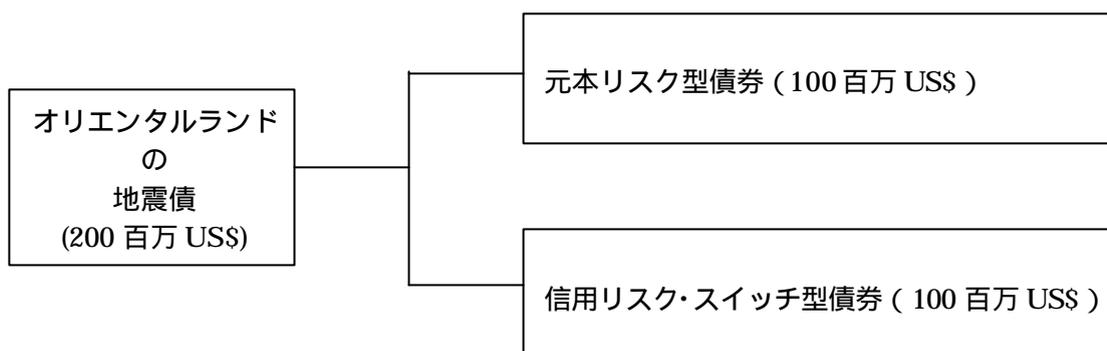
支払い金額の明確さ(トリガーとなるイベントの発生により、一定の算式に従い計算。保険の場合に見られる損害額の算定につき集計の必要なし。)

支払資金決済の手順が簡潔、かつ、迅速

再保険市場のキャパシティーに制約されることなく、証券化により保険市場の100倍のキャパシティーを有する資本市場にアクセス

地震発生以前に資金を特別目的会社で信託勘定にて保有させることで、保険のように保険会社の信用リスクの懸念が少ない。

保険には実現の難しい、5年間の長期プロテクションが得られた。



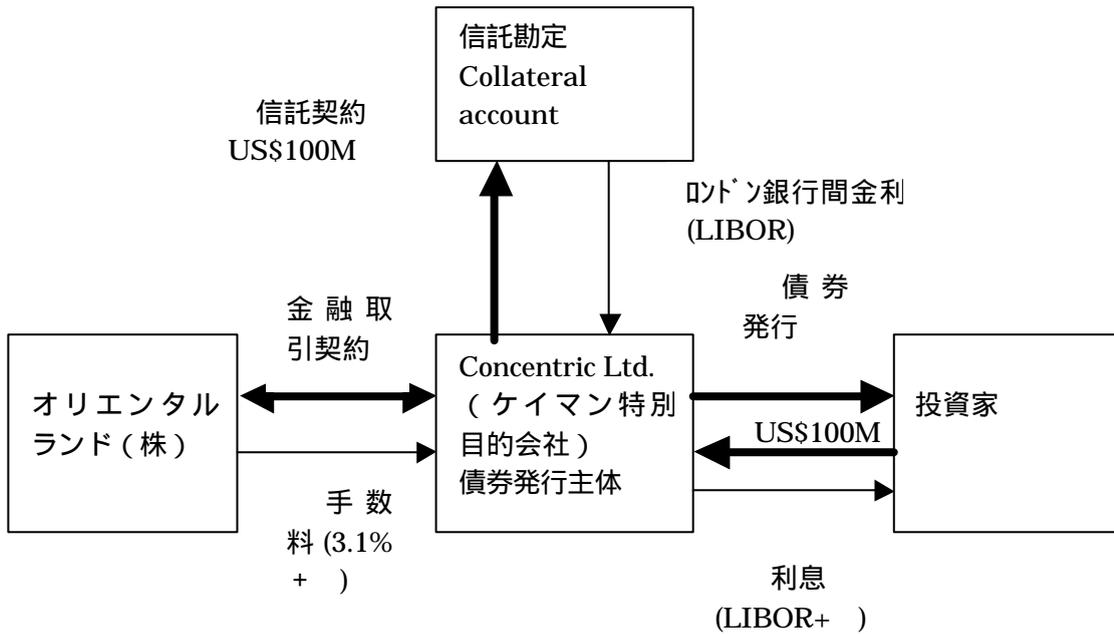
債券の種類	元本リスク型債券 Catastrophe Bond	信用リスク・スイッチ型債券 Catastrophe Contingent Financing Facility
債券の内容	東京(舞浜)を中心とする地震リスクを対象とする米ドル債	東京(舞浜)を中心とする地震リスクを対象とする米ドル債
発行体	Concentric, Ltd. (ケイマンSPC)	Circle Maihama, Ltd. (ケイマンSPC)
債券の種類	元本が地震の規模により線形に減額される。	元本保証(オリエンタルランドの発行する債券と引き換えに元本が支払われる。)
発行金額	100百万US\$ (- 120億円)	100百万US\$ (- 120億円)
期間	5年	5年(ただし、地震発生時には、8.5年)
受取利息	6ヶ月のロンドン銀行間金利(LIBOR) + 3.1%	6ヶ月のロンドン銀行間金利(LIBOR) + 0.75%
格付	BB+(S&P) Ba1(Moody's)	A(S&P)

* 土方(2001) p89-96 などから作成。

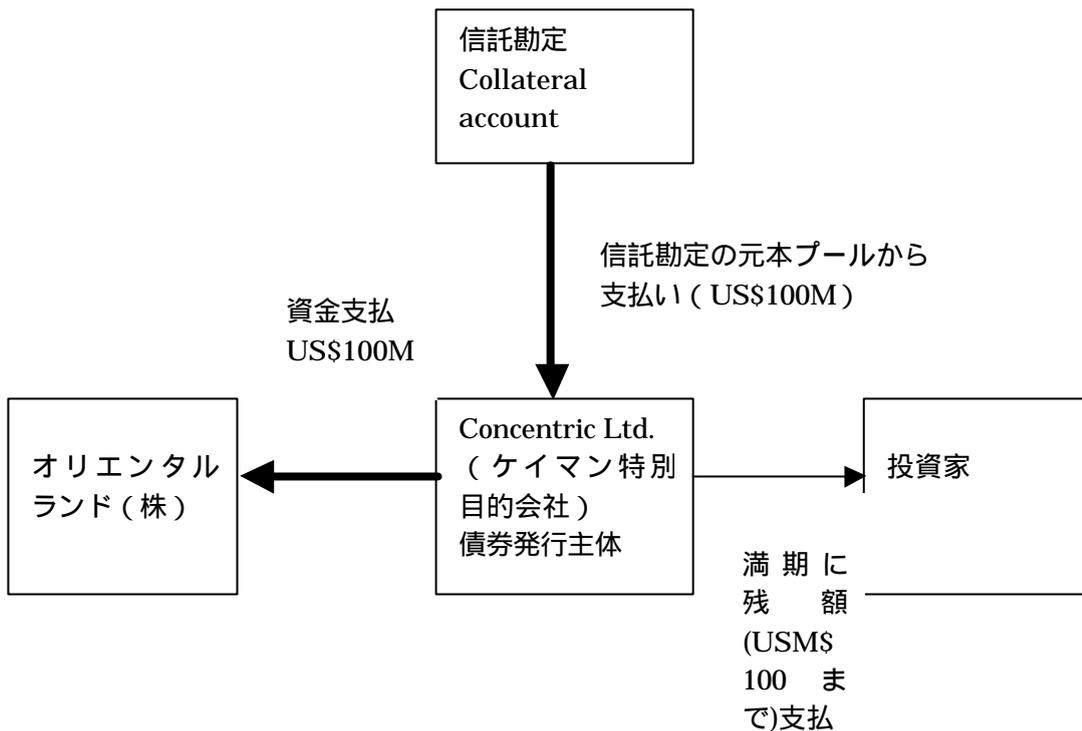
(参考)

オリエンタルランドの「元本リスク型債券」

(契約当初から地震発生まで)



(地震発生時)



1

(土方(2001)P94に拠った。)

Concentric, Ltd.は、オリエンタルランドとの契約に基づき、1億ドルの地震債を発行し、投資家に販売。

Concentric, Ltd.は、投資家からの払込資金を信託勘定に移転し、運用。

オリエンタルランドは、手数料として年3.1%+を支払う。

投資家は債券の運用益として、年LIBOR+3.1%の利息を受け取る。

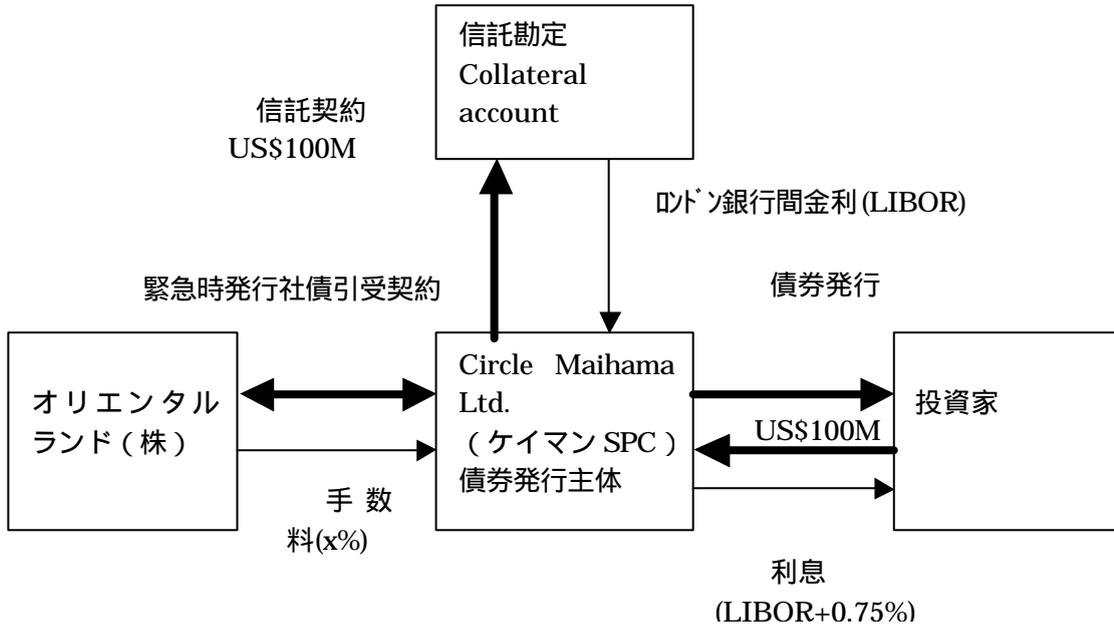
地震発生時、Concentric, Ltd.は、信託勘定の資金プールより条件に応じた額をオリエンタルランドに支払う。

投資家は、満期日に最終的に残った元本と運用益を受け取る。

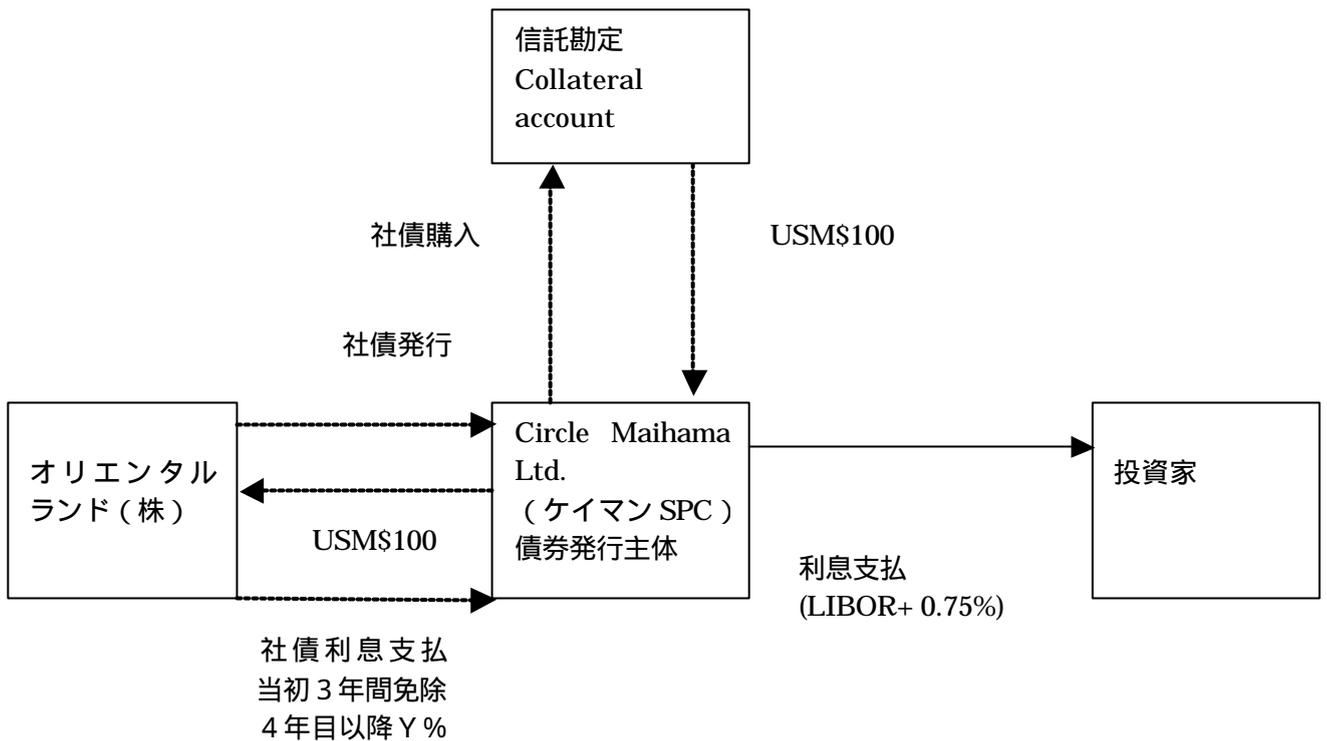
(参考)

オリエンタルランドの「信用リスク・スイッチ型債券」*

(契約当初及び期中)



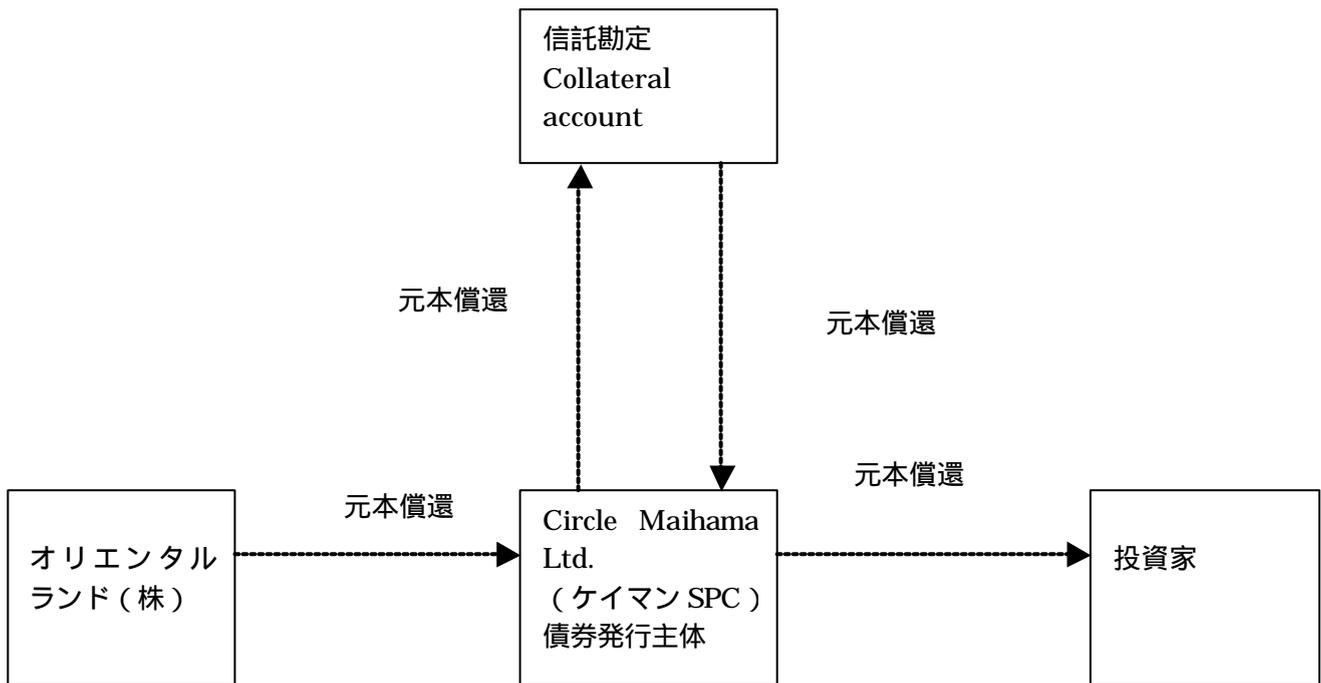
(地震発生時)



* 土方(2001) P95~96に拠った。

(参考)

(債券償還時)



Circle Maihama, Ltd.は、1億 US ドルの緊急時社債発行引受契約をオリエントランドと契約。
この契約に基づき、Circle Maihama, Ltd.は地震債（リスク・スイッチ型）を発行し、投資家に販売。

～ Circle Maihama, Ltd. は、投資家からの払込資金を信託勘定に移転し、運用。

オリエントランドは、手数料として年 X%を支払う。

投資家は債券の運用益として、年 LIBOR+0.75%の利息を受け取る。

地震発生時、オリエントランドが社債を発行した場合、Circle Maihama, Ltd.は信託勘定の資金プールを取り崩して社債を購入。

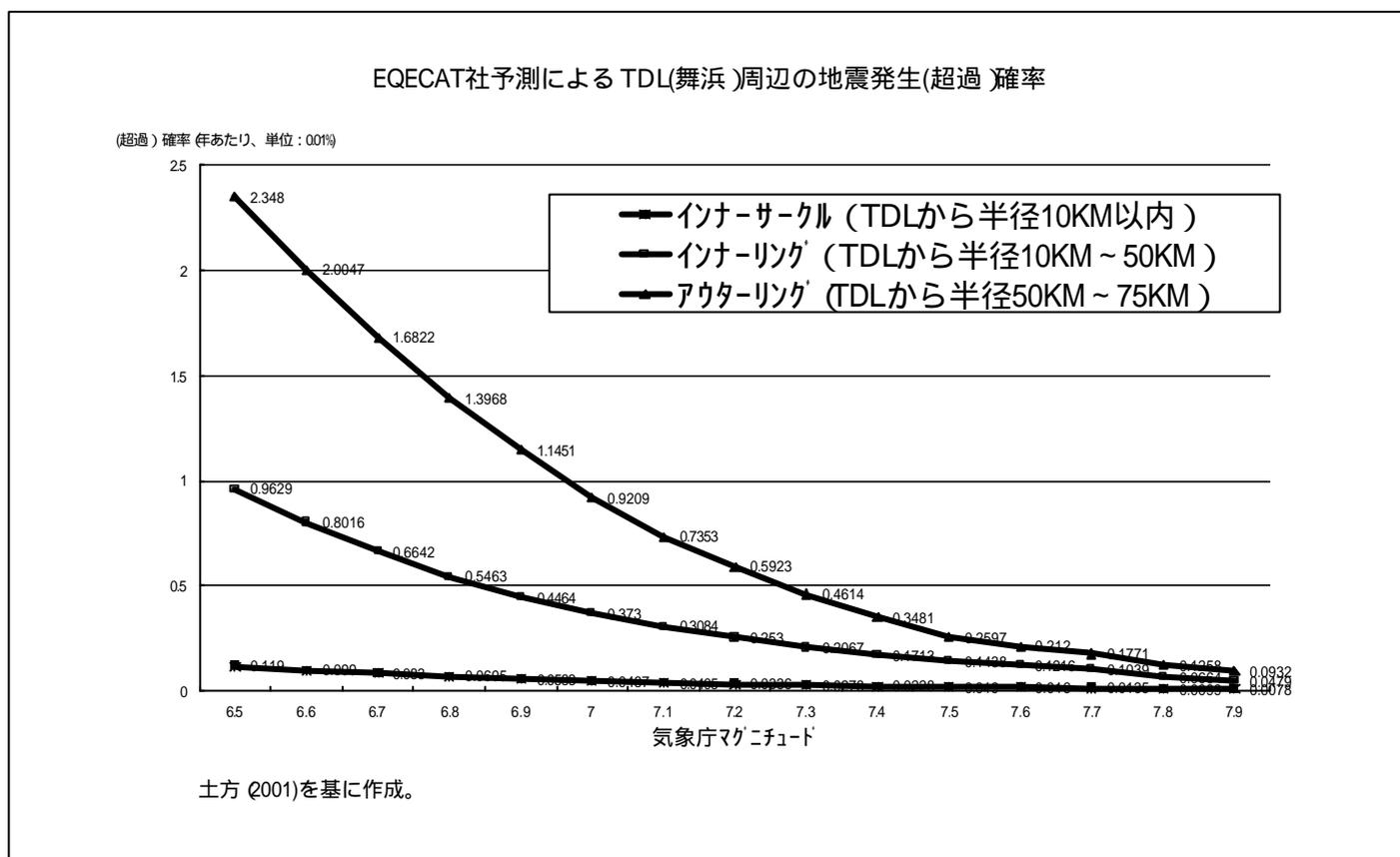
オリエントランドは、当初3年間社債利息の支払を免除。4年目以降、年 Y%の利息を Circle Maihama, Ltd.に支払う。

Circle Maihama, Ltd. は、投資家に LIBOR+0.75%の利息を支払う。

～ 満期日にオリエントランドは、社債を償還し、投資家は元本の償還を受ける。

オリエンタルランドに地震発生時の流動性を保証するが、最終的には返済する義務があり、リスクの移転は限定されている。投資家にとってはより安全な債券であり、利息は元本リスク型より大幅に低い水準に設定されている。

この地震債券発行について、前提とした地震発生確率が公表されているので、参考に以下掲載する。



(4) テロに対応した航空保険の例

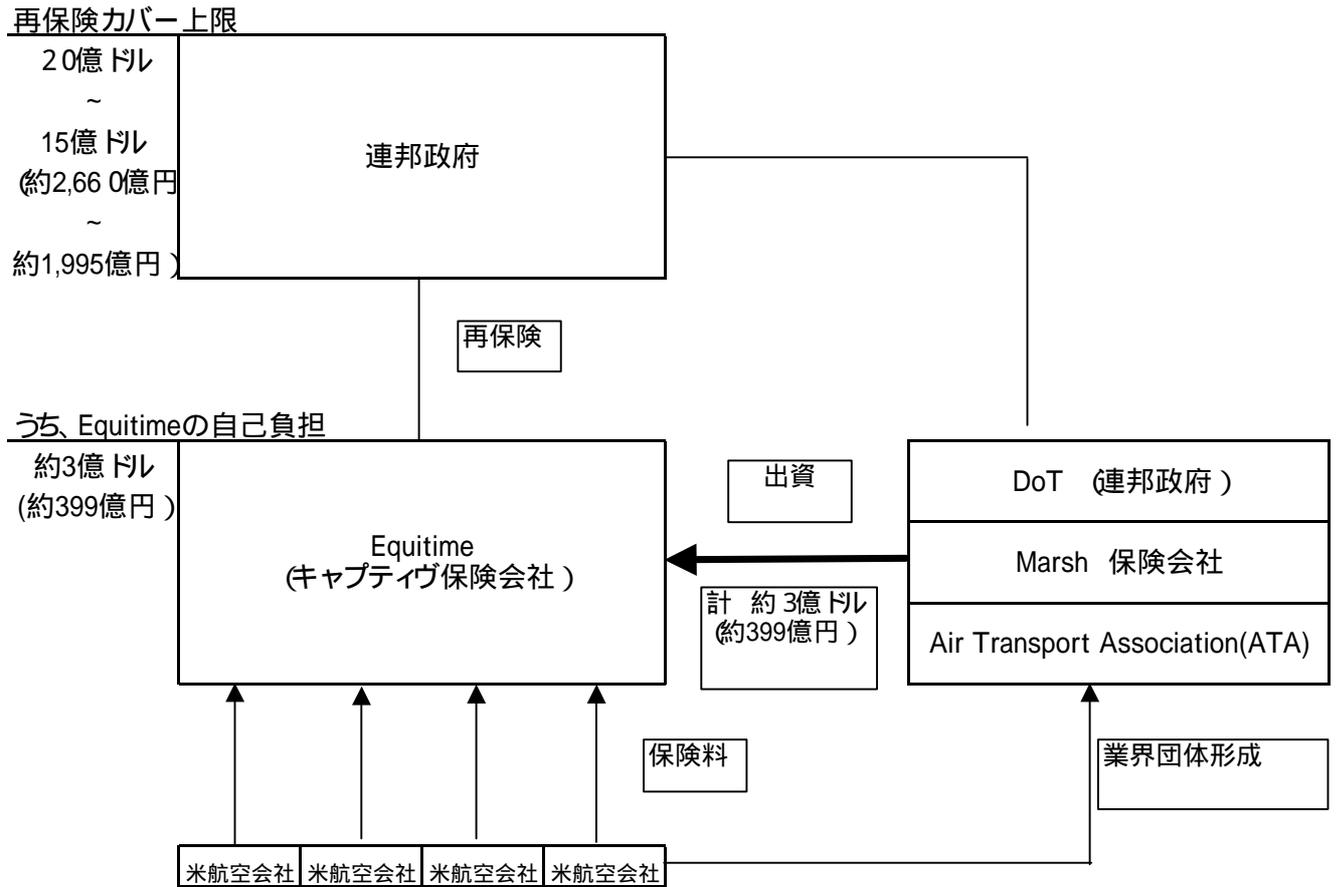
地震等の自然災害ではないが、テロ、戦争等の巨大なリスクについては、2001年9月11日のいわゆる米国同時多発テロ以降大変注目されており、特に、一時飛行禁止命令により通常の事業活動が不可能になった航空事業においては、大きな問題として各方面により検討が進められている。ここでは、典型的な例として、米国の例とICAOによる検討例を紹介する。

米国では、航空業界が連邦政府と共に、リスク移転手法のうち、保険の変形であるキャプティブの手法を用いて、リスクを一義的に負担する子会社である保険会社 (Equitime 社) を設立し、その保険会社の引き受けるテロ関連リスクに対して、連邦政府が再保険カバーを提供するスキームが提案され、検討されている⁸。(添付図参照。)

⁸ 2002年8月末現在。なお、米国では、同時多発テロから約2週間程度で、連邦政府がいわゆる航空保険を提供できること、高騰した航空保険料分を連邦政府が補填できること、米国航空会社のテロ被害関連賠償責任を制限すること等を内容とする措置が時限つきで講じられ、本年10月末まで延長されてきている。

(参考)

米国の航空再保険の概要 (詳細未確定)

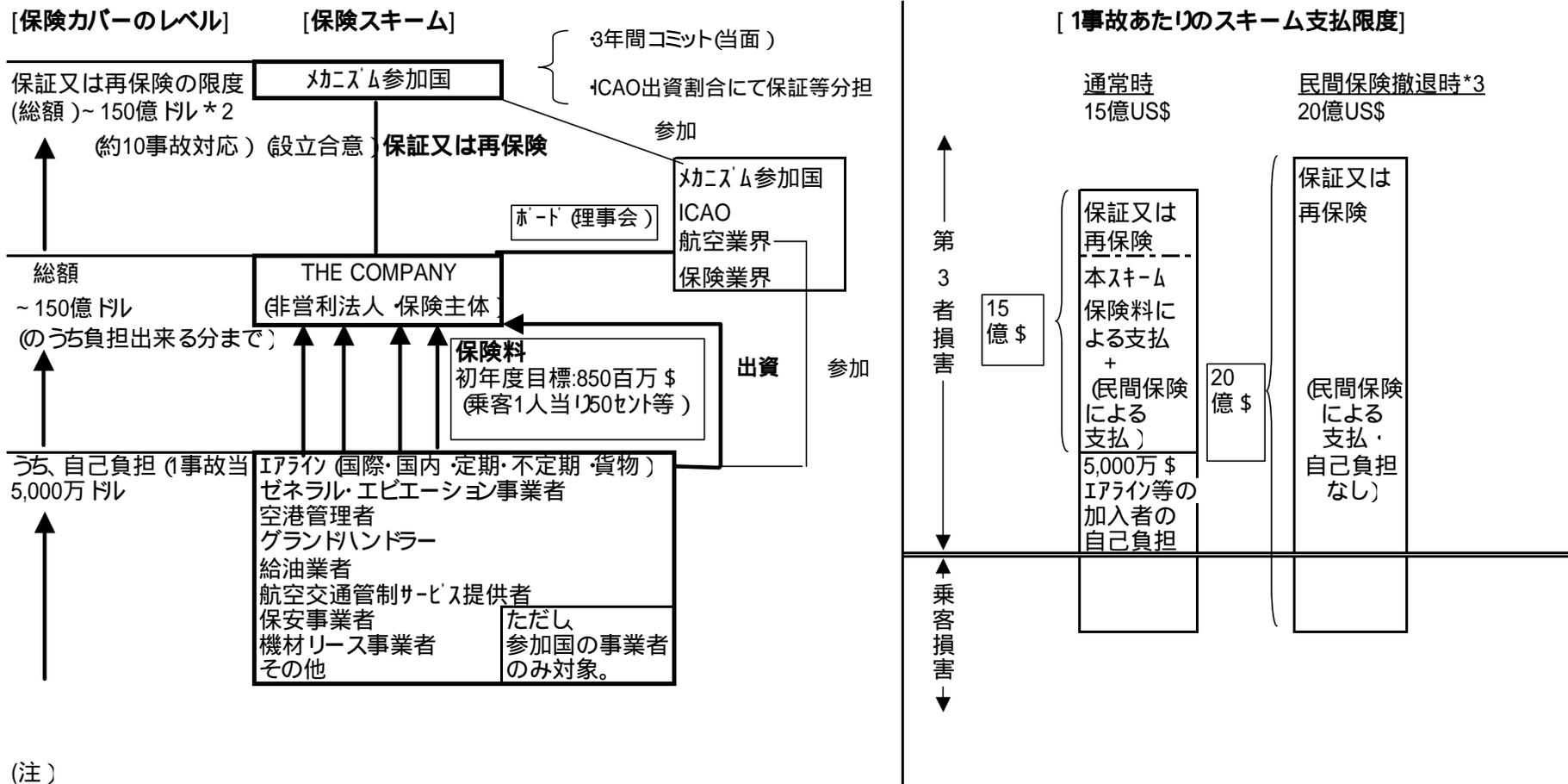


(註)

- 1 Equitime保険会社の保険は、米国航空会社全てが利用可能
- 2 旅客と第三者への、戦争及びテロリスクによる損害への保険
- 3 航空会社の支払う保険料等の詳細は、ATAとDoTの間にて、引き続き交渉中のとのこと。
- 4 AIG保険会社が、純民間ベースで提供する保険パッケージ (上限5千万ドル)より低保険料の様様。
- 5 AIGグループは、上限5千万ドルに加えて、テロ起因の第3者損害に、10億ドルの保険カバーを提供中。
- 6 キャプティブ保険会社 親会社のリスクを引き受けるために設立される保険会社
- 7 2002年4月1日以降に適用されることを想定している模様。
- 8 欧州でも、3月末以降、米国の状況を踏まえて、国運輸相が会合し、航空保険につき議論する模様。
- 9 Association of European Airlines(AEA)や、Allianz(独保険会社)が、米国連邦政府と同様のスキームを検討中。テロ関連の第3者損害に対し、5事故で50億ドル程度の保険カバーを議論している模様。

出典 :The Economist March 23rd 2002 p67-68、各種HPより

ICAO SPECIAL GROUP ON AVIATION WAR RISK INSURANCE(SGWI) が提案している「国際保険メカニズム」の概要*1



(注)

- *1: 戦争関連の第三者損害を原則としてカバー。典型的な場合のみ図示した。
- *2: 総責任額から、エアライン等の自己負担額、THE COMPANYの負担額(保険料収入等)を控除した残額について、参加国が150億ドルまで分担して保証又は再保険。参加国ごとに、150億ドルのICAO分担割合までの限度額を設定。
- *3: 民間保険が、乗客への戦争関連の損害保険から撤退する場合には、最高額を1加入者あたり15億ドルから20億ドルに引き上げた上で、自己負担5,000万ドル分まで含め、乗客の関連損害についてもカバーする。
- *4: 参加国が負担した額については、のちの保険料収入により、THE COMPANYから負担参加国へ返還していく。参加国の出資負担は、なし。
- *5: 本メカニズムは、参加国のICAO分担率の合計が51%に達すると発効し、5年後に見直し。民間保険の復活や第三者への責任制限条約等が設けられた場合には、廃止。

ICAO においては、国際保険市場が同時多発テロ以後保険提供を絞った事態への暫定措置として、国際保険メカニズムが提案されている。それによれば、航空関連業界のみが出資し設立する非営利の保険引き受け主体が、テロ関連のリスクを対象に保険を提供し、その引き受け主体に対し、ICAO 参加国が、役員の派遣のほか、債務保証が再保険のカバーを提供するスキームになっている。(添付図参照。)

(5) その他公的セクターによる巨大リスクの再保険プログラムについて

地震、テロ以外にも、政治暴動等も含む巨大災害については、政府が関与する立場に拠って、各国政府が再保険を提供している例がある。我が国の地震保険は、こうした立場に立つ一例である。

国家	開始年	カバー対象災害等
ニュージーランド	1994	地震・戦争被害
スペイン	1954	自然災害・テロ・軍隊の平時行動
日本	1966	自然災害(地震・火山)
南アフリカ	1979	政治暴動
ルウェー	1980	自然災害
フランス	1982	自然災害
英国	1992	テロ
オランダ	1996	自然災害

Cutler・Zeckhauser(1999) p261

なぜ政府がこうした巨大リスクに関与するのかについて、政府等の公的セクターが関与する再保険の利点に関する代表的な見解を以下紹介する。

公的セクターによる再保険の利点⁹：

政府等が巨大損害に対し再保険を提供することにより、より小さな損害に対する民間保険市場が形成される可能性がある。

政府等は、耐震構造規制などにより巨大損害を軽減することができ、再保険を引き受けることにより(規制する権限のない民間保険市場のみの場合に生ずる)モラル・ハザードなどの問題を軽減するインセンティブが働き、社会全体で見てより効率的なシステムが構築できる可能性がある。

再保険がない場合でも、政府は、結局、リスクの最後の引き受け手であり、正式な公的再保険は、こうしたコストに対する収入を確保することになっている可能性がある。

⁹ Cutler and Zeckhauser (1999) pp261-261

3-5 地震を中心とする巨大自然災害リスクに関する国家レベルのリスク・ファイナンス・マネージメント(国家及びその構成員によるカタストロフィック・リスク・ファイナンス・マネージメント)の可能性について 地震リスクの「市場化」の可能性

(1) 問題の背景

兵庫県南部地震(阪神・淡路大震災)などの巨大自然災害は、直接的人的損害が約6千人を超え、物的損害が約10兆円に上る、まさに、カタストロフィックな災害であった。

こうした巨大地震被害を受けて、さまざまな分野の専門家が、様々な観点から、人的被害と物的被害の軽減のため、多くの研究と議論に基づき、多数の施策が実施されてきている。被害軽減のための事前の施策として、気象庁や文部科学省その他政府機関による地震調査研究本部において、日本全国の地震発生に関する(確率的な)長期評価や、それらに基づく地震動予測地図(確率論的地震地図)の作成などの努力もこの一つであった。

また、地震発生後に、その被害から復興し、地震発生以前の状況にもどすノーマライゼーションも大変重要である。この点、鉄道、港湾等の公共インフラの被害回復については、鉄道事業者の迅速な復旧努力や、災害復旧のための公共事業が、まさに、国を挙げて行われ、その復興には、目覚しいものがあった。また、耐震補強工事や、耐震基準の見直しなど、再発防止のための施策も速やかに行われてきている。

他方、民間の居住用の住宅被害についての復興については、自治体による仮設住宅の建設・家賃補助等の公的支援がなされて対応がなされたものの、こうした仮設住宅から恒久住宅への移行については、地震発生後数年を経ても解消されないなど、課題を残した。本稿でも取り上げた地震保険制度がこうした問題に十分な対応しきれていないとの批判がなされた。居住用住宅について、事後の復興に備えた災害発生以前からのリスク・マネージメント手法であるリスク・ファイナンスが不十分とされる問題である。

地震保険については、先にも述べたが、我が国の普及率(=契約数/世帯数)は、阪神大震災前では、全国でわずか7.3%、その発生後(1996年10月末)でも、全国で12.6%にとどまる。(JA共済は全国で32.8%普及。)阪神大震災関連の損害保険からの支払は、1996年7月末までで、780億円、再保険による政府の支払は、60億円にとどまっている。(JA共済からは、別に、1,092億円。) ¹⁰

居住用住宅の復興と被災者への生活復興支援については、まず、兵庫県を中心として自然災害に関する全国的な共済保険制度が提言され、日弁連など各種団体も具体案を提示するなど、国、自治体、民間団体などさまざまなレベルで議論が重ねられた。その結果、低所得世帯等に対する被災者生活再建支援金の支払を可能とする「被災者生活再建支援法」が1998年に制定された。これは、一定規模以上の地震、噴火、台風等の自然災害により、住宅が全半壊した年収500万円未満の低所得世帯や身体障害者などを含む年収800万円までの世帯に対し、通常の家財購入費、住居移転費用や負傷等による医療費について、最高100万円まで支給するもので、都道府県の拠出金により設けられた被災者生活再建支援基金から支出される。国からも補助金(支援金の1/2)

¹⁰ 山口(1998)p147、損害保険料算定協会「阪神・淡路大震災資料集」(1997年3月)p195に拠った。

が支給される。

地震保険も、その後の議論を踏まえて、再保険カバー上限を4.5兆円まで引き上げ、保険料についても、耐震構造の有無、建物年齢に応じた割引などの制度改正がなされてきている。

こうした施策により、震災後の住宅復興のために災害発生以前から必要となるリスク・ファイナンスの措置は充分といえるのであろうか。以下においては、この問題を考える際の見方と、最近活用されてきている金融工学的な手法を用いたリスク・マネジメントの活用可能性について、紹介する。これら手法それぞれの可能性についての詳細な分析は、別の機会に譲る。

(2) 居住用住宅についてのリスク・ファイナンスに関する考え方 自然災害「リスクの市場化」へ

居住用住宅についてのリスク・ファイナンスを考える際には、以下のような点に注意する必要があると思われる。

居住用住宅は、学校・公立病院等と違い、あくまで居住者個人の資産である。したがって、たとえ倒壊・火災の原因が自然災害であり、その原因発生について居住者のコントロールが及ばないとしても、その個人財産の復興に対する公共セクターによる支援については、個人資産が戦争や水害等により失われる場合と同様、限界がある。私有財産の補填を公的に行わないという伝統的な資本主義経済原則からくる制約である。(なお、損害額については、後述するように、耐震補強など個人のコントロールが充分及ぶことに注意。)

こうした考え方は、最近、別の考え方とあいまって、強まっていると考えられる。国民の側においては自己責任原則が浸透し、公共セクターの側においては市場原理の活用・小さい政府への志向がますます高まってきている。経済社会情勢の変動による不確実性の高まりと、特に最近におけるいわゆる政府の失敗などの教訓から、国民の間には、情報開示を前提にして、自己責任・自己コントロール・意思決定への参画(民主的統制)の原則をできるだけ徹底するための諸施策が、公共事業、金融、医療をはじめ各方面において展開されてきている。また、公共セクターの側においては、規制緩和等によるダイナミックな市場メカニズムの再生と経済活性化、財政構造改革の観点などから、出来るだけ国家による関与を少なくし、市場・民間の創造的な活動を支援・補完・保証する機能への重点化がなされてきている。

なお、自己責任の考えを組み込んだ経済原則には、公平性の観点から一定の例外が必要になる。情報公開と市場メカニズムを通じた制度を利用できない、社会的な弱者(低所得者等)のための住居の迅速な復興と自立をいかに確保するかである。こうした所得再配分機能を住宅の地震被害からの復興局面にどのように活かすか、について多くの議論がなされてきている。

この点、保険という仕組みに載せるのは(制度設計にもよるが)一方で、個人の住宅に関する保険者と加入者間の情報の非対称性から、リスクの高い者が保険に集中する逆選択の問題が生ずる。他方、これを完全に避けようとする、結局、自賠償保険のような強制保険となり¹¹、政府が介入する相当規模の所得再配分機能を残

¹¹ Kleindorfer・Kunreuther (1999)では、新築住宅に自然災害保険への加入を義務付けることを提案している。

さざるを得ない可能性が高く、国民的な合意が得られるか否か難しい。結局、財源上の制約、最低限の生活保障の観点から、保険に関する上記の状況を踏まえて、国会等の民主的な過程における議論と意見集約の結果としては、制定された「被災者生活再建支援法」のように、保険とは別の仕組みとして、支給の対象を家屋ではなく生活再建のため必要最低限度の家財等に限定した社会的弱者を対象を絞った制度となったと考えられる。公平性の観点からの要請には、必要とあれば、こうした大きな枠組みを維持しつつ、細部の改良を検討するのが現実的な方向であると思われる。

(3) 巨大自然災害リスクに関する国家レベルのファイナンス・マネージメント・システム (国家によるカタストロフィック・リスク・ファイナンス・マネージメント・システム)の可能性について

(3) 1. 基本的考え方

こうした状況のもと、従来の自然災害リスク＝カタストロフィック・リスクについては、公共セクターにおいて一定の工夫を加えることで、市場メカニズムの一層の活用を検討することが可能と思われる¹²。すなわち、社会的な弱者を除いた、自立していると考えられる国民の大多数については、自然災害リスクに関する公共セクターからの適切な情報開示を前提に、金融工学的な知見に基づき改良された地震保険の提供により、個々人の財産に関するリスクを充分判断しうる個人が、各人のリスクに応じて積極的に地震保険によってリスク・ファイナンスを行うことである。ここでは、こうした内容を、リスクの「市場化」と呼ぶこととする。

(3) 2. 検討可能性のある内容

現行地震保険の改良

具体的には、現行の個人の住宅用地震保険については、普及率や支払額等が充分でない指摘されることが多いが、以下のような市場メカニズムの更なる活用を検討することが可能であろう¹³。この際には、既に指摘されているように、国民が自身で被害を軽減するインセンティブを失いモラル・ハザードに陥らないようにするため、明確・適切な耐震基準を設けたうえで、建物の耐震性能に応じて地震保険料を連動させること、地盤等の違い、木造建物の密集度など県単位より細かな地域ごとのリスク・ファクターも可能な限り連動させることが重要である¹⁴。

ア) 政府の地震保険制度における役割を、高レイヤー (= 1兆円を超える保険金支

¹² 自然災害の被害にとどまらず、国家の収入一般に関するリスク（例えば、税収が大きく変化するリスク）について、個人・企業等を主な参加者とする民間主導の新たな国際的市場を創出し、金融工学的な手法を応用して国際的な契約を結ぶことで、リスクヘッジする可能性について議論するものとして、Shiller(1993)。京都大学藤田昌久教授も、国際援助の1つの手段として国際的スワップの仕組みを提唱するR. Merton ハーバード大学教授のアイデアを基に、地方分権後の我が国の地域主体間におけるリターン（収入）スワップの仕組みを提唱している。（国土交通政策研究所講演録「空間経済学からみた国土交通政策」2001年12月 pp66-69）

¹³ この部分は、齊藤(2000)「自然災害リスク・マネージメントにおける市場システムと公的システム」pp157-158を参考に記述した。

¹⁴ 米国においては、洪水リスクに関して、連邦緊急庁(Federal Emergency Management Agency, FEMA)・地方自治体・抵当権提供金融機関・住宅所有者が参加する国家洪水保険プログラム(National Flood Insurance Program)が運用されている。そこでは、連邦政府の洪水保険と、関連自治体による洪水災害計画の策定、治水事業、洪水被害マネージメント(洪水被害に関する地図作成、住居の高上げ措置、住居の移転など)等の措置、連邦の関連する住宅用抵当権提供サービスが有機的に組み合わせられている。(www.fema.gov/nfip/fpm.htm)

払部分)に対する再保険キャパシティーの提供に純化していくこと。(逆に中・低レイヤーについては、民間市場に委ねてゆくこと。)

例えば、全国的に確率的な地震動予測地図が公表されることにもない、政府は1兆円までの中層以下のレイヤーに対する再保険から撤退し、現在のレベル以上のレイヤー部分の再保険に特化し、撤退した部分については、民間保険会社等の保険サービスに関するイノベーションによる多様なリスク・ファイナンス・サービス提供を促していくこと。

イ) 政府が(国内・国際)民間再保険市場において、再保険契約を結ぶこと。

政府が、CEAが行っているような再々保険契約により欧州等の地域における引き受け者に地震リスクを移転することを通じて、直接の国民負担を分散すること。これにより上記の高レイヤーの再保険キャパシティーに純化することも容易になる。

ウ) 政府自らが(又は政府保証等を受けた日本地震再保険株式会社)が(オリエンタルランドが発行したような)キャット・ボンド(Catastrophic Risk Bond)を発行すること¹⁵。

後に述べるように、地震リスクに関しては、個々の損害発生に相関性が想定されることから、保険以外の金融イノベーションによる社会的効用が向上する可能性が高いと考えられ、保険システムに地震デリバティブのような別の手法を組み合わせるべく手法については十分検討に値するのではないかと考える。

なお、ウ)の地震キャット・ボンドについては、地震の発生は、経済活動と相関が低いと考えられるため、経済活動がグローバル化し経済活動に関する金融商品同志のみではリスクヘッジ効果が減少していると考えられる現在、大変有望なリスク分散効果を投資家にもたらすと考えられる。これにより、後に述べるように、社会的な効用が改善し得る。

政府の保有する自然災害リスクに関する市場メカニズムを通じたリスク・ファイナンス

より大きな(地震保険を含む)より巨視的に、政府の引き受けている自然災害リスクに関し、以下のような市場メカニズムの活用についても、少なくとも、検討しうる。

ア)(ICAOが提案中のテロ対応の国際的保険メカニズムのような)国家間の自然災害リスクに関する相互保険

イ)(通貨流動性リスクに関する二国間スワップ協定(フェニイ・メカニズム)のような)自然災害リスクの二国間スワップ協定の締結(同種のリスク・スワップ。これの変形として、我が国の損害保険会社が海外の損害保険会社との間で地震リスクとハリケーンリスクをスワップしているように、地震保険リスクの一部を引き受けている我が国と洪水リスクを引き受けている米国の間の例のような異種の自然災害リスクのスワップも

¹⁵ これらの例のうち、Cat Bondについて、例えば、オリエンタルランドが行った地震債券(元本非保証型)に倣い、同様の条件(年手数料を実勢レートから約7.8%とする)により、政府(地震再保険特別会計)が、民間と共同(1/2ずつ)で引き受けている5,000億円のレイヤーについて証券化を行った場合、(為替リスク等を考慮しない前提で)5年間にわたり毎年約390億円の支出と引き換えに、地震発生時に迅速に5,000億円を受け取れる権利を得ることとなる。(事後的に同額を返還する必要はない。)なお、カリフォルニア地震庁もCat Bond発行を計画したことがある。山口(1998)pp171-172が詳しく説明している。

考えられる。)

なお、我が国財務省は、長期国債の金利上昇リスクをヘッジするため、市場との間で、金利スワップ契約を既に締結している。この契約により、金利の大幅な上昇リスクは、将来の国民負担から市場へヘッジされている。(金利上昇リスクの「市場化」の例)

政府の関与から外れた部分のリスクは、自立した個々の個人・企業がそれぞれのリスク選好に応じて自由にリスク・ファイトできる市場環境を整え、そのため政府が支援することが必要。

こうした措置を重ねる一方で、自立した個人・企業が自己責任の下に、それぞれのリスク選考にしたがい自由にリスク・ファイトできるような環境整備が大変重要である。国家の保有するリスク・マネジメントにとどまらず、国家を構成する個人や企業、自治体などが、国際的な大きな市場において、自由にリスク・ヘッジすることが、真の意味で、巨大リスクを国家全体としてマネージすることにつながる。

言うまでもなく、個人・企業が自立して地震リスク・ファイト・マネジメントを実行するためには、確率的地震動予測地図のような、地震リスクに関する十分きめ細かい情報提供が前提である。この点、専門的な知見を有する国土交通省をはじめとする国家機関の役割は、学術・研究機関と共に大きいものがある。

また、個人・企業がリスク・ファイトを行うのに必要な、許容量と流動性を備えた新たな国際的な取引市場を形成するためには、多大のコストがかかる上に、金融工学的な手法については、複製されるのも大変早く、市場手法のみでは過少投資になることが既存の研究で指摘されている。この意味でも、使いやすい指標(インデックス)の開発を各方面の専門的な知見を結集して行うこと、また、新たな市場における弱者・一般利用者の保護等公正な取引実現のために、リスクに関する専門的知見を有する国土交通省他の関与についても十分研究なされるべきと考える。

(3) 3. 今後への視点

これら手法について、詳細に論ずることは別の機会に譲るが、3点のみ触れる。

二国間スワップ協定の場合には、合意内容の設計により、相互保険の場合における毎年の保険料支払や、Cat Bond の場合の毎年の手数料支払のような、毎年確実に行われる相当額の支払がない点が利点となる。反面、リスクを交換するに適切な相手国の選定、交換対象とするリスクの選定、リスク交換の条件(等リスク交換か、非等リスク交換か、非等リスク交換の場合はいかに、微調整するかなど)を決定する点に難しさがあると思われる。

キャットボンド(地震債券)等の発行をはじめとする金融技術のイノベーションにより、社会的な効用を高めるか否かについては、以下の各観点から検討する必要がある¹⁶。

- イ) 地震リスク市場参加者に普遍的に影響を与えるか(リスクが完全相関か)否か。
- ロ) 地震リスクを扱う金融商品・技術が現在存在するか(リスク市場が完備か)否か。
- ハ) 地震リスクを扱う保険があれば、逆選択、モラル・ハザードの程度はいかほどか。

¹⁶ この部分は、野口・藤井(2000)「リスクのタイプと金融技術の意義」pp161-171 に拠った。

地震債券など金融イノベーションによる社会的効用改善の可能性

リスク関連の程度	完全相関 (普遍リスク)	ゼロ相関 (個別リスクのみ)
社会的効用改善可能性	市場が従来、不完備 イノベーションによる効用改善 (市場の完備化) 市場が既に完備 (改善は取引コスト減等のみ)	原則可能性なし 保険・分散投資 (保険に逆選択やモラル・ハザードがある場合には改善の余地あり。)

完全相関・普遍リスク :市場参加者に等しくあまねく影響

ゼロ相関・個別リスク :市場参加者ごとに独立に影響

地震リスクが、市場参加者に等しくあまねく影響を与える（完全相関する）場合で、現在適当な商品がない（不完備な）ときには、投資家の嗜好によりきめ細かく対応する新たな地震リスク商品を考案することにより、社会全体のパレート改善が図られる。地震は巨大で、全国的な影響を与えるとはいえ、全員に等しく影響を与るとまではいうのは相当強い仮定であり、注意を要する。他方、完全相関リスクについても、市場が完備で、つまり、新たな地震リスク商品は、複製にすぎないリダンダントな場合には、既存商品のみを用いているに過ぎず、新商品の提供できる便益としては、それら既存商品に比べ取引コストが安くできる等の、いわば改良的な点にとどまる。

地震リスクが、（実際には考えにくいだが、整理のため仮に）市場参加者に全く個別・独立の影響しか与えないとする。この場合には、結局、多人数のリスクを集めてプールする保険機能を活かすか、分散投資により個別リスクをできるだけ下げることがえられるが、市場が仮に不完備であっても、保険と分散投資により、リスク低減が充分可能であるため、金融イノベーションの大きなインセンティブはないものと考えられる。

また、地震リスクについては、国民に対し全く個別・独立の影響しか与えないとは考えにくく、全国的に（全く同一ではないにせよ）ある程度あまねく影響を与える（ある程度の普遍性をもったリスクである）と経験上考えられる。こうした中間的リスクについては、市場が不完備な場合にとどまらず、完備な場合においても、金融イノベーションによる社会的取引コスト削減等、便益改善の可能性が あることになる。この点には、より地震リスクに即した、詳細な理論的、実証的研究が必要と思われる。

リスクヘッジに関する金融技術を用いる場合には、制度的な障害、不備について、充分精査する必要がある。

ア) 国内法については、例えば、刑法の賭博罪の構成要件は、大変広く規定されてい

るため、どこまでが許される正当な経済活動を定めて、この点に関する予測可能性を高めることがリスク・ヘッジ技術の普及・発展のためにも、大変重要である¹⁷。これ以外にも、5年程度を超える中期のリスク・ヘッジ契約を国が締結する場合の現行の官庁会計処理制度上の扱いなど精査を要することになる可能性がある。

- イ) リスク・ヘッジを、国際市場において考える場合には、より根源的な注意が必要である。なかんずく、資本市場成立の前提条件として、所有権（知的な、無形的な所有権も含む）の保護と、約束履行（強制のシステム）が必要とされているが、国際社会においては、これらが十分に確立していないため、現状においては、少なくとも執行段階において、いずれかの国（又は国連などの国際機関）の管轄権下において、権利を実現していくことになる。こうした構造は、国家内で収まっていたリスクについて、国外の制度を利用することに伴う新たなリスクを抱えることにつながる。

(参考)

地震債券などのデリバティブ（証券化）商品と保険との比較

デリバティブの利点

1. 支払金額が明確

損害額を調査・確定し、控除等を差し引く手続きなく、あらかじめ約定された金額が支払われる。

2. 契約執行手続きが簡潔

保険支払のための調査などが省略され、通常の契約債権回収の手続になる。

3. 国際的な資本市場を直接利用できる。

国際的な資本市場は、保険業界や再保険業界の資金量を大幅に上回る大規模な資金量を有し、大変流動性が高い点で使いやすい。例えば、米国だけで資本市場の資金量は約19兆ドルで、保険(再保険)業界の自己資本量約2,000億ドルに比べ、90倍を超える資金量となっている。また、米国の資本市場1日の標準的な変動量は、約1,330億ドルといわれ、保険業界の自己資本量の2/3以上の資金が1日に流動する。

4. 特定目的会社(SPC)と信託勘定の利用による確実な資金プールにより保険会社の倒産リスクを遮断できる。

証券化は、通常、海外の資本市場にアクセスするため、海外の特別目的会社(SPC)が、投資家から得た資金を、信託勘定にプールしていることを背景に、低利で社債を発行することが普通である。これにより、通常の保険や再保険で見られる、保険会社や再保険会社が、巨額の保険金支払のため倒産する危険性を回避できる。

¹⁷ 刑法の単純賭博罪の包括的処罰規定の問題点を指摘するものとして、例えば、平野(1977)p251、中森(1996)p272。逆に公認される範囲を制限すべきとするものとして、大塚(1988)p1041。また、賭博罪・取引法等と金融デリバティブ全般との関係については、福島(1997)pp27-42。

保険の利点 = デリバティブの不利な点

1. 新しいため習熟のコストが必要

仕組みが伝統的な保険商品とことなるため、内容やリスクを関係者全体が理解し利用するために時間的、金銭的なコストがかかる。

2. 新たな仕組みなので新たなリスクがある。

(国際市場を利用するため) 外国為替リスクや国際的な債権の執行手続きに伴う新たなリスクが生じる。このリスクを、通貨スワップなどでヘッジするためには、新たなコストが生じる。

3. 制度的な問題点が未整理な部分がある。

国内法では、刑法の賭博罪の構成要件に該当するのではないか、国際的部分では、約束履行システムが充分機能しないのではないか、など法制的な面の精査が必要となる。

第4章

不確実性を考慮した柔軟な意思決定方式（リアル・オプション）の国土交通行政への導入

第4章 不確実性を考慮した柔軟な意思決定方式（リアル・オプション）の国土交通行政への導入

4- 1 なぜ、リアルオプション？

企業においては、1 円入札やコスト割れ入札が話題になるなど、従来の意思決定方法（NPV 法など）によってでは、行動の費用の方が直接的な利益に比べて大きいことから、非合理と思われる行動がなされることがある。これは、よく言われるように、将来の不確実性を減らすための学習費用と考えることができる場合があること、一旦受注した契約から引き続き段階的な拡張契約が得られる可能性があること、受注により導入されたシステムに関する維持管理やコンサルティングの受注可能性が高まることなどを考慮すると、正当化されると思われる。しかし、このようなダイナミックな企業行動を直接評価できる意思決定方法は、従来の手法では十分でなかった。これに対し、不確実性を考慮して、先行投資の学習効果や、事後的な拡張の可能性などを考慮に入れて、現実のダイナミックな企業行動を評価する手法として、リアル・オプション意思決定法が提示されてきている。

4- 2 なぜ、国土交通省が？

国土交通省の所管する空港など交通関係社会資本の整備については、個別のプロジェクトの投資規模が時に 1 兆円をこえるような大規模なものがあり、また完成までに 10 年を超えるような長期間にわたるプロジェクトも多い。こうしたプロジェクトは、一旦開始されると容易にやり直すことができない（又はやり直すために相当の費用がかかる）という性質（不可逆性）を有するプロジェクトが多い。この不可逆性ゆえに、個別のプロジェクトは、そもそも大規模投資であるため慎重にさまざまな不確実要因を検討する必要があることに加え、長い投資期間中に、経済情勢や社会情勢、自然的条件、技術水準など様々な不確実性が計画段階と比べて大きく変動することも多く、より一層慎重に、さまざまな不確実性を、長期にわたり考慮する必要性が高い。

国土交通省は、社会資本の整備のほか、交通市場における経済的規制や環境規制など幅広い行政分野において、多くの政策が実施されている。こうした規制については、それぞれの市場におけるミクロ的な競争環境のほか、マクロ的な経済環境や、科学技術水準の変化、国民の嗜好等の数多くの不確実性が有機的に関連しており、こうした多くの不確実性を同時に考慮して規制等の政策内容、政策実施時期などの判断を行うべきである。この点、従来の意思決定手法は、不確実性を考慮する方法に制限が多く比較的単純な方法のみが許されるなど、以下に述べるように、不確実性を明示的に扱う場合に、必ずしも十分な手法とはいえない面があった。

4- 3 従来の方法（NPV法 / CBA法等）と限界

(1) 現在用いられている手法とリアル・オプション・モデル

(1) 1.従来の手法について

従来、企業の意思決定方式や、社会資本整備に関する意思決定方式においては、純現在価値（Net Present Value）法（NPV 法）や、割引キャッシュフロー（Discounted

Cash Flow)法(DCF法)、費用対効果分析法(Cost Benefit Analysis, CBA)などが用いられてきた。厳密には、さらにそれぞれの手法を改良した手法が盛んに提案、使用されている。例えば、単純なDCF法について、割引率を資金の調達手段である株式と債券の割合により加重平均した加重平均割引(Weighted Average Cost of Capital)法(WACC法)や、CBAについて、効果を金銭評価可能なものに限定するなどした、費用対便益分析などである。

細部において様々な変更があるものの、こうした従来手法に共通する要素をまとめると、以下の3点になると思われる¹⁾。

ある意思決定をもたらす結果について、関連する将来のキャッシュ・フロー(コストとベネフィット両方について)を何らかの方法で予測
幾つかの候補のなかから合理的と思われる適当な割引率(考慮期間において一定)により、
のキャッシュ・フローを現在価値に(コストとベネフィット双方について)割り戻す。

現在価値になったコストとベネフィットを合理的な方法により比べて、後者が前者より大きい場合に、当該意思決定を実行する。

(1) 2.従来手法の限界について

こうした3点を不可欠の要素とする従来意思決定手法には、こうした3点それぞれについて、以下のような限界があった。

(将来のCFを予測)

予測が誤る不確実性については、(感度分析によるなど)限定的にしか考慮できない。

(一定の割引率で現在価値に割引く)

関連する将来期間の途中において、経済情勢が変化する、技術条件が向上する、国民の嗜好が変化するなどにより不確実性が変化することを考慮したり、複数の不確実性変化を同時に考慮することができない。

(コストとベネフィットの現在価値を比べて意思決定する)

結局、コストとベネフィットの現在価値いずれが大きいかにより結論がでるため、実行するかしないかという択一判断を行うのみ。若干の間実行を延期して情報の集まるのを待つという第3の意思決定をしたり、段階的に実施して途中で微修正の余地を残すなど、柔軟な意思決定を考慮できない。

(1) 3.従来方法における限界の例

国土交通関係社会資本整備については、事前の評価等のため、費用対効果分析のためのマニュアルが実務家のために用意されている。そこでは、鉄道、空港、道路等のモード毎に不確実性に対応するため、原則的な費用対効果分析を行う際に仮定してい

¹⁾ Copeland・Antikarov(2001)「〔決定版〕リアル・オプション」などに拠った。

る社会的割引率や需要等の要因について、一定の方法で変化させて結果を調べる感度分析（Sensitivity Analysis）をするよう求めている。これは、NPV法で使用した前提条件において、一定値に固定している、社会的な割引率などの数値を、一定のルールにより変化させてみることにより、結論にどの程度の影響が生じるかを分析する手法である。（静学的分析）

以下に、現在、国土交通関係社会資本において用いられている費用効果分析マニュアルにおいて、感度分析がどのように行われているかを示す。

交通関係社会資本整備についてのマニュアルの感度分析			
項目	鉄道	空港	道路
社会的割引率	6%(基本値は、4%)	6%(基本値は、4%)	特に規定なし(基本値は4%)
総需要	総交通量予測の0.9倍	需要予測の前提条件を変化させたケース	総交通量もしくは対象道路交通量の0.9倍と1.1倍
建設期間	想定期間の1.1倍	想定期間+2年(共用開始を2年遅延)	想定期間の1.2倍
総費用	総費用予測値の1.1倍	総費用予測値の1.1倍	総費用予測値の0.9倍と1.1倍

出典：「自由化時代の交通政策」藤井彌太郎監修 東京大学出版会 2001年 p93

(1) 4. リアルオプションの場合は、より柔軟に不確実性をモデル化できる。

ここに示されているように、社会的割引率については、鉄道と空港については、4%か6%かの2つの例しか分析できず、かつ、金利の変化に関し、いかなる前提で考慮してこの2つの金利水準を調べることと判断したのかについては示していない。リアル・オプション法によれば、後に述べるように、本プロジェクトに関する期待収益率について、完備市場の仮定を導入することで、具体の期待収益率がいかに変化しようとも、リスク・フリー・レート（国債金利）のみを用いることが妥当であることを理論的に導くことができるとができるほか、より詳細に、バブル崩壊から低金利時代へ、また、中程度のインフレ時代の到来など、途中段階でのダイナミックな金利変化をモデルに導入することも可能になる。

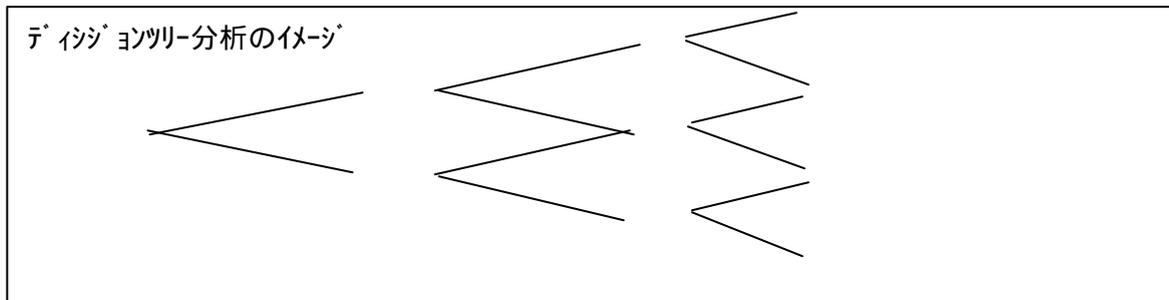
(2) その他のモデルとリアルオプションとの関連

(2) 1. イベントツリー分析(Event Tree Analysis) 主体に決定権自体なし

初期状態から次期への変化を、良い状態と悪い状態などに分け、それら各状態のペイアウトにそれら状態毎の発生確率をかけることにより期待値をもとめ、将来状況を予測する手法。通常は、すべての状態のペイアウトと発生確率が求められることが必要となる。このイベントツリーは、意思決定という要素を考慮しないため、当然、意思決定の柔軟性をも考慮できない。こうした、イベントは、ツリーのなかで、で表されることが通常。

(2) 2. ディシジョンツリー分析 (Decision Tree Analysis) 意思決定を加味

上記のイベントツリーに加えて、一定のルール（例えば、期待値が一定値以上でない
と投資を実行しない）に従い、ツリーの分岐点（ノード）毎に、意思決定者が取りう
る判断の構造を洗い出し、このような意思決定が行えるという柔軟性を正面から扱っ
て、プロジェクトの価値を計算し、意思決定全体の分析を行うものである。意思決定
の分岐点は、イベント（ ）と区別して、 で表されることが通常。



(2) 3. リアル・オプション分析 (Real Option Analysis) 柔軟な意思決定を評価

リアル・オプション分析の簡単なイメージは、次のようになる。最初に、イベントツリー
分析などを用いて単純な NPV 分析を行い、意思決定を加味しない、客観状況のみに左
右される状況におけるプロジェクトの価値を算出する。このイベントツリーのイベン
ト（ ）の幾つかを意思決定できる分岐点（ ）に変え、さらにその意思決定に柔軟
に判断できる構造を加味する。（例えば、コスト割れしたらプロジェクトは実施せず延
期するなど） こうすることにより、択一的に実行するか否かという硬直的な意思決
定だけにとどまらず、延期して情報収集する、段階実施するなどの柔軟な意思決定構
造も加味してディシジョンツリー分析を行い、すべての分岐点における柔軟性の価値
を含むプロジェクト全体の価値を評価することができるようになる。

こうした意味で、リアル・オプションは、従来の NPV 法等を否定するものではなく、
柔軟性を考慮できないなどの欠点を補うものであり、NPV やディシジョンツリー分析
をベースにした手法であることは確認する必要がある。

4- 4 リアルオプションとは？

(1) リアルオプション意思決定法

リアル・オプション意思決定法は、不可逆性を有する行動（容易にやり返しができ
ないような決断、行為、コミットメント。大規模投資、就職、結婚など）などについ
て、不確実な状況において、いかなる意思決定を行ったら良いのか、に関する分析を
行うものである。

オプション（選択権）とは、情報が明らかになった将来において何らかの行為をと
ることができる認識されている機会又は（行為をする義務はないとの意味で）行為

をすることができる権利と定義される。対象となる行為の対象が、金融資産の売買などに対して、交通関係プロジェクト実施等の実物資産に関する行為であるため、リアル（実物）なオプション（選択権）と呼ばれている。

参考に、京都大の刈屋教授のリアル・オプション評価法（Real Option Valuation, ROV）についての定義を紹介する²。

「意思決定問題に内包する不確実性に関して、意思決定者に与えられている選択権(の構造)」

ここでは、不可逆性を有する行為以外の行為も含む意思決定のうち、不確実性を考慮した意思決定の方法が本質としている。注意すべきは、リアル・オプション理論は、単なる分析ツールではなく、ツールとそれを用いる思考方法が一体化した、意思決定方法そのものである点である。例えばブラック・ショールズ（BS）の公式は、この意思決定に不可欠の要素ではなく、別のツールを用いて行う、又はそれらを組み合わせて行う場合であっても、上記のように、金融資産以外の実物資産や現実生活における決断などについて、不確実性を考慮した意思決定の方法である限り、リアル・オプションである、と考えられる。

金融資産に関するオプションを、企業の負債と株主の構造に置き換えて考える（負債を負う会社の株主は、負債を返済して会社を買い戻す権利を有することになる。）ことは、1973年に、金融オプションの評価に関する論文において既に、F. Black 及び M. Sholes が提唱している。1980年代になり、R. Merton と MIT の S. Myers などにより、real option という名称が考案され、用いられるようになった。その後、金融オプションの考え方を、負債を有する会社の価値評価へ適用することや、採掘権や電力プロジェクトなどの実物資産へ応用することが盛んに議論されるようになり、1990年代に、エネルギー市場、医薬品開発市場等を中心に活用事例が盛んに研究され、現在に至っている。

(2) 金融取引に関するオプションについて

(2) - 1. 金融オプションに関する典型例としてコール・オプションについて

金融取引において取引されるオプションは、将来の一時点において、あらかじめ定めた権利行使価格により、一定の株を取得する権利のことを指す（一定時点のみにおいて行使可能な場合は、ヨーロッパン・タイプ・コール・オプションと、一定時点までの間にいつでも行使可能な場合を、アメリカン・タイプ・コール・オプションという。）

ヨーロッパン・タイプ・のコール・オプションについて、その価格評価を行ったのが、F. Black 及び M. Sholes による有名なブラック-ショールズ（BS）の公式である。彼ら2人と議論を重ね、ほぼ同時に、R. Merton も別手法により同様の結論に達していた。この3人のうち、死亡したF. Blackを除いて、M. Sholes と R. Merton には、1997年ノーベル経済学賞が授与された。こうした経緯から、ブラック-ショールズ（BS）の

² 刈屋武昭（2001）：「金融工学を利用したリアルオプション事業リスク評価」

公式は、しばしば、ブラック-ショールズ-マーソンのモデル、とも言われる。

(2) 2.ブラック-ショールズ(BS)の公式について

ここでは、BS 公式の結論をまず説明し、必要な範囲においてその導出過程や前提とする仮定について、必要最小限で、触れることとする³。特に、行政の意思決定者にとっては、数学的な証明等より、BS 公式の前提条件、論理的流れ等を出来るだけ正確に理解し、本公式の制約を正しく理解することが最重要と考えることによる。

ブラック-ショールズ(BS)公式

コールオプションの価格

$$c = SN(d_1) - Xe^{-rT} N(d_2)$$

プットオプションの価格

$$p = Xe^{-rT} N(-d_2) - SN(-d_1)$$

$$d_1 = \frac{\ln(S/X) + (r + s^2/2)T}{s\sqrt{T}}$$

$$d_2 = d_1 - s\sqrt{T}$$

(凡例)

c : コールオプションの価格

p : プットオプションの価格

S : もととなる株価

X : オプションの権利行使価格

T : オプションの満期までの時間

r : (リスクフリー) 利子率

s : 株価利益率のボラティリティー

$N(d)$: 標準正規確率分布関数

³ 野口・藤井(2000) : 「金融工学」が導出過程について相当詳しい記述を割いている。株価のランダムさを定式化するにあたっては、アインシュタインが定式化を考慮したいわゆるブラウン運動の数式表現をベースにしたことや、熱伝導に関する微分方程式解法の考え方を使ったこと、更に日本の伊藤清京都大学名誉教授の確率過程に関する微分、積分についての考え方が重要な役割を演じたことなどが紹介されている。

(2) 3. コールオプションの価格とBS 公式の各要素の関係⁴

以下にその公式に入力する必要のある要素と、その変化が、コール・オプションの価格にどのような変化をもたらすのかの表を参考に掲げる。

BS 公式の要素	変化	コール・オプションの 価格変化
株価 (S)	増加	増加
行使価格 (X)	増加	減少
リスクフリー利率 (r)	増加	増加
行使期限までの時間 (T)	増加	増加
株価のボラティリティー ()	増加	増加

(注) ただし、r と については、上記は直接の効果。間接的には、例えば、r の増加は、株価 (S) の減少を招き、間接的にオプション価格の低下につながる可能性あり。

(2) 4. ブラック-ショールズ(BS)公式における仮定

BS 公式は、以下の仮定のもとに導出されている⁵。

株価 (S) は、期待収益率 (μ) とボラティリティー () が一定という条件のもとで、対数正規分布に従う (= 株価の変化は、幾何ブラウン運動にしたがう。)

取引コストや税金はかからず、全金融商品は完全に分割可能である。

オプション期間中の株式配当はない。

無リスクの裁定 (arbitrage) 機会はない。

証券の売買は、連続的に行うことができる。

投資家は、同じリスクフリー利率で借入と預入ができる。

短期のリスクフリー利率 (r) は、一定である。

(2) 5. ブラック-ショールズ(BS)公式の導出過程について

先に述べたように、BS 公式は、ブラック-ショールズ-マートン 3 者の議論により導出されたので、ブラック-ショールズ-マートン・モデルとも呼ばれる。以下には、通例、ブラック-ショールズ-マートン・モデルとして紹介される考え方にしたがって、BS 公式の導出過程の要点を説明する⁶。

(2) - 5 - (1) コール・オプション(株を買う権利)の対象となる株価の変化率は、幾何ブラウン運動にしたがう(株価の対数は、正規分布にしたがう)と仮定する。

オプションは、株を買う権利であるため、オプションの価格 (C) の変化は、基となる資産である株の価格 (S) の変化に連動する。株価の変化は、以下のような幾何ブラウン運動で示されるモデルにしたがうものと仮定する。ここで、期待収益率 (μ) とボラティリティー () は一定とする。(BS 公式の仮定)

⁴ Brealey・Myers(1991) p499

⁵ John Hull(三菱銀行訳)(1994) pp345-346

⁶ Black・Sholes(1973)、Merton(1992)、Geman(1999)p5-6 などに拠った。

幾何ブラウン運動の確率微分方程式：

$$dS = \mu S dt + \sigma S dz$$

$dz = e\sqrt{dt}$ (拡散過程又は Wiener 過程の表現式)

$e \sim N(0,1)$ (確率変数 e が標準正規分布にしたがうとの表現式)

$\Rightarrow \ln S \sim N(\ln S_0 + (\mu - \frac{\sigma^2}{2})T, \sigma\sqrt{T}$ (変形すると対数正規分布にしたがう表現式となる。)

この点は、過去の実証研究に基づき、現実の NY の株式指数 (実質) の変化が、 $\mu = 0.09$ (年 9%) とし $\sigma = 0.2$ (年 20%) とした幾何ブラウン運動のモデルにしたがうことが明らかにされていることに基づく⁷。

(参考)

実証研究に基づく (ニューヨークの) 株価指数の変化に関する幾何ブラウン運動のモデル：

$$dS = 0.09 S dt + 0.2 S dz$$

また、オプション価格 (C) は、時間 (t) と株価 (S) の関数と考える。数式は以下のようなになる。

$$C_t = f(t, S_t)$$

ここで、この式について参考を示した伊藤の公式を適用し、整理すると以下を得る。

$$dC_t = \frac{\partial C_t}{\partial t} dt + \frac{\partial C_t}{\partial S_t} dS_t + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 C_t}{\partial S_t^2} (dS_t)^2$$

(参考) 伊藤の公式：

確率的な変数 x が以下の幾何ブラウン運動すると仮定する。

$$dx = \mu x dt + \sigma x dz$$

2変数の関数 $F(x, t)$ を考え、全微分をとると、近似的に以下の式が成立する。

$$dF = \frac{\partial F}{\partial t} dt + \frac{\partial F}{\partial x} dx + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 F}{\partial x^2} (dx)^2$$

(2) 5 - (2) 市場の完備性 (一物一価の原則) を仮定し、オプション (C) は、株価 (S) との組

⁷ ディキジット・ピンディック (2002) 「投資意思決定理論とリアルオプション」 pp90-91

み合わせるにより、リスクのない資産に複製可能であるとする。

市場の完備性は、市場内においてある資産は、他の資産を用いて複製可能であることを意味する。このため、ある資産の価格が一時的に理論値から乖離すると、複製資産との価格差が出現し、これが利得機会になることから、瞬時にその乖離差を解消する裁定取引がなされることにより解消され、理論値に収束していくことになる。これにより、ある資産の価格は、市場の完備性が仮定されるなかでは、ただ一つに定まることになる。金融市場においては、その流動性の高さから、まさに、このような完備性の仮定を考えることが可能であるとされている。(2) - 4 . BS 公式の仮定)

市場の完備性の原則の下、オプションは、株とリスクのない安全資産の適当な組合せにより複製できることになる。こうしたオプション、株、安全資産の3者に成り立つ関係から、いわば式を変形し、また、適当なヘッジ割合をとることにより、オプションと株とを組み合わせるポートフォリオ (V) を作成することにより、安全資産が複製できることになる。また、そのポートフォリオ、すなわち、安全資産の価格変化は、リスクフリー・レート (r) にしたがうことになる。

数式で表現すると、安全資産も、オプション (C) と株 (S) からなるポートフォリオ (V) により複製可能である。また、安全資産の価格変化は、原資産の価値にリスクフリーレートと時間をかけた分により表されることになる。

$$V_t = C_t + dS_t$$

$$d = - \frac{\partial C_t}{\partial S_t}$$

$$dV_t = rV_t dt = r(C_t - \frac{\partial C_t}{\partial S_t} S_t) dt$$

資産 V の変化について、V の全微分により表現すと以下ようになる。

$$dV_t = dC_t + dS_t$$

これらについて、式を整理して dV を消去すると、以下のいわゆる基本的な微分方程式が導出される。

ブラック-ショールズの公式に関する基本的な微分方程式 :

$$\frac{\partial C_t}{\partial t} + rS_t \frac{\partial C_t}{\partial S_t} + \frac{1}{2} \sigma^2 S_t^2 \frac{\partial^2 C_t}{\partial S_t^2} - rC_t = 0$$

この基本的な微分方程式は、第1項と第3項に注目すると、熱力学で有名な熱伝導方程式と同じ基本構造をしていることに注目し、熱伝導方程式に関する解法を用いて、

かつ境界条件として終末時期 T における選択権の構造 (= コストを上回れば実施し、コスト割れするなら実施しない。) を考慮し、この基本的な微分方程式を解くと、先に掲げた B S 公式が得られる⁸。

(参考)

熱伝導方程式 :

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$$

境界条件 :

$$C_T = \text{Max} [S_T - X, 0]$$

(2) 5 - (3) 無裁定性の基本原理、市場の完備性、マルティンゲール性、一物一価の原則の関係について

「無裁定性の基本原理」は、価格決定に関する原理であり、「金融商品などの価格は、リスクなしで確実な利益を得る機会（裁定機会）を排除されるように調整されて市場にて決定される」とするものである。「市場の完備性」は、無裁定性の基本原理を背後から支える市場そのものに関する基本的な考え方であり、「市場において、ある商品が他の商品を用いて一意的に複製可能であること」を内容とする。また、「マルティンゲール性」とは、株等の価格のように値が時系列的に確率的な変動をするもの（確率プロセス）について述べるもので、「基準資産をもとに測った資産の相対価格に関する現時点までの情報をもとに、将来のその資産の相対価格を最適に予測すると、上昇も下降も予測できず、現在の相対価格自体となる（相対価格の平均的不変性）」ことを内容とする。また、このような性質を有する確率プロセスをマルティンゲールという⁹。「一物一価の原則」は、単に同じ商品については一つの価格が成立しているという考え方を述べるにすぎない。

「無裁定性の基本原理」、「市場の完備性」及び「マルティンゲール性」の諸概念は、金融に関し数理的な議論を行う場合の中核であり、その重要性を強調しすぎることはできないほどであるものの、厳密な議論の詳細を展開するためには、確率の抽象的な定義や連続時間・有限時間に関する厳密な議論が避けられず、本報告書の範囲を大幅に越えると思われるので、中心となる以下の部分を簡単に紹介して、その他は参考文献に譲ることとする。

（有限時間など）一定の条件の下、ある市場において、以下の 3 つは同値であることが明らかにされている。

市場において適当な同等確率測度により価格などの確率プロセスがマルティンゲールとなること（マルティンゲール性・完備性）

⁸ 具体的な解法の詳細等は、例えば、野口・藤井(2000)「金融工学」pp199-202。

⁹ 刈屋(2000)「金融工学とは何か」pp134-143 などを参考にした。

市場において、裁定機会がないこと（無裁定性）

市場において、単一の価格システムが成立すること（一物一価の原則）

本報告書において以下議論を進める際には、数学的に厳密ではないものの、判りやすさを重視して、「（金融市場などにおいて）市場の完備性を仮定できれば、価格に関する確率プロセスにマルティンゲール性が成立するなどの条件の下、無裁定性の基本原理に従い価格が形成されるので、一物一価の原則が成立する状況になりうる」と考えていくこととする。やむを得ない場合を除き、こうした大まかな議論以上に細かい前提条件については言及しない。

(2) - 5 - (4) その他理想的な市場としての仮定

B S 公式の導出にあたって、厳密にいうと、幾何ブラウン運動と市場の完備性という 2 つの仮定と密接に結びつくものとして、金融市場に特有の仮定が存在する。情報の取引コストが低く、いわゆる効率性命題が成立すること（(2) - 4 . B S 公式の仮定、 λ ）、多数の参加者が大量取引を行うことで大変流動性が高いこと（(2) - 4 . B S 公式の仮定、 μ ）がある。また、典型的な競争市場であり、そこでは、株に関する売り手と買い手双方において、参加者は多数であり、独占・寡占市場におけるような市場支配力がある参加者はいないことも仮定できる。こうした金融市場に典型的な仮定に加えて、オプション価格評価導出にあたり必要となる単純化の仮定として、期間中の配当が無いこと（(2) - 4 . B S 公式の仮定 d ）と短期のリスク・フリー・レート（ r ）は一定であること（(2) - 4 . B S 公式の仮定 r ）を加えると、B S 公式解法に必要な条件が全て整理できることとなる。

4- 5 金融オプションとリアルオプション

(1) 金融取引のコール・オプションとリアル・オプションとの関係

空港等の交通社会資本に関し、投資機会を有する意思決定主体は、金融取引でいうところのコール・オプションに近い「権利」を持つものと考えられる。つまり、その主体はある資産（プロジェクトから得られる今後の利益など）を、将来のある時点で買う権利（義務ではない）を持っており、そこで不可逆性を有する投資支出に踏み切ることは、金融取引でいうコール・オプションを「行使」(exercise)することと見なせる¹⁰。つまり、将来の時点で、事業の価値がコストを上回ると考えれば権利（リアル・オプション）を行使してプロジェクトを実施し、コスト割れしていると考えれば、権利を行使せず単純に放棄することとなる。

従って、空港整備をはじめとする投資機会をいかに活用するかという問題は、意思決定主体がここでいうオプション（＝リアル・オプション）をいかに最適に行使するかという問題に集約されることとなる。

¹⁰ ディキソット・ピンディック(2001):「オプション理論が高める経営の柔軟性」金融工学のマネジメント、p58

ブラック・ショールズ (BS) の公式と空港拡張等事業のリアル・オプションの要素比較

ブラック・ショールズ (BS) の公式	要素	空港滑走路拡張等のリアル・オプションにおける考え方
オプションに基づく株式の価値	S	事業の便益の年 0 における割引価値
オプションの行使価格	X	事業の総建設コストの年 0 における割引価値
リスクフリー利率	r	リスクフリー割引率
オプションの行使期限までの時間	T	リアル・オプションの行使期限までの時間 (年)
株価のボラティリティ	(σ)	事業からの収益 (空港拡張事業収益) のボラティリティ
コール・オプションの価格	C	事業のリアル・オプションの価格

こうした考え方により構成された空港拡張事業等の交通関係プロジェクトに関するリアル・オプションについて、その価格に決定を与える要素が変化した場合に、当該リアル・オプションの価格がいかに変化するかについて、整理すると以下のようになる。

リアル・オプションの要素	変化	リアル・オプションの 価格変化
事業の便益の現在価値 (S)	増加	増加
コストの現在価値 (X)	増加	減少
社会的割引率 (r)	増加	増加
行使期限までの時間 (T)	増加	増加
事業価値のボラティリティ ()	増加	増加

(2) ブラック・ショールズ(BS)公式を空港拡張事業等のプロジェクトへ適用する際の限界¹¹

金融市場において発達した考え方を基にしているので、必要となる仮定に十分注意する必要がある。

BS 公式は、4 - 4 の(2) - 4 から(2) - 5 において述べたような金融市場において仮定できるいくつかの大きな条件のもとに成立するものである。交通関係プロジェクトについては、以下に示すように、こうした仮定が成り立つか十分な検証が必要であり、BS 公式を用いて意思決定を行おうとする場合には、相当の注意が求められることとなる。

(2) - 1. 空港等のプロジェクトの便益の確率分布が、将来の任意の時点で、(対数)正規分布すると仮定している。(=交通プロジェクト価値の変化が幾何ブラウン運動にしたがうとの仮定が必要。)

株等の金融資産については、各種取引所や店頭取引など、高い流動性の下で長い取引の歴史があり、統計データ上も、株価の変化を幾何ブラウン運動として、定式化することが可能であることは、先に 4 - 4 (2) - 5 (1)において述べたとおりである。

さらに、金融オプション自体の価格についても、シカゴオプション取引所 (CBOE) など確立したデリバティブ取引市場があり、理論値と現実の価格とが常に検証される

¹¹ John Hull(三菱銀行訳)(1994) pp500

ほか、多くの実証研究により、株価の変動や、その他の仮定について、十分成立するとの裏付けが相当程度取られている。また、金融オプションは、規模や業界ごとに、相当程度規格化された形で、デリバティブ取引市場においてその多くが集中的に、かつ、大変な流動性をもって取引されており、この市場とそこで得られる価格は、いわゆる効率市場命題が当てはめやすい状況になっている。

これに対し、空港の拡張事業等は現実に投資事業の価値を取引するマーケットがない。したがって、金融資産と同様にプロジェクト価値が変動する仮定は、実際のプロジェクトに関して、適用する原資産に関するモデルを大幅に誤っていないか、十分注意が必要である。この点の危険性は、モデル・リスクと呼ばれる¹²。

また、空港等のプロジェクトに関しては、事業実施の責任を負う個別の国土交通省が、事業の価値評価から実施まで単独で行うのが通常で、市場を通じた客観的な評価は大変限られている。ここでは、投資主体としての国・国土交通省の技術力、管理能力等の個別的な要因がプロジェクトの価値に大きな影響を与えることとなる。こうした事業にリアル・オプションを適用する場合の危険性は、プライベートリスク、観測可能な価格の欠如、流動性の欠如などと呼ばれる。

また、実際のプロジェクトについては、現実の建設場所の海象や気候等の自然的条件等の非常に個別具体的な要素が、直接間接に将来の事業収益に対して大きな影響を与えるものと考えられる。こうした危険性についても、モデル・リスク、観測可能な価格の欠如、流動性の欠如、プライベート・リスクなどと呼ばれる。

具体の実証研究を通じたこの仮定の検証等は、今後の大きな課題の一つであるが、BS 公式を空港等のプロジェクトに適用して価値評価を行う場合には、相当大きな仮定が必要になることは否めない。

(2) 2. 市場の完備性（一物一価の原則）を仮定する必要がある。

上記の内容とも密接に関連するが、金融市場においては、取引量が多く、価格の理論値からの乖離は、資産の複製可能性を前提として、直ちに裁定取引が行われ、その価格差が解消される。したがって、価格変動リスクが同一内容のポートフォリオであれば等しく同じ価格が成立することになる。交通関係プロジェクトについて、こうした他の実物資産による複製可能性や市場の完備性（一物一価の原則）を仮定することの妥当性については、実証研究の進展を待つほかない状況であり、この点も、交通関係プロジェクトにBS 公式を当てはめる場合に必要となる仮定の強さを示すものである。

(2) 3. いわば理想的な金融市場を仮定する必要がある。

BS 公式のその他の仮定、取引コストや税金はかからず、全金融商品は完全に分割可能であること、証券の売買は、連続的に行えること、投資家は、同じリスクフリー利率で借入と預入ができることなどの仮定は、金融市場における効率性命題を含み、理想的な資本市場を想定しているといえる。当然、市場参加者は多数であり、投資機会が独占・寡占的な地位に立つ場合には、直ちに適用できるとまではいえない点、注意が必要である。

¹² 「リアル・オプションの境界」と「リアル・オプションの限界」(金融工学のマネジメント(2001)ダイヤモンド社、pp122-127)が示唆的である。

他方、現実の空港拡張事業等において、これらの仮定が成り立つか否かについては、先も述べたとおり、十分な実証的研究が不可欠と思われる。特に、観測可能な価格がなく、適切な情報が存在しないこと（観測可能な価格の欠如や流動性の欠如）プロジェクトの実施主体が一定範囲に限られる（国、特殊法人、管理株式会社）ため、規格化された大量取引からくる情報が不足していること（観測可能な価格情報の欠如とプライベート・リスク）には、注意すべきであろう。

今後の研究の方向性として参考になるのは、社会資本整備に関しては、建設・プラント業界や総合商社などがインフラ投資を行う場合にその投資へのリスクを金融当局や社債の格付け機関がいかに評価しているかである（プロジェクト評価）。プロジェクト評価において、事業のリスクをいかに定量化しているかを理解し、相当数のプロジェクトについて金融機関、格付機関等の努力によりある程度確立されたリスク評価手法を学び、金融工学で蓄積された知見と融合して、さまざまな仮定について実証的な検証を行うことが有益と思われる。

(2) 4. 大変シンプルで実務的にも使用しやすいモデルであり、必要となる仮定が実現した場合における、いわば一つの参照モデルとして用いることは可能。

BS 公式は、このような仮定を含みつつも、実証研究から大変良く現実を説明するものであることが明らかにされており、金融取引のオプション価格の導出にあたっては、なくてはならないツールとして確立している。

交通関係プロジェクトにBS 公式を用いる場合については、上記のような大きな仮定が必要とされ、全面的に適用出来る場面は、市場取引に近い交通関係プロジェクトなど、一部に限られると思われる。具体例としては、以下で分析事例を紹介する株式会社形態をとった空港の建設・管理・運営主体等の意思決定が、一定の条件に注意して、BS 公式を適用できる少ない例の一つとして挙げられるのではないかと考える。

他方、直接的な適用が出来ない場合でも、BS 公式は大変シンプルで、使いやすいため、他の複雑な手法を用いて行う場合の結果を簡易な方法で検証する、いわばクロス・チェックする手法として用いることができる場合があるのではないかとと思われる。

(参考)

民間企業において適用されるリアル・オプションについての分類例¹³

なお、民間セクターにおいて、リアル・オプションを適用して、事業の価値を評価し意思決定されたことが報告されている事例について、定性的な分類を行った場合と、適用対象事業による分類を行った場合それぞれについて、簡潔に紹介する。個々の事例については、すでに相当具体的に紹介されているので、それらの詳細については、参考文献に譲る。

1. 定性的分類によるリアル・オプションの例¹⁴

リアル・オプションについて、どのような場面に適用するかを基に、定性的な分類をすることが出来、以下のような分類が報告されている。

- タイミング・オプション（詳しい情報が入手できるまで延期する）
- 成長オプション（初期投資により、拡張する機会を獲得）
- 段階的オプション（段階的投資と各段階での評価による柔軟性）
- 撤退オプション（撤退してマイナスの投資リスクを回避する柔軟性）
- 柔軟性オプション（分散投資し固定的な結果を回避）
- オペレーション・オプション（設備の所有により生産の柔軟性確保）
- 学習オプション（リサーチに基づき学習してやり方を練り直す）

2. リアル・オプションを適用する具体的な事業の例¹⁵

リアル・オプションによる意思決定方法を、いかなる具体の事業に適用するか、という適用対象事業により、具体例を分類することも可能であり、以下のような分野への応用が報告されている。

- 石油・ガス開発事業（価格の不確実性、埋蔵量の不確実性など）
- ショッピングセンターなどの不動産開発事業（テナントと需要に関する不確実性）
- 新薬開発プロジェクト(知識技術に関する不確実性)
- IT 関連事業開発(競争相手に関する不確実性)

¹³ トゥリジオリス（川口有一郎他訳）(2001) pp4-5 に詳しい。

¹⁴ Kulatilaka・Amram(2001): 「リアル・オプションが経営戦略を変える」 金融工学のマネジメントダイヤモンド社, pp102-105

4 - 6 ブラック-ショールズの公式を用いた分析例

赤字を計上する A 空港株式会社の意思決定にリアルオプション意思決定手法を応用する例¹⁶

(1) 1. 問題の背景

株式会社形態を採用した空港について、その「赤字」が大変問題である、との指摘が最近特に良く聞かれる。また、その原因として、「甘い需要予測」による「楽観的な」事業計画がヤリダマに挙がっていることが多い。

空港については、昭和50年末頃から、民間が出資しやすい株式会社の形を取った柔軟な設置主体についての構想が具体化し、1990年時代になり、実際に国際線の就航する主要な空港を管理する株式会社（例えば、関西国際空港株式会社や中部国際空港株式会社）が出現することとなった。

そこでは、発生ベースの会計原則が適用され、減価償却費が明示されるなど、財務情報の公開の面でも企業会計原則に近い、先進的な運用がなされている。

その意味するところは、毎年度の経常損失も損益計算書上明示され、初期投資の重い負担についても、長期借入金や毎年度の支払利息の形で、財務諸表上に明示されることとなった。よって、「空港の赤字」（＝空港施設等の減価償却費と有利子負債の支払利息費を経常利益から引いて生じる経常損失）が問題とされるに至った。

(1) 2. 「空港の赤字」は、主体の財務状況を示すが社会全体の評価と必ずしも一致しない。

「空港の赤字」は、空港管理主体の財務状況を明瞭に示す一方で、社会全体から見た評価を示しているとは限らないことにまず注意すべきである。国際拠点空港のような大規模空港関連サービス事業については、巨額の初期投資に伴う多額の固定費のためいわゆる自然独占の状況下にあると考えられるため、利用料を低く抑えて管理主体が供給者として「赤字」を出して営業した結果、社会全体の厚生を最大にしているのではないかといった問題や、市場外にて影響が伝わる外部性（安全、環境や混雑）について、どのような「収支」結果になっているのかの問題、さらに、防災等の機能を含めた安全の確保、地域の多様性への寄与、国際ネットワークにおける輸送費の戦略的な低減政策等の行政サービスに対する国民の要求にいかに対応しているのかという問題については、管理主体の財務情報のみでは、把握するのに十分でないことを押えておくべきと考える。

これら社会全体での評価等¹⁷については、あえて、別の機会に譲り、本稿では、管理主体の財務面の問題に絞って進めることとする。財務面での「空港の赤字」の情報は、財務情報の提供を通じて国民・住民の負担が非常に明確になっている、との指摘にも正しい側面があると思うからである¹⁸。「空港の赤字」（＝管理主体である株式会社の経

¹⁶ この事例は、国土交通政策研究所機関紙 PRI Review 第2号（2001年8月）に公表した論稿に一部修正を加えたものである。

¹⁷ なお、社会全体での評価の必要性、管理主体の財務面での検討と透明性の向上に加えて、複雑なシステムを構成する交通システムのインフラを整備する場合、その長期の需要予測にはほぼ必然的に伴うと考えられる不確実性に関して、行政と国民双方が事前に十分なコミュニケーションを行うべきであること（広義のリスク・コミュニケーション）についても、十分検討する必要があると考える。

¹⁸ 国民のために行動すべき管理主体（エージェント）が必ずしも国民の効用を最大化していない可能性があること（エージェントコスト問題）への対応の観点からも、情報公開を通じた国民等による監視の果たす意味は大きい。

常損失)は、問題であり、一部で主張されているように、量的な拡大を停止し、維持修繕等に特化するべきなのか。仮に問題とされない場合があるとすれば、いかなる場合なのか。以下リアル・オプション理論を用いて検討する。

(2) 将来の拡張オプションを考慮した 空港の赤字に関する分析

以下、関西国際空港の例を一部修正して単純化した、仮想の大規模国際空港 A の管理主体として、A 空港株式会社を考え¹⁹、当該会社が直面する不確実性下の意思決定問題について、リアル・オプション理論のうち、拡張オプションを用いて、かつ、評価ツールとして BS 公式を用いて、その内容を分析する。

(2) 1. 仮想の A 空港株式会社について

国際線就航便数 1 日約 97 便、国内線就航便数 1 日約 72 便と、国内線、国際線の接続面での利便性もすばらしい我が国の代表的な国際空港 A は、株式会社により建設・管理・運営されている。大水深、超軟弱地盤で短期間での大規模な人工島を沖合 5 キロの海域に建設するなど、現代土木工学の粋を集めて建設された。人工島のため、市街地空港と比べ、周辺住宅地への環境影響はなく、本格的な 24 時間運用の国際空港であり、長距離国際線の航空機が、緊急時に退避するダイバート空港としての機能も持つ。また、市街地に今でも残る旧空港が、地震等の災害・緊急時に万一使用できないとき、この地域における防災拠点として使えることから、防災面での余裕機能(リダンダンシー)も有している。

資本金約 5,920 億円のうち、国が約 67%、自治体が約 20%、残りを民間セクターが出資している。このような大規模空港の例にもれず、慎重に投資を行った結果(段階的オプションを使って、滑走路を段階的に整備することとした結果)全体の構想(滑走路 3 本)に比べ、現在共用中の滑走路は、1 本である。94 年夏に開港したものの、初期投資が膨大で(約 1.5 兆円)あったため、長期負債の額が大きく(約 1 兆 720 億円)、減価償却費も相当額(約 350 億円)である。ただし、段階的に整備するにあたり、将来(10 年後)、実際に滑走路が増設しても対応できるように、空港島は増設に備えられる設計となっており、陸域との鉄道、自動車による連絡橋やフェリー等の交通手段も、増設が可能になるよう工夫されている。また、滑走路の増設の際に国が直接拡張整備の責任を有する航空保安施設や管制業務には、問題がないこととなっている。

また、ここ 10 年にもわたる景気の低迷や、東京への一極集中により本社機能が首都圏に集中し、ビジネス客が十分集まらないことから、航空各社は空港 A の路線数を押えている。しかし、航空旅客需要自体は、国民の時間価値の上昇等により底堅く、増加している。(平成 12 年度について、発着回数は、国内線が、約 0.6%増、国際線が y2k 問題等への反動等から国内より更に伸びており(約 9.0%増)、全体として約 5.2%増。旅客数については、国際線が 8.6%増、国内線が 5.7%減、全体で 2.8%増。)

リストラにより費用を圧縮する一方で、株式会社であることから、増収努力として、着陸料収入については、営業割引を継続しつつ、地元経済界の支援も受けて、国際線の着陸料を引き下げるなど、国際線の便数の充実に努めている。

これらの結果として、「赤字」(=経常損失)は、最近は相当回復してきている(昨年度約 80 億円の

¹⁹ 関西空港株式会社と A 空港株式会社との主要な違いは、関西空港では、1 本目の滑走路完成後 5 年程度で 2 本目の滑走路の地盤改良工事等に着手(=リアル・オプションを行使)した点、2 期工事については、空港施設と用地造成の整備主体を分離する、いわゆる「上下分離」方式を採用し、2 期工事関連の初期投資につき、下物は子会社が整備し、関西空港株式会社は上物=空港施設のみを主に整備することとして、会社の負担を 1/3 以下に抑えた点である。

赤字幅縮小)ものの、依然相当規模(今期約160億円)である。欠損金も累積している(約1,720億円)。しかし、最近の経営努力により、営業活動による現金収支を示す償却前損益(経常損失に現金支出を伴わない費用である減価償却費を加えたもの)は、開港2年目から黒字で、その後増加してきており、本年度は、前年度に比べ約66%増加して、203億円の大幅な黒字となっている。(赤字は、ほぼ固定費である。)累積の欠損金も、資本額の3割弱程度である。

仮想空港A(株式会社)の財務諸表

貸借対照表(簡略版)

(単位:億円) 損益計算書(簡略版)

(単位:億円)

(平成13年3月31日現在)

自平成12年4月1日 至平成13年3月31日

資産の部		負債の部		経常損益	
流動資産	519	流動負債	1,079	営業利益	262
固定資産	15,452	固定負債	10,718	(=使用料収入-減価償却、施設運営費等)	
繰延資産	17	負債合計	11,797	営業外損失 (支払利息)	-419
		資本の部		経常損失 (営業利益+営業外損失)	-157
		資本金	5,920	特別損益	
		欠損金	1,729	特別損失	-1
		うち、当期損失	157		
		資本合計	4,191		
資産合計	15,988	負債・資本合計	15,988	当期損失 (経常損失+特別損失)	-158

端数処理のため、合計が合致しない場合がある。

(2) 2.A 会社の有する拡張オプションと意思決定問題

空港Aについては、最初の建設段階で、まず必要な1本の滑走路を建設し、その後の状況を踏まえて残り2本を段階的に建設していくこととした(段階的オプション)結果、10年後に、滑走路を更に2本建設する選択権(柔軟性)を有することとなる²⁰。(拡張オプション)他方、現在赤字のA会社は、不確実な状況下、現状を軌道修正し現滑走路のみの営業に特化するか、将来の拡張オプションを維持するか、の意思決定問題に直面していることとなる。

(2) 3. 拡張に関する事業のキャッシュフロー

費用、収益、割引率等について、以下のように設定した。

費用：総額1兆5千億円を年1から年10まで、毎年1500億円ずつ支出。4%の割引で現在価値に割引くと、費用の割引現在価値：1兆2,166.3億円

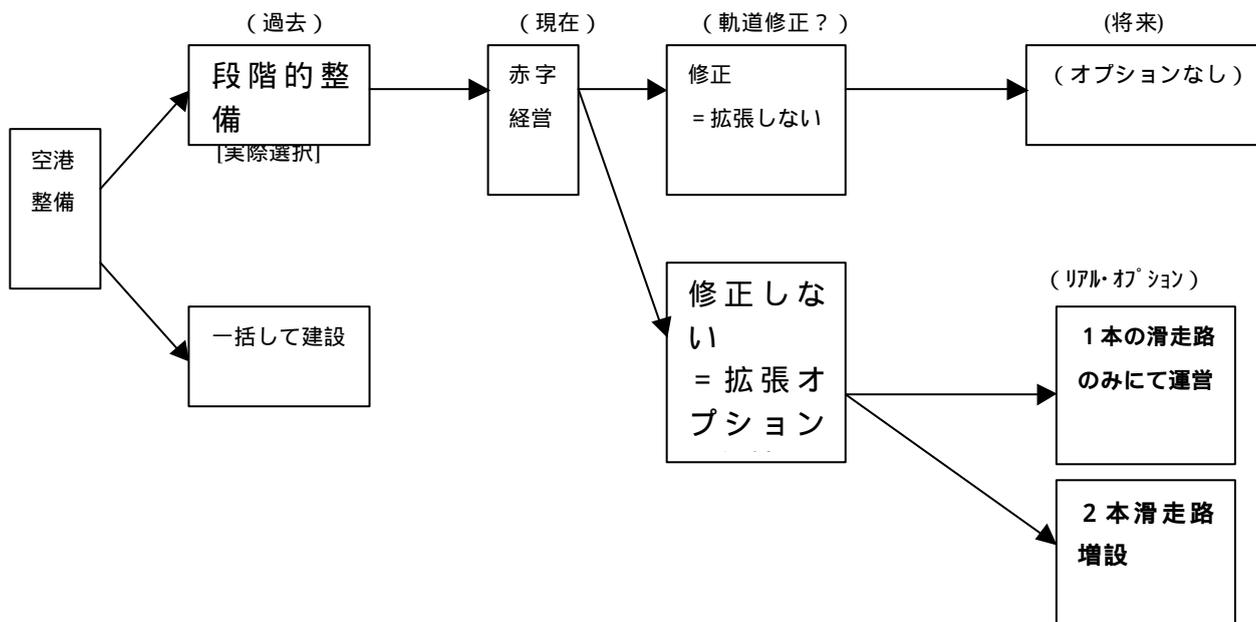
収益：年11に拡張滑走路を共用開始するとして、それ以降50年間年60まで、毎年今年度と同じ260億円の営業収益が見込まれる^{21 22}。営業収益が見込まれる期間を50年としたのは、滑走路の

²⁰ なお、10年後にとの仮定を、今後10年以内にいつでもと緩めても本質的な差異はない。(BS公式をいわゆるアメリカンオプションへ適用するための修正を行えばよい。詳細は、John Hull(三菱銀行商訳)(1994) pp372-374)

²¹ 空港管理者の主要な収入項目の着陸料につき、将来水準に関する予測の基礎データとして、A空港の旅客数については、仮定から、昨年度、国内・国際全体で、約2.8%増となる。他方、平成12年10月にまとめられた運輸政策審議会長期需要予測小委員会の長期需要予測では、1995年から2010年までの間、国内・国際航空旅客は、我が国全体として、(基本ケースで)毎年約2.8%増加するとしてい

耐用年数を50年と仮定し、これと整合させるためである。12%の割引率で現在価値に割引くと、
 収益の現在価値：695.2億円

(A 空港株式会社のデジジョン・ツリー^{23・24})



割引率についての考え方：以上の費用と収益を年0（決断の年）に割引く必要がある。このとき、費用に関しては、確実に支出が見込まれるため、リスクフリー割引率（長期国債の過去約10年平均で、4%）²⁵にて、割引く。収益は、現実に得られることにつき、（需要予測について批判があること、一般の経済状況の影響をより受けやすいと考えられる点等を考慮し）リスクが相当高いと考えて、

る。（長期需要予測に関する調査報告書 運輸政策研究機構(2001)pp86,105 などから、筆者計算。）従って、毎年今年度程度の着陸料収入が60年先まで得られるとの想定は、大胆過ぎるものではないと考える。

²² また、60年にわたる長期の予測であるため、インフレ率を考慮すべきとの指摘も想定される。現下、価格水準はデフレ傾向で比較的安定していること、割引率において相当考慮していること、以下で述べる滑走路事業のボラティリティーにてインフレ等もある程度は加味しているとも考えられること等から、ここでは、キャッシュフローについてはインフレを考慮していない。

²³ なお、将来のオプションにおいて、2本一度に増設する代わりに、1本のみまず拡張することを選択肢に加えると、やや複雑となる。将来のオプション（1段目）において、1本のみまず拡張すると選択した後、当面拡張せず現状の2本の滑走路にて運営するという決定と、更に1本滑走路を増設し3本の滑走路とする、という意味決定が選べるオプション（2段目）があることとなる。この2段目のリアル・オプションと現在直面している選択についての1段目のリアル・オプションと二重のオプションを有することから、この点のリアル・オプションの評価は、いわゆるコンパウンド・オプション（ネステッド・オプション）の評価の問題になる。詳細は、次注の参考文献に譲るが、ここでの特異な点として、1段目のオプションを行使した後、2段目のオプションを行使する前に、増設した2本面の滑走路から収益があることから、行使期限前に配当のある資産に関するオプション評価になる点に注意すべきと考える。

²⁴ なお、この拡張の投資機会は、A 空港株式会社が独占していると考えるので、いわゆる「競争によるオプション価値の破壊」（投資機会について、他主体の参入を考える競争条件の下では、抽象的に考えられるオプション価値を潜在的な参入者も含めてシェアすると構成する必要があること）の問題は、生じない。この点、価格情報等に関する市場の情報が得られないこととなり、本リアル・オプションについて、BS 公式を当てはめる際の限界となる。なお、「競争によるオプション価格の破壊」について詳しくは、刈屋・山本(2001) pp55-56

²⁵ 空港整備に関する行政実務指針である、費用対効果分析のマニュアルにおいても、割引率は、4%としている。

12%で割引くこととする²⁶。

その他：更に、単純化のために、滑走路2本の拡張に伴う収益と費用は、滑走路1本の場合の2倍であると仮定する。また、最初の滑走路建設時の情報から、リアル・オプションを行使して新たな滑走路を1本建設した場合、毎年の減価償却費は、約350億円と想定する。有利子負債により、拡張用の建設費用を調達した場合には、毎年約412億円の追加的な支払利息費が必要と仮定する。(低成長の現在、金利、建設コストとも最初の滑走路建設時よりは、低く押えられるであろうと考えられるが、ここでは、保守主義の会計原則に則り、費用を大きめに見積もった。)なお、各年度滑走路等の施設を維持修繕していく、減価償却費については、営業費用に含まれている。以上の想定から漏れているのは、拡張事業の初期投資負担を有利子負債に行う場合の毎年の利払い負担のみであることになる。

(2) 4. 拡張オプションの価値評価

以上から得られる数字を、以下のように、BS 公式の各要素毎に当てはめて計算する²⁷。

BS 公式の要素	内容	ここでの数値
S	事業からの収益(50年間の収益割引価値)	695.2 億円
X	オプション行使価格(建設費の割引価値)	1兆2166.3 億円
r	リスクフリー割引率	4%
T	オプション行使期限までの時間(年)	10(仮置き)
	事業のボラティリティー(事業収益の不確実性)	70%(仮置き) ²⁸
c	リアル・オプションの価値(滑走路1本当り)	238.09 億円

(2) 5. 意思決定についての考え方

ここまでの結果を用いて、A 会社が直面する意思決定問題、すなわち、現在赤字の A 会社は、不確実な状況下、現状を軌道修正し現滑走路のみの営業に特化するべきか、それとも軌道修正せず将来の拡張オプションを維持するべきか、という問題を分析する。

この問題は、柔軟性をもたらす拡張オプションの価値とその拡張のオプションを保持することに伴うコスト(余分の減価償却費や利払い費用)とを関連する時系列全体で把握し比較して、前者が後者を上回る限り、軌道修正すべきでなく、引き続き拡張オプションを保持すべきこととなる。

まず、分析の準備として、仮定より滑走路2本の拡張オプションの価格は1本の拡張オプションの2倍であることに注意して、今年度の赤字額と拡張オプションの価値を比較するため両者を足し合わせた結果を用意し、それを本稿ではこの「意思決定に関する A 会社のネットのポジション」ということとする。計算結果は以下のとおり。

²⁶ なお、拡張プロジェクトの期待収益率にあたるこの12%は、BS 公式での計算結果に、影響を及ぼさないことに注意。この点については、野口・藤井(2000):「金融工学」p179「μがでてこない」を参照。

²⁷ 計算方法等については、Benninga(2000), Chapter18に拠った。

²⁸ なお、電力事業において、新たな電力施設プロジェクトの事業収益のボラティリティー()を60%とした分析例がある。(新薬開発プロジェクトについては、を100%とする分析例もある。)刈屋・山本(2001)pp156-161 プロジェクトの規模、所要時間の長さなどが似かよっている例として、ここでは、電力施設のプロジェクトを参考に、人工島にかかる事業であることから、やや高めボラティリティーとした。

不確実な状況下、赤字のA空港会社はリアル・オプションを有する柔軟な現状を軌道修正すべきか、についての分析

拡張オプションの適用条件

空港Aが滑走路を2本拡張し得る場合 (= 滑走路 2本の拡張に関するリアル・オプションを有する場合) を考える。
 拡張の投資により、滑走路 1本あたり、本年度の営業収益 (260億円の黒字) と同程度の営業収益が、滑走路の耐用年数 (50年と仮定) に亘り、得られると仮定。
 拡張後の営業収益は、リスクが高いと考え、12%の割引率で、年 0に割引く。(年 0での価値 = 695.19億円)
 建設に要する投資は、毎年1,500億円を10年間、計 1兆 5千億円が必要と仮定。
 投資については、確実に必要と考え、リスクフリー割引率 (4%) で0年に割引く。(1兆2166.3億円)
 投資開始後、11年目から共用開始され、耐用年数 50年に亘り年 60まで、同一のサービス水準を維持すると仮定。
 (なお、拡張から生じる費用のうち、各年度の維持修繕の費用、減価償却費については、営業費用において、考慮済み。支払利息については、考慮していない点に注意。)
 この拡張オプションの価値を、BS公式により以下の条件で計算し、本年度の経常損失額と比較のため、足し合わせ、柔軟な現状を軌道修正すべきかを見る。
結果 :以下のような不確実な状況下、本年度の経常損失のみをもって直ちにオプションを有する柔軟な現状を軌道修正するとの決定を下すべきでないこととなる。

空港拡張事業のキャッシュフロー (CF)

年	0	1	2	...	10	11	12	...	59	60	
毎年度のキャッシュフロー		-1500	-1500	...	-1500	260	260	...	260	260	
営業収益の 0年における価値	695.1948	(<--- 50年に亘る毎年 260億円の営業収入を 12%の割引率で割り引いた 0年における価値)									
拡張用の滑走路 (1本) の投資額の 0年における価値	-12166.3	(<--- 約 1500億円を均等額ずつ年 1~年 10まで 10年にわたって投資 (総額 1兆 5千億円) したとき、									
滑走路 (1本) の投資の 0年における純価値	-11471.1	費用対効果分析で用いられているリスクフリー割引率 (= 4%) の割引率で割り引いた 0年における価値)									

前提条件

空港の営業収益のCFの割引率	12%
リスクフリー割引率	4%
将来の拡張オプションを持つ本年度のコスト	-160
将来建設する可能性のある滑走路の数	2

現在の赤字額 (= 減価償却費と支払利息費を考慮した経常損失)

計算結果

10年後に滑走路を建設する拡張オプションの価値	238.09	BSの公式を利用した本リアルオプションの価格 (拡張可能性のある滑走路 1つについて)
オプション価値を加味した本年度のネット・ポジション	316.19	リアルオプションを考慮した意思決定に関するネット・ポジション <--- = -160 + 2X 238.09

(参考) ブラック・ショールズ (BS) の公式での考え方

	リアルオプションでの考え方
S : オプションに基づく株式の価値	695.19 拡張滑走路の便益 (= 営業収益) の年 0における価値
X : オプションの行使価格	12166 リアルオプションの行使価格=拡張滑走路 1本の建設コスト (10年間) の年 0における価値
r : リスクフリー割引率	4.00% リスクフリー割引率
T : オプションの行使時期までの時間	10 リアルオプションの行使時期までの時間 (年)
Sigma : 株式のボラティリティ	70% <--- 事業のボラティリティ
d ₁	-0.0055 <--- (LN(S/X)+(r+0.5*sigma^2)*T)/(sigma*SQRT(T))
d ₂	-2.2191 <--- d ₁ -sigma*SQRT(T)
N(d ₁)	0.4978 <--- 標準正規累積密度関数 = NormSDist(d ₁)
N(d ₂)	0.0132 <--- 標準正規累積密度関数 = NormSDist(d ₂)
BSの公式によるコールオプションの価格	238.09 <--- S*N(d ₁)-X*exp(-r * T)*N(d ₂) BSの公式によるリアルオプションの価格

「空港の赤字」 (今年度)	拡張オプションの価値 (滑走路2本拡張の場合)	意思決定に関する ネットのポジション
- 160億円	476.2億円	316.2億円

今年度の営業成績は、(約 - 160億円)の負のキャッシュ・フローであり、今年度の情報のみから判断してもコストが収入を上回っているのだから、軌道修正すべきとの結論が一見妥当すると思われるかもしれない。しかし、厳密には、やはり、今年度のコスト全体から、将来の拡張に備える、いわば柔軟な構造を取っている部分に関するコスト=余分な減価償却費や有利子負債を分離し、その額とオプションの価値と比較する必要がある。

ここで、単純化のため、A会社の赤字が、(現実とは違うが)本年度のみである(過去も赤字ではなく、将来も赤字でないと想定できる)場合を考える。この場合、意思決定問題は、今年度の赤字額と拡張オプションの価値を単純に足し合わせて比較してみることで判明する。このケースでネット・ポジションがプラスとは、拡張オプションの価値が、オプション保持のコストを含む全体の赤字額を上回る場合に他ならないから、本年の活動により生じた(余分の減価償却費と利払い費用を含む)経常損失は、拡張オプションの価値を考慮すると、「問題とはいえない」こととなる。ここで、「問題とはいえない」とは、財務諸表上現れる今年度の経常損失という「赤字」額のみから、直ちに軌道修正して拡張オプションを放棄すべき、という結論にならず、A会社がオフバランスで保有するオプションの価値を考慮すると、引き続きオプションを有した、柔軟な現状を維持すべきこととなることを意味するに過ぎない。

次に、今年度まで赤字額が継続し、今後もある程度見込まれる場合には、過去から将来のコストについて、1本の滑走路の運営のみから生じた部分を分離し、拡張の柔軟性を保持することに伴う、余分のコスト部分の合計額とオプション価値を比べる必要がある。(参照)

(2) 6. 負のキャッシュフローの事業から、正のオプション価値が生まれる。

将来の滑走路拡張事業は、滑走路1本あたり、年0における価値で考えると、負の価値(マイナス1兆1470億円)であるのに、その拡張事業を選択できると構成して、そのオプション価値を測ると、プラスの価値を有する場合があることについて、不思議に思われるかもしれない。これは、その時価がオプションの権利行使価格未満(いわゆるアウト・オブ・ザ・マネー)の株式についてのオプションにも、プラスの価格が付される可能性があることと同様に考えられる。将来、当該事業(又は株式)の価値が上昇する(値上がり)可能性があり、行使期限までに余裕があるため、ますます、そうなる可能性が高まるためである。オプションの金融派生商品としてのリスクの高さを端的に示すものといえる。

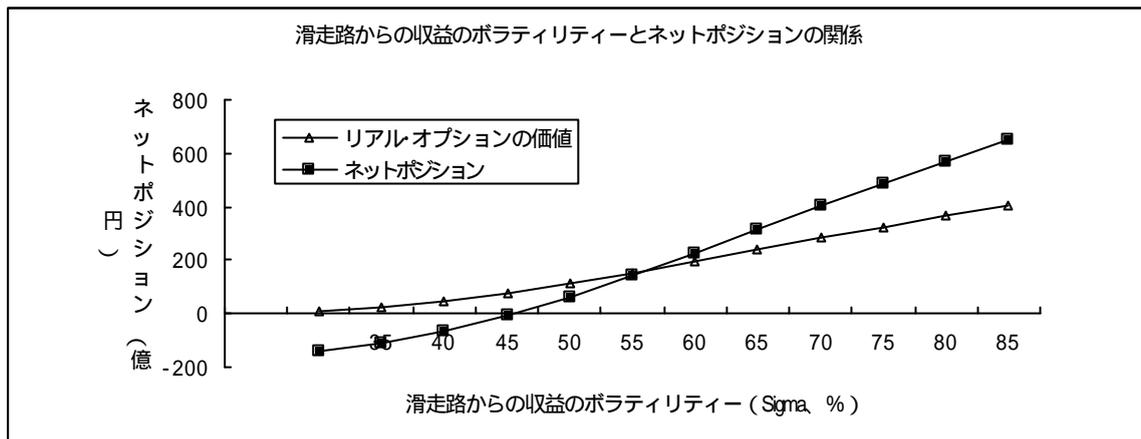
(2) 7. 空港の滑走路拡張事業に関するインプライド・ボラティリティー(感度分析)

以下においては、BS公式の入力要素を変動させ、リアル・オプションの価値は、状況の変更によりどの程度の価値を持ち得るのかについて、いわば感度分析を行う。

まず、今年度の「赤字」をリアル・オプションにより正当化するレベルのボラティリティー()は、どの程度か、を探ってみる。金融取引においては、株式のボラティリティーに関する情報が欠けているため、市場で価格が決定されているその株のオプションの価格

から、逆算して、株のボラティリティを求めることが行われている。いわゆるインプライド・ボラティリティを求めることである。ここでは、オプションの価値を今年度の赤字額に固定してリアル・オプションのインプライド・ボラティリティを求めてみる。また、同様に、今年度の赤字を正当化するレベルの行使時期（ T = 行使の余裕）はどのくらいかという意味で、インプライド・タイミングについても考え得る。

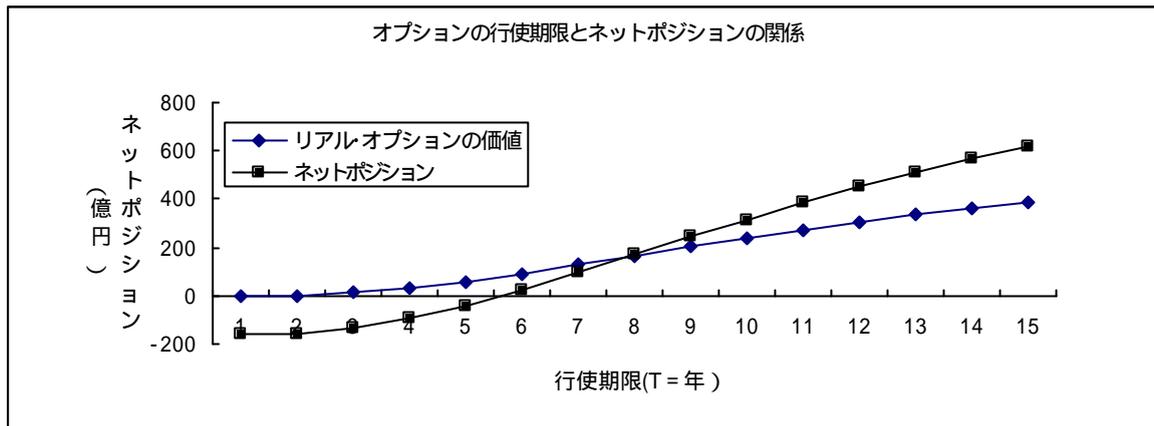
将来の滑走路からの事業収益に関するボラティリティ（ σ ）のみを変化させるとすると、以下ようになる。結論は、概ね50%以上のボラティリティを考慮する限り、今年度の経常赤字が打ち消されると言う意味において、ネットポジションは、黒字となる。



従来から、空港の需要予測は、甘めで、国民にツケを回すとの批判が多い。予測が甘めになる可能性が高いということは、収益が得られることについての不確実性がより高いというであり、本稿でいうボラティリティ（ σ ）が高いことと経験上考えても差し支えないだろう²⁹。BS 公式の考え方から直ちに導かれることであるが、以下のグラフからわかるように、滑走路からの事業収益に関するボラティリティ（ σ ）の値を高くすればするほど、拡張オプションの価値が高まることとなり、「空港の赤字」は、ますます「問題とならない」こととなるのは、大変興味深い。

次に、（滑走路からの事業収益に関するボラティリティを70%のままにした上で）拡張オプションの行使期限 T のみを変化させ、インプライド・タイミングを考える。ここでも、以下のグラフからわかるように、行使期間が長くなって、オプションの行使についての時間的な余裕が長ければ長いほど、オプションの価値が高くなり、「空港の赤字」はより「問題でない」こととなる。概ね6年以上の行使期間を考えると、ネットポジションは、黒字となることが判る。

²⁹「甘い需要予測」の意味として考えられるのは、厳密には、ボラティリティの問題ではなく、期待値を常に高めに予測する上方へのバイアスのことを指すと考えられるが、期待値の周りの分散の設定が大きめで、いわば期待値を超える楽観的な部分を（悲観的な部分を十分示さず）誇張しているのではないかと、との意味も含まれているように思われる。ボラティリティが高まれば、相対的に期待値のバイアスの問題も小さくなること、また、「甘い」とは予測が外れやすいとの意味もあると考えられることも考慮し、ここでは、 σ の場合のみを取り上げている。また複雑なシステムを構成する交通システムの需要予測に関する長期予測不能性や決定不能性などの議論についても、別の機会に譲る。



以上まとめると、将来の空港拡張事業から得られる収益について、不確実性が約50%を超えて増加すればするほど、また、将来の拡張事業の決断時期が約6年を超えて、時間的余裕が増加すればするほど、本拡張オプションの価値が増加し、空港運営に関するA空港株式会社の本年度の「赤字」については、本年度の経常損失が打ち消されるという意味において、「問題がない」こととなる。

(3) 累積している「赤字」とリアルオプションの価値について

では、開港以来累積している「赤字」である未処理損失額（約1,729億円）に対してリアル・オプションの価値は、どのような意味を持つのだろうか。

今までの議論で、A株式会社が有するリアル・オプションの価値は、約476.2億円であった。これが意味するのは、本年度の「赤字」である経常損失額が、約160億円であるため、今期まで過去約3年度の間、今期の経常損失が毎年累積した（同時に、それ以外に赤字が全く生じない）と仮定すると、今年度末時点のリアル・オプションの価値を考えると累積損失（ $160 \times 3 = 480$ 億円）³⁰とはほぼ均衡するため、今年度を含む過去3年度程度にわたり今年度と同じ程度の経常損失をこうむっていた（負のキャッシュ・フローがある）程度のみでは、直ちにオプションを有する意味で柔軟な現状を軌道修正するとの決定を下すべきでないということになる。すなわち、減価償却費と利払い費用を考慮しても、経常損失の額が今年度の実績額程度に収まるならば、3年程度の「空港の赤字」のみでは、直ちに柔軟性のもとである拡張オプションを放棄し、維持管理のみに特化するとの決定は正しくない、こととなる。

しかし、この議論は、以上の意味に止まり、当然のことながら、長期間累積する赤字や膨大な有利子負債がリアル・オプションの価値により一挙に帳消しになるとの内容ではない。

(4) まとめ

1. 「空港の赤字」（= 会社の単年度の経常損失）は、明確で分かりやすい議論の尺度を提

³⁰ 資本の機会費用まで考慮すれば、過去2年分の経常損失額について、投資家の期待収益率により今年度末時点の価値に割増すことが必要だが、非常に短期間であることと、現下の低金利状況を踏まえ、単純に3倍した。

供する。しかし、こうした問題設定は、空港などの大規模社会資本整備、とりわけ巨額の初期投資負担を社会全体としてどう考えるべきか、という大きな問題の一部について議論するに過ぎないことを認識する必要がある。

2. その上で、本事例においては、「空港の赤字」が「問題とはいえない」(= 経常損失とその累積である未処理損失が、オフバランスのオプションの価値を考慮することにより軽減(または相殺)され、直ちにオプションを有する柔軟な現状を軌道修正するとの決定を下すべきでない) 状況はいかなる場合か、について、リアル・オプション理論を用いて分析した。その際、リアル・オプションの評価には、ブラック-ショールズ(BS)の公式を用いた
3. 具体的には、関西国際空港株式会社を2期工事着工以前の形にモデル化し、実際より単純化した、仮想のA空港株式会社を想定した。A社は、段階的な滑走路建設計画を有しており、現在1本の滑走路にて運用を行っているが、将来、更に2本滑走路を拡張できると仮定した。ここに、リアル・オプションのうち、拡張オプションを構成し、かつ、BS公式を用いて、その拡張オプションの価値を試算した。その価値とA株式会社の最近の経常損失とを比較し、財務的にどの程度「問題」であるかを分析した。
4. 結果としては、人工島を建設するほどの膨大な初期投資を行い、かなりの累積損失(= 欠損金)がある場合であっても、会社がリアル・オプションを有する場合には、その会社を取り巻く状況が、将来への不確実性が高く事業の収益のボラティリティーが大きいこと、十分な時間的余裕を持ってオプションを行使するか否かの決断が下せることなどの条件を満たす場合には、その問題は相当軽減されることが示された。ある条件の下では、今年度の経常損失程度の「赤字」がおおよそ3年程度継続した場合であっても、直ちにオプションを有する柔軟な現状を軌道修正するとの決定を下すべきではないこととなった。
5. 本事例での分析は、社会全体の利益の観点はもとより、財務分析のあるべき全体からすれば、大変限られた範囲のものである。また、ここでの議論は、当然ながら、長期間累積する赤字や膨大な有利子負債が、リアル・オプションの価値により一挙に帳消しになるとの内容ではない。リアル・オプションを有する会社は、そのようなオプションを有しない場合に比べて、意思決定において柔軟性を有するため、経常損失を計上している場合であっても、直ちにそうした柔軟な意思決定構造を有する現状について軌道修正を行うべきでない場合が、一定の条件の下で存在することを示すに過ぎない。

4-7 リアル・オプションの価値手法の整理 主な3手法の比較

リアル・オプション意思決定法において、柔軟な意思決定構造によるいわば柔軟性価値を含んだ事業等の価値を評価するための方法・モデルには、先に述べたBS公式をはじめとして多様な形態が存在し、現在でも、専門家がよりシンプルで、使いやすいモデルの構築を試みている。ここでは、理論的に厳密な分類にこだわらず、実務者に対するわかりやすさを優先して、主な手法を以下の3手法に絞り、その特色を比較する³¹。

³¹ ディキジット・ピンディック(2002)「投資意思決定理論とリアルオプション」などに拠った。

この際、各方法が必要とする前提条件の厳しさとモデルの操作性に特に着目することとする。

ブラック-ショールズ(BS)の公式 (解析的解法)

2 項モデル

動的計画法 (ベルマン方程式法)

これらの方法は、以下に要約するように、モデルに必要な前提条件が、 が最も厳しく、 から になるにつれ、傾向として緩やかになる。モデルとしての操作性は、 が最も容易で、 から になるにつれ、難しくなるような内容となっている。なお、シミュレーション (モンテ・カルロ法) を用いる方法を独自のものと分類する教科書も多いが、モンテ・カルロ・シミュレーションは、実際上は、上記の から の方法いずれにも組み合わせて実施することが可能であることから、ここでは、リアル・オプションについての評価方法に関する別次元の分類と考え、別扱いとした。

リアル・オプション価値評価の 3 手法比較

手法	原資産の変動モデル	市場の完備性 (一物一価の原則)	その他金融 市場類似性	意思決定 の期限 (時間的 リミット)	モデルとし ての操作性
ブラック=ショールズ (BS)の公式	幾何ブラウン運動 のみ	必要	必要	必要	容易
2 項モデル	制限なし (幾何ブラウン運動 も多用)	不要	不要 (寡占等も可)	必要	容易
動的計画法 (ベルマン方程式法)	幾何ブラウン運動 (通常。最低限マル コフ過程は必要)	不要	不要 (寡占等も可)	不要	やや難

(注)

1.ブラック=ショールズ(BS)の公式は、一般の例に倣い、ブラック、ショールズ、マートン 3 人の考えを総合した内容を示す。

2.原資産の変動が幾何ブラウン運動にしたがう場合、原資産の自然対数は、伊藤の公式により対数正規分布することが導かれる。

3.市場の完備性：ある商品が他の (複数)商品により複製可能であり、リスクなしで (= 確実に) 利益を得る機会 (= 裁定機会) を許さないこと。

4.金融市場類似 :BS 公式で前提とした条件のうち、原資産変動モデル、完備性以外の、

効率的で取引コストが低いなどの金融市場に見られる条件を満たすこと。

(1) 準備

(1) 1. リアル・オプションの基本構造 (確認)

ある交通関係プロジェクトを実施すべきか否かを決定すべき国土交通省が、現在、実施するか永遠に実施しないかを決断するという択一選択に加えて、例えば、意思決定を次の時点まで延期でき、その時点でプロジェクトの収益見込みが増加し、実施コストを上回ることとなったらプロジェクトを実施し、収益見込みが下落しコスト割れするような場合には結局実施しない、というように意思決定のタイミングを延期することができるという第三の選択肢があるとするとする。

これは、択一選択のみの場合に比べて、(現在実施してもよいが実施しない場合にも) 次の時点まで待って実施するかどうか判断するという柔軟性が加わっているため、意思決定に柔軟性が加わっていることになる。意思決定主体に与えられている意思決定構造のこの部分を、プロジェクトに関する意思決定を延期できる権利と構成し、リアル・オプション(実物資産に関する選択権)と考える。つまり、この柔軟性は、意思決定主体が、プロジェクトとそれを実施して得られる収益を次の時点で一定コストにて取得できるという権利を有する(逆に、次の時点で取得する義務はない)ことにより可能となっていると考える。コスト割れした場合には、単に収益への権利を放棄することができ、必ずプロジェクトを実施しなければならないという義務を負うものではない。現在択一の決断をせざるを得ないというのは、このような権利を有しないからということとなる。

このように見ると、意思決定に柔軟性があれば、それには一定の価値があると考えられ、その価値は、意思決定を次の時期まで待って決断できるというリアル・オプションの価値といえる。

(1) 2.2 項モデルの基本構造

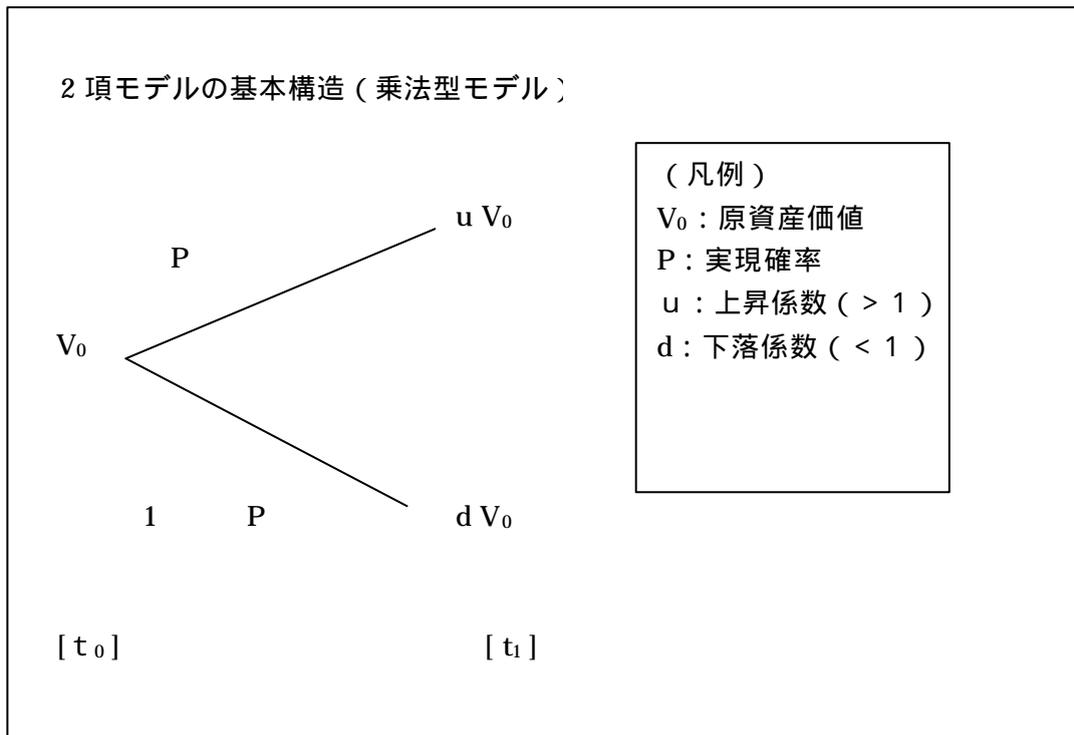
2項モデルは、プロジェクト自体の価値が単位時間内においてどのように変化するかにつき、上昇するか下落するかの単純な2つの変化のみと考えると、この意思決定を延期できる柔軟性の価値(=リアル・オプションの価値)を計算するモデルである¹。

具体的には、現在(t_0)から単位時間経過後(t_1)に、原資産(V_0)は、上昇又は下落という2つの変化のみすることとし、上昇する場合の価値は上昇係数を u (>1)として(uV_0)と考え、下落する場合は下落係数を d ($0 < d < 1$)として(dV_0)の2つの価値のいずれかのみに変化する(通常使われる乗法型モデル)。また、それぞれが実現する確率は、上昇する場合が、 p で、下降する場合が $1-p$ で与えられるとする。

ここでは、原資産の変化につき、基本構造を明らかにするため最低限必要な2期間を中心に記述するが、実際の分析において2項モデルを用いて計算する場合には、適当な期間数を定めて、このモデルをつなぎ合わせて計算する。つまり、次の時点での

¹ コックス=ロス=ルーピンシュタインが1976年に公表したオプションの簡便な評価方法として2項モデルアプローチを提案した。基本的な考え方は、ブラック-ショールズ-マーティンの3人のものを踏襲している。

原資産価値それぞれから、さらに、上昇と下落の2つの変化を考え、次の次の時点でも同様の上昇と下落の変化を考え、これを目標の期間数になるまで繰り返す。



(1) 3. 原資産の変動モデルには制限がない。ただし、幾何ブラウン運動（対数正規分布）に従うと仮定することも多用される。

現在 (t_0) から次の時点 (t_1) に時間が経過した場合に、原資産がどのように変化するか仮定する必要がある。具体的には、上昇係数 u と下落係数 d について、どのような値を考えるかという問題である。

金融資産（株など）に関するオプション（ストック・オプションなど）については、実証的な研究に基づき株価等の金融資産の変化について、幾何ブラウン運動（対数正規分布）に従うことを前提としている。BS 公式もこれを前提に確立されていることは既に述べたとおりである。

したがって、BS 公式を用いて、資産変動にともなう柔軟性価値 = リアル・オプション価値を計算する場合には、その前提として、原資産が、金融資産と同様に幾何ブラウン運動（対数正規分布）に従うことを認める必要がある。

2項モデルについては、このような制約がない。すなわち、原資産が単位時間経過後の次の時点 (t_1) においてどのように変化するかについては、計測する原資産の変化に関する実証的な分析や合理的な仮定に基づいて、幾何ブラウン運動（対数正規分布）以外のモデルを任意に選ぶことが可能である。複雑な変化をする原資産に対しても適用できる点で、2項モデルは、大変汎用性の高い柔軟なモデルといえる。

一方実務上は、金融資産やプロジェクトなどの実物資産に関するオプションの価値を計算する場合には、BS 公式を用いて行う代わりに、より簡便なモデルとして、しば

しは、2 項モデルが用いられることがある²。前述のように、2 項モデルは、原資産の単位時間内における価値変化について単純に上昇又は下落すると考えて、一定期間内におけるこうした単純な変化の積み重ねを考慮して計算する。この場合には、変化については単純に 2 つの場合に限定するものの、その背景となる原資産 V の変化モデルについては、株等と同様に幾何ブラウン運動（対数正規分布）に従うと仮定するのが通例である。具体的には、以下の式に従うものと仮定される。

逆に、2 項モデルの単位時間を（他の条件を変えずに）極限まで小さくすることにより、つまり、連続的に上昇・下落を期限まで無限に繰り返すという操作を加えることにより、BS 公式が前提とした対数正規分布（幾何ブラウン運動）になることが示されている。

幾何ブラウン運動の確率微分方程式：

$$dV = mVdt + sVdz \quad (0)$$

$dz = e\sqrt{dt}$ (拡散過程又は wiener 過程の表現式)

$e \sim N(0,1)$ (確率変数 e が標準正規分布にしたがうとの表現式)

$\Rightarrow \ln V \sim N(\ln V + (m - \frac{s^2}{2})T, s\sqrt{T})$ (変形すると対数正規分布にしたがう表現式となる。)

また、資産価値が上昇した場合の上昇係数 u と下落した場合に用いる下落係数 d については、以下の式で表現される上下の対称性をあわせて仮定することが通例である。

$$u \cdot d = 1 \quad (1)$$

原資産の変化が幾何ブラウン運動（対数正規分布）に従う前提下、単位期間における分散が(0)式により²であること、及び、分散の定義式（分散 = $E(V^2) - (E(V))^2$ ）から、以下の式が成立する。

$$p^* \cdot u^2 + (1 - p^*) \cdot d^2 - \{p^* \cdot u + (1 - p^*) \cdot d\}^2 = \frac{s^2}{2} \quad (2)$$

(1) 4. 市場の完備性（一物一価の原則）は必要とされないが、実務上それを前提とした 2 項モデルも多用される。

また、BS 公式においては、金融市場に関する前提から、さらに、原資産の価値変化について、市場に関する完備性（一物一価の原則）を仮定する。

2 項モデルにおいては、対象とする原資産が金融市場で取引される資産に限らないことから、原資産についてその市場の完備性を仮定する必要はないこととなる。しかし、ここでも、2 項モデルが BS 公式の簡略版として多用されること、以下に述べるように、計算上有益な結果が得られることなどから、市場の完備性の仮定も前提とすることが多い。

² コックス = ロス = ルービンシュタインが 1976 年に公表したオプションの簡便な評価方法も、BS の簡便法として提案された。

(1) 5. 「市場の完備性」、「一物一価の原則」及び「無裁定性の基本原理」は、同一の効果
を有する。

市場の完備性が意味するのは、市場において原資産（の価格）は（原資産の一部を含めて）適当な資産の組合せ（複製ポートフォリオ）により再現することができ、多数が参加し取引量の大きい市場においてこの完備性が確保されることにより、当該市場はリスクなしで（＝確実に）利益を得る機会（＝裁定機会）を許さないということとなる。ある資産の価格が、理論値から乖離すると、当該資産とその複製資産の価格が理論値から乖離していることになり、その乖離差分の利益を獲得する機会があることに他ならない。（安い場合には買い、高い場合には売ればよい。）このため瞬時にこの利益機会を解消する取引（裁定取引）が行われて、資産価格が理論値に収束していくこととなる。（一物一価の意味）

また、何らかの理由で、ある期間、ある資産価値が理論値から乖離したままであるのに、その複製資産が理論値を取っている状態であったとすると、2つの資産の差分が裁定機会になり、それを解消する取引が瞬時に実行されて、理論値に収束していくことになる。（完備性の別角度からの意味）

このようにして、市場における価格体系は、裁定機会を許さない状態が確保されることになる。こうした、無リスクで（＝確実な）利益をあげる機会（＝裁定機会）を許さないことを、無裁定性の基本原理（＝ノー・フリー・ランチの原則）と呼ぶ。

また、一定のルールの下で、以下の2つは同値であることが明らかにされている。

市場で、無リスクの（＝確実な）利益をあげる機会（＝裁定機会）がないこと

市場で、単一の価格システム（＝一物一価の法則）が許されること。

このような市場は、完備な市場と呼ばれる。厳密な議論は、参考文献等を参照されたい³。

(1) 6. 複製ポートフォリオを刻々組み替えることで、原資産の価値(変化)をリスクのない資産の利子率に連動させることができる。

このような市場の完備性（一物一価の法則）の仮定のもと、原資産（の価格）を複製する目的で、収益に関してリスクのない国債を組み込んで構成した複製ポートフォリオを想定し⁴、さらにこのポートフォリオを組替えて、原資産と国債以外の資産の組合せによって新たなポートフォリオをつくると、この新たなポートフォリオは、残された国債と同様の価格変化をすることとなる。これにより、 r をリスクのない国債の収益率＝リスクフリーレートとして、連続複利計算の下で、以下の式が成り立つような p^* （リスク中立確率）が存在することとなる。このリスク中立確率 p^* の意味については、以下に述べる。

$$V_0 = \{ (p^*) \cdot u \cdot V_0 + (1-p^*) \cdot d \cdot V_0 \} / (e^r) \quad (3)$$

³ 詳しくは、刈屋(2000):「金融工学とは何か」pp134-143, 刈屋(1999):「信用リスク分析の基礎」pp26-30 更に、数式表現等の詳細は、小山(1999) pp334-335。

⁴ 時系列とともに、原資産等の組み入れ率を変化させることを許すこのような複製ポートフォリオは、ダイナミック・トラッキング・ポートフォリオと呼ばれる。

(連続複利計算を想定するため、通常の $1/(1+r)$ の割引ファクターの代わりに、 $1/(e^r)$ を用いることに注意⁵。) これまでに述べた、 u (上昇係数)、 d (下落係数)、 p^* (実現確率) に関する連立方程式(1)~(3)より、以下の解*を得る。

解*:

$$u = e^{\sigma}$$

$$d = e^{-\sigma}$$

$$p^* = (e^r - d)/(u - d)$$

(1) 7. この解*は、一物一価の原則を前提とすると投資家の嗜好にかかわらずリスク・フリー割引率 (r) を使用できることを示している。(原資産の価値変化を示す上昇確率 p は、リスク中立確率 p^* となっている。)

この解が意味するところは何か。求められた p^* は、時間 t に依存せず、リスク・フリーレート r と上昇係数 u 及び下落係数 d のみにより定まる。これは、投資家の投資選好 (リスク回避型か、リスク・テイク型かなど) を反映した期待収益率 (μ) にも依存しないことになる。リスクに関してニュートラルなリスク中立の世界の下での実現確率を用いて次の時点における資産の期待値を求めることで、あらゆる投資家の選好を正確に反映した価値評価となることを示している。このような確率 p^* は、「リスク中立確率」と呼ばれる。これを用いることにより、資産の価値計算について、大幅に単純化することができる。すなわち、資産変化について一定のモデルを仮定しリスク・フリーレート (r) を用いることで、個別の投資家ごとのリスク選好 (μ) などを考慮する必要がなくなる。

また、ここでは単純に 2 期間のみ考えたが、これを超えて、3 期間以上の時間の経過を考慮した場合、途中で状況の変化とともに期待収益率 (μ) が変化することは充分考えられるところである。こうした場合でも、市場の完備性を仮定し、原資産の変化について一定のモデルを与えて (を導出) リスク中立確率を算出することで、上昇係数 u と下落係数 d が定まり、リスク・フリーレート (r) が一定値で変化しないとの前提のもと、定数のみを用いることで価値評価が可能となる。刻々変化する期待収益率 (μ) や実現確率 (p) を計算のなかで用いる必要が全くなくなる。

(1) 8. 一物一価の原則などの仮定をおけば、期待収益率 (μ)、実現確率 (p) とリスク中立確率 (p^*) の 3 者は、2 者が決まれば残り 1 者が定まる関係にある。

なお、2 項モデルを用いて行う通常の資産価値評価においては、上昇という事態が実現する確率を p とし、下落という事態が実現する確立を $1 - p$ とし、次の期間において、この (客観的な確率で重み付けした) 期待値をこの資産の期待収益率 (μ) にて現在価値に割り戻すことが行われる。(ここでは、通常用いられる $1/(1 + \mu)$ の割引ファクターではなく、連続複利計算した場合の割引ファクターである $1/(e^\mu)$ を用い

⁵ なお、 r が充分小さい (ゼロに近い) 値の場合には、 $e^r \sim 1+r$ と考えてよいので、以下 e^r は単に $1+r$ と置き換えて考えてよい。例えば、 $r = 0.04$ の場合、 $e^{0.04} = 1.04081\dots$ 、 $1.04 = 1+0.04$

ることに注意。)

$$PV = \{p \cdot u \cdot V_0 + (1-p) \cdot d \cdot V_0\} / (e^\mu)$$

このように表される原資産の価値 PV については、無裁定性の原理（一物一価の原則）から、リスク・フリー・レートを r として、 p^* （リスク中立確率）を用いて計算可能である。なせなら、そうでないとこの資産は複製できないことになる。ここでは、一物一価の原則が破られて、裁定機会が存在し、無リスクで利益をあげることが可能となってしまうからである。これは、以下のように表現される。

$$PV = \{p^* \cdot u \cdot V_0 + (1-p^*) \cdot d \cdot V_0\} / (e^r)$$

よって、一物一価の原則から、以下の式が成立する。

$$\{p \cdot u \cdot V_0 + (1-p) \cdot d \cdot V_0\} / (e^\mu) = \{p^* \cdot u \cdot V_0 + (1-p^*) \cdot d \cdot V_0\} / (e^r) \quad (4)$$

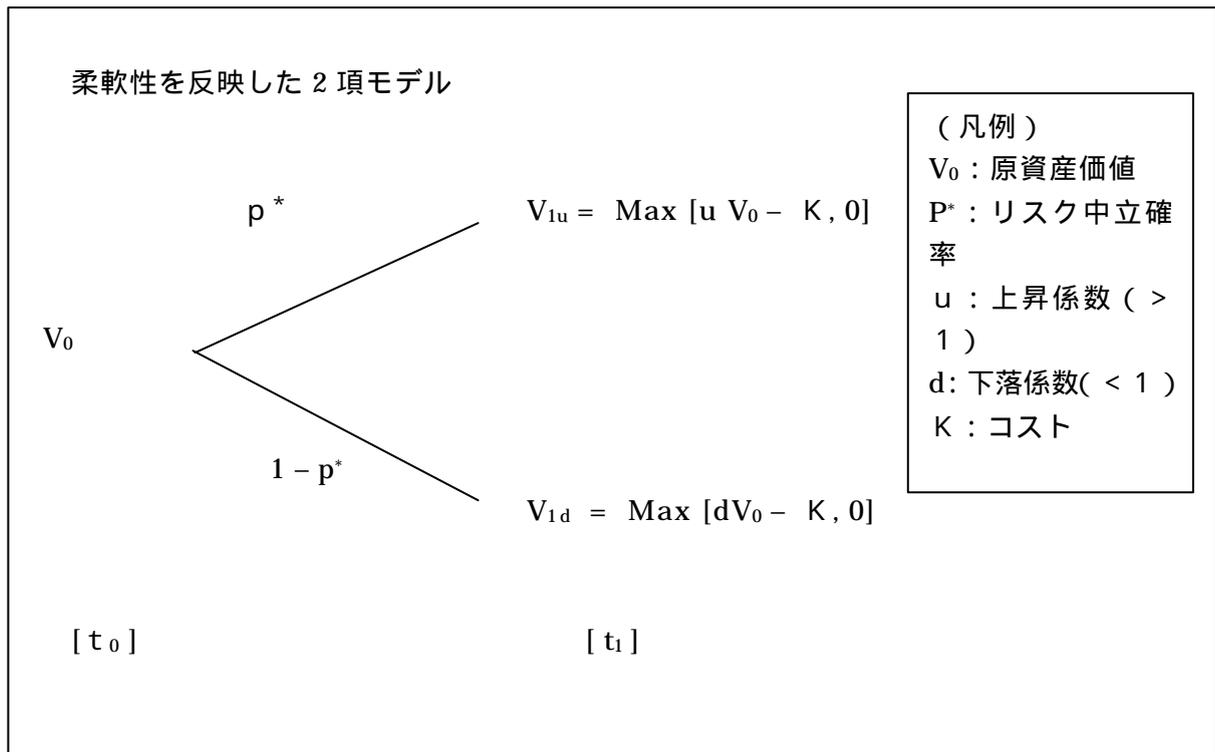
このようにして、 r が与えられている前提のもとでは、 p 、 p^* 、 μ 、の3者のうちいずれか2つが定まれば、(4)式により、残りの1つが定まることとなる。

(2) リアルオプションによる価値の算出

(2) 1. 不確実性に対応する柔軟性価値 = オプションの価値を加味した原資産の表現

ここまでに述べた2項モデルの基本的構造を基に、資産の収益見込みが増加しコストを上回ったら実行し、収益見込みが下落しコスト割れするようであれば実施しないというようなオプションの価値 = 不確実性に対応する柔軟性価値は次図のように表現される。

すなわち、次の時点 (t_1) で、資産価値 uV_0 （上昇した場合）又は dV_0 （下落した場合）が、実行に伴うコスト K を上回る場合のみ実行して収益 (= $uV_0 - K$) を確定させ、それ以外は実行せずに（例えば、意思決定を延期するなどして）済ますという構造を表現する。これは、単純にそれぞれの価値からコスト K を引いた値とゼロを比べ、大きい方を選択するというモデルで表現される。（上昇した場合について言えば、 $\text{Max}[uV_0 - K, 0]$ ）



次の時点 (t_1) のこのような資産のとり得る値が定められた後に、これらの値からリスク中立確率によって期待値を求め、その値をリスク・フリー割引率 (r) を用いて現時点 (t_0) に割引くことにより、リアル・オプションを持つことにより意思決定に柔軟性が備わっていることを考慮した現時点 (t_0) における資産価値 V_0 を求めることができる。

$$V_0 = \{ p^* V_{1u} + (1 - p^*) V_{1d} \} / (e^r) = \{ p^* \text{Max} [u V_0 - K, 0] + (1 - p^*) \text{Max} [dV_0 - K, 0] \} e^{-r} \quad (5)$$

柔軟性を考慮していない資産の現在価値を示す (3) 式で表現された V_0 と、柔軟性を考慮し、オプション価値を加味した資産の現在価値を示す (5) 式で表現された V_0 との差が、正味のオプション価値 = C となる。

$$C = V_0 (5) - V_0 (3) \quad (6)$$

(2) 2. 市場の完備性 (一物一価の原則) を前提としない場合の 2 項モデルは、汎用性が増すが、操作性に劣る。

前述のとおり、市場の完備性、すなわち、一物一価の原則を前提としない場合においても、2 項モデルを適用することが出来る。この場合の違いは何か。それは、(実現確率として一定数である) リスク中立確率 (p^*) を用いることが出来ないため、通常の実現確率 (p) と期待収益率 (μ) を用いて、次の時点 (t_1) の資産価値を現在価値に割り戻す必要がある。

まず、実現確率（ p ）と期待収益率（ μ ）の値を定めることが必要となる。期待収益率については、既存のコーポレートファイナンス等の議論で示されているように、幾多の方法が提案されており、実務上使用しうるレベルではあるが、政府のような公的主体が実施するプロジェクトについては、「社会的割引率」の値の問題として、その決定に当たって恣意性を排除する必要性など、相当注意を要する⁶。実現確率については、さらに、その恣意性等に注意する必要がある。

他方、市場の完備性＝一物一価の原則を前提とする場合には、実現確率や期待収益率の変化に関わらず、上昇係数、下落係数、リスク・フリーレート（ r ）が一定であるという仮定のもと、一定数のリスク・フリー割引率（ r ）とリスク中立確率（ p^* ）のみを用いればよい。市場の完備性が仮定されない場合には、このような便利な点が失われることとなる。

そして、2項モデルを、より現実の状況に近い設定に適用する場合、例えば、10期間など2期間を超えて、意思決定を遅らせることが出来る場合などにおいて、10期間にわたる資産変化を考える場合には、実現確率（ p ）と期待収益率（ μ ）は、10期間の時間の経過とともに、途中で変化し、それも何度も変化しうる可能性がある。正確に計算しようとする場合には、いちいちその変化を計算に反映させる必要が出てくる。市場の完備性を仮定する場合には、このような途中過程におけるこのような作業は必要ない。

ただ、考え方をかえれば、2項モデルは、一物一価のような厳しい仮定をおいても用いることができ、それを仮定しない場合にも、用いることができることから、汎用性の高い柔軟なモデルであるといえる。

(2) 3. その他の金融市場類似性を用いる必要がない。

また、2項モデルは、金融市場のような、情報伝達に関する効率性命題や取引コストの低さなど、ブラック＝ショールズの公式が必要とした前提条件も必要としない。このため、2項モデルは、不動産や衛星関連機器のように、取引市場に厚みのない資産を不確実性下で評価する場合（観測可能な価格情報や流動性が欠如している場合）や、典型的な公共事業のように、実施者が国や自治体に定まっておき意思決定主体の技術レベルなどの属性が実現価値に相当程度反映される場合（プライベート・リスクのある場合）のプロジェクトの価値について、不確実性を加味して評価する場合により適しているといえる。

さらに、2項モデルにおいては、ブラック＝ショールズの公式が前提としていたその他の仮定、特に、行使期限までに配当のないこと、原資産の期待収益率とボラティリティ、権利行使価格、リスク・フリーレートが期間中一定であること、についての仮定も必要ない。ただし、これらの仮定を緩めた場合には、それを反映した形で計算することが必要となるため、計算自体の単純さは失われることとなるのは勿論である。

また、特に、市場に非常に多数の参加者があるため、個々の参加者の行動が価格形成に与える影響を無視できる（個々の参加者がプライス・テーカーとなる）ような状況（いわゆる完全競争における必要条件の一つ）は、必ずしも、必要とされない。これ

⁶ 社会的割引率が抱える恣意性を指摘する例として、例えば、藤井監修(2001)「自由化時代の交通政策」p98-99。

により、寡占状況にあり、少数の参加者の行動が、市場での決定結果に影響を及ぼす場合についても、2項モデルを用いて分析することが可能となる。

(2) 4. 2項モデルはシンプルで扱いやすいが、様々な限界がある。

このように、単純な構造をもつ2項モデルは、多くの場面に適用できる汎用性の高い柔軟なモデルであるが、

基本構造の前提から、単位時間内の変化は、上昇か下落の2者択一である。ブラック＝ショールズの公式が資産価格の変化について一定の確率分布を前提として連続的に把握しているのに比べると、非常に単純化したモデルである。ただ、この点、現実の複雑さを他のモデルに比較してどの程度精度良くモデル化しているかについての判定は必ずしも容易でないが、実際に用いる場合には、(説明を受けた方があまりに機械的、単純なモデルではないかとの「不信」を招かないために)注意を要する可能性がある。

同様にモデルの前提から、最終時点までの各時点における資産の価値を何らかの方法により予測する必要がある(将来キャッシュフローの予測)。このため、従来から需要予測の精度の問題としてなされている多くの批判がそのままあてはまる。他方、ブラック＝ショールズの公式は、初期値を与えることで、終期までの価値変化は幾何ブラウン運動(対数正規分布)のモデルにしたがって予測される。

モデルの計算過程による制約から、考慮する将来に、数日から数十期先までなどの制限が実際上必要となる。計算機の性能の向上から、相当将来まで行うことは可能であるが、予測精度との関係で、遠い先までの予測は現実的でないと思われる。これは、後に述べる動的計画法(ベルマン方程式法)が、意思決定の最終期限を設けず、価値評価できるのと対比される制約といえる。しかし、いずれにせよ、2項モデルは、その構造が大変シンプルで、汎用性が高いことから、リアル・オプションの評価法として、頻繁に取り上げられ、用いられている。

4-9 2項モデルを用いた分析例

複占的な競争状況における市場参加者の投資タイミングに対するリアル・オプションQ項モデル)及びゲーム理論的手法による分析

ここでは、リアル・オプション価値評価手法のうち2項モデルの応用事例を説明する。以下では、いわゆるメール便市場のうち信書にあたるか否か未確定とされている部分を、ここで仮に「小型書類運送市場」と呼んで取り上げ、そこにおける参加者の投資タイミングの意思決定について、完全競争の場合、複占の場合(参入規制ケース)、独占(国家独占ケース)の場合に分けて、2項モデルを適用し、複占の場合にいては、ゲームの理論の基本的な知見と組み合わせて分析を試みる⁷。

(1) 「小型書類運送市場」を題材とする理由 競争市場から独占市場までの広い可能性

郵政公社設立に向けた(または、それ以降までならんだ)一連の議論では、はがきなど損失を計上するサービスをいかに全国的に維持するか(ユニバーサル・サービス)の問題から、公社の子会社への出資範囲、国庫納付金の有無、さらには約360兆円に及ぶ郵便貯金を原資とした財政投融资制度と国内金融市場の改革の問題にまで及ぶ、数多くの問題が議論されている。

ここでは、こうした制度的なマクロのレベルの問題ではなく、信書であるか否か確定されていない比較的小型の書類の運送に関するミクロなレベルの市場に注目する。(具体の書類の内容等は以下の表等参照) その理由は、郵政公社設立のための法案修正等の作業が進んでいくにつれ、小型書類が信書にあたるか否かの問題も徐々に定められていくことになると思われるが、その結果により、以下にのべるように、この市場の構造が、競争的か、独占的か大きく変わることになると思われるからである。つまり、信書の範囲が広く定義され、新規参入が認められなければ、本市場は独占になり、新規参入が制限的に認められれば、寡占構造になる。信書の範囲(=規制範囲)は広いものの新規参入が認められる、または、信書の範囲(規制範囲)が狭く定められれば、市場構造は、競争的になる。

2項モデルは、市場の環境が、金融市場のように多数の参加者が非常な流動性をもって取引を行うような競争的な状況にある場合に適用できることに加えて、参加者が少なく、個々の参加者が価格形成に与える影響が格段に大きい、寡占・複占構造や独占状況におても、適用できる。小型の書類に関する輸送サービス市場は、信書の定義と参入条件により、大変競争的な構造から独占状況まで、多様な可能性があり、広い適用範囲を有する2項モデルを用いて分析するのにふさわしい事例と考える。

(2) メール便と既存郵便サービスについて

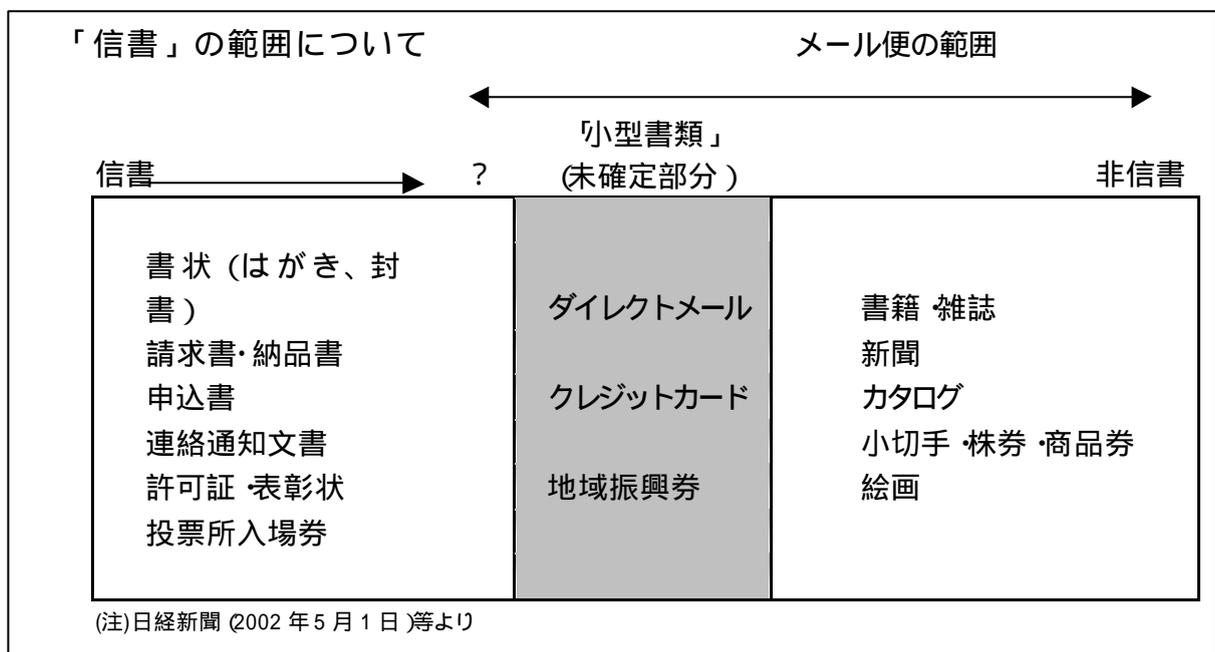
(2) 1. 「小型書類輸送市場」の実態

カタログ等の文書の運送を内容とするいわゆるメール便(信書便)とされている運送サービスの市場のうち、ダイレクトメール、クレジットカード等のA4の封筒サイズ程度までの一定の書類(以下、「小型書類」と記述。)の運送は、民間企業から多数の消費者等へ送られるなど収益性が大きいとされ、小型書類の運送市場の取扱いにつ

⁷ この例については、Smit・Ankum(1993) PP241-250 に記述されていたモデルに拠った。

いては、総務省（15年に誕生後は郵政公社）と宅配便事業者（正式には、貨物自動車運送事業者。以下単に、事業者と記述。）等の間で、論争が行われている。

報道等によると、総務省の考えは、小型書類はいわゆる信書にあたり、信書の運送は郵便法の規定により国家の独占とされているから、小型書類を事業者が運送することは郵便法違反との立場と見られる。他方、事業者の考えは、同じく報道等によれば、多数に対しほぼ同一の内容を提示することなどから、信書（一般的には、特定の受取人に差出人の意思を表示し、または、事実を通知する文書とされている。）にはあらず、したがって、郵便法違反ではない、との立場と見られる。なお、事業者は、貨物自動車運送事業法上の貨物運送事業者であり、小型書類（及びそれ以外のカタログ、小切手等の書類）の運送サービス（いわゆるメール便）について、料金内容を同法にしたがって国土交通省に届け出ている。（なお、平成14年法律第77号により、平成15年6月までに一般貨物運送事業に係る運賃・料金の事前届出制は廃止されることとなった。）



(2) 2. 現在のメール便市場概観

いわゆるメール便市場は、報道等によれば⁸、カタログ、パンフレット、雑誌などを受領印なしで家庭の郵便受けに届けるサービスに関する市場で、企業から事業者が一括して請け負っているとされる。最大手宅配便事業者を中心に7社が参入済みである。取扱数などの市場の規模を示すデータは、各社とも公開していない。ただ、メール便の最大手の売上額は557億円程度（12年度実績）である。メール便市場全体の売上高は、おおよそ1,000億円程度と報道されている。

代表的なメール便のサービス内容を以下簡単に紹介する。
 (商品規格)

⁸ 例えば、日本経済新聞社 2002年5月1日「信書素通り メール便拡大」

荷物の大きさは、縦 + 横 + 厚さの合計が 70 cm以下、厚さは 2 cm以内、最長辺 40 cm以内、重量 1 kg以下。

(料金)

料金は、全国一律で、300 gまで 160 円、600 gまで 210 円、1 kgまで 310 円。月々の利用料金をまとめて徴収。

(その他)

配達所要日数は、(一部離島を除いて) 3日から 4日。利用にあたっては、事前に契約が必要(印紙代(契約期間により) 200~ 4,000 円)。

こうした小型書類は、その大きさから、郵便においては、定期刊行物としては第 3種郵便物、それ以外としては定形外郵便(第 1種郵便物)または冊子小包と分類されている郵便物にあたると思われる。以下に、これら競合するサービスの内容を、対象商品の最大規格、料金内容等について比較し、まとめた。

競合するサービスの比較

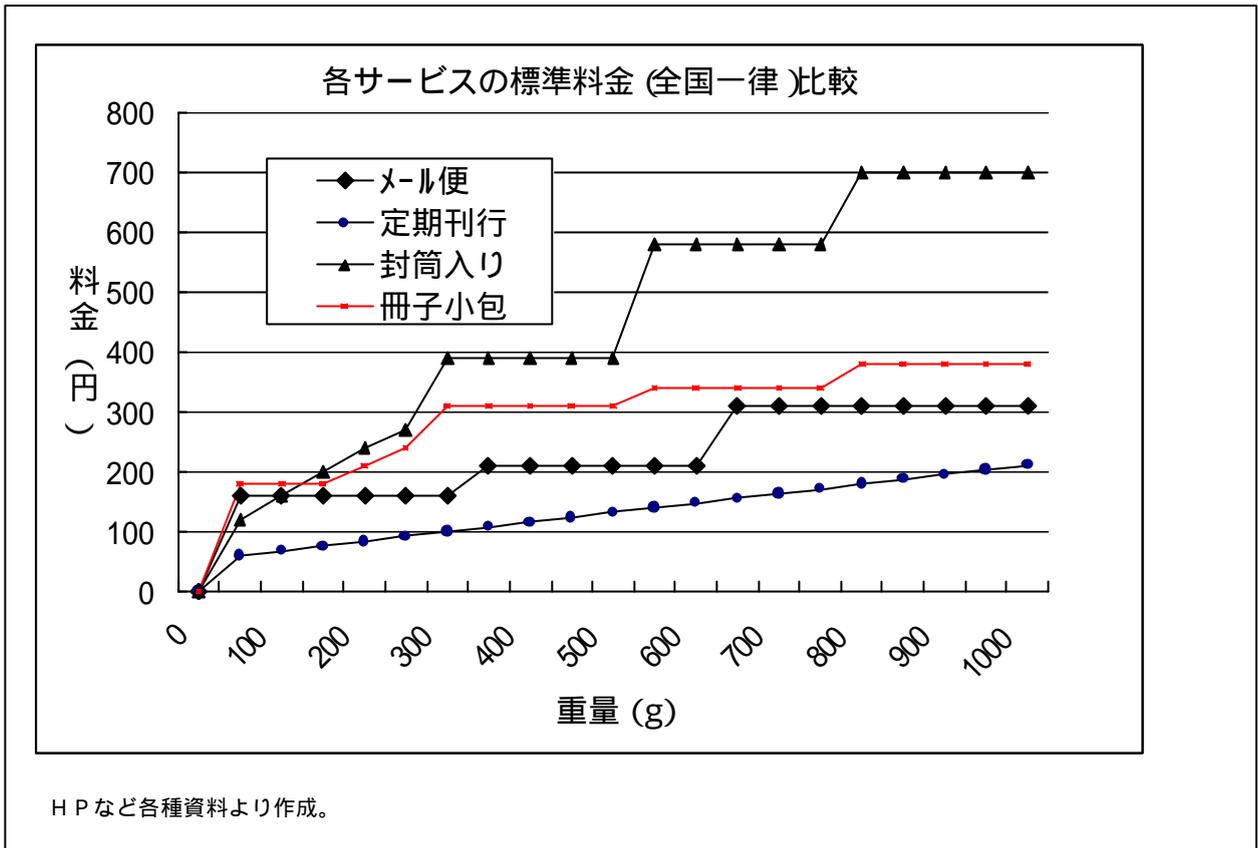
競合サービス			メール便 (Y社)	通常郵便		冊子小包
				定期刊行物 (3種)	封筒入り (1種定形外)	
最大規格	最長辺最大	cm	40	60	60	100
	3辺合計最大	cm	70	90	90	150
	最大厚さ	cm	2	-	-	-
	重量(以下)	kg	1	1	4	3
地域別料金			全国一律	全国一律	全国一律	全国一律
最大規格物の料金			310	154-212*	700*	380*
所要日数		日	3~ 4	数日	数日	数日
取扱所			(事業所)3,291	(郵便局数) 24,778		

(事業所数は、14年3月末現在連結ベース)

(*: 個数等による割引あり)

(2) 3.競合サービス比較

ここから判るように、いわゆるメール便については、対象となる書類の規格としては、競合する郵便サービスの規格内に収まっており、全国一律の料金制についても共通である。相違点は、料金の具体的な額、輸送スピード、預けられる取扱所の数である。競合するサービスの標準料金の水準を示すと以下のとおりとなる。



メール便の料金戦略は、この図からもわかるように、ここでの郵便サービス3種中最も低い料金水準の定期刊行物を扱う第3種郵便と、中間の冊子小包郵便の2つに料金設定していることが判る。非定期・単発に出される封書入りのダイレクトメール等（第1種郵便のうちの定形外郵便）の料金水準に対しては、メール便は100g以上において常に優位にたっており、特に、300g以上の重量物については、半分以上の水準で、きわめて価格競争力が高く設定されている。（定型郵便なども含むが）ダイレクトメール全体では、郵便（通数ベース）の24.3%⁹にも上っており、郵便当局が脅威を感じることも肯げよう。

ちなみに、総務省の公表資料¹⁰によれば、郵便物の種類別収支で、黒字となっているのは、第1種郵便のみである。したがって、メール便は、こうした唯一の収益源に対する脅威であり、その動向は、郵便サービスにとって死活的に重要であると思われる。郵政サービスにとってみれば、メール便は、はがきなどの輸送サービス提供義務とセットでないで、収益源のみを奪い、損失の出る部分のコストを負担しない、いわゆるクリーム・スキミングと映るであろう。

⁹ 平成12年我が国の郵便の利用構造調査による。総務省郵政研究所第14回研究発表会第1部・研究発表要旨集（平成14年6月）p8

¹⁰ 郵政3事業の在り方について考える懇談会（第2回）提出資料（総務省）平成13年7月9日「郵便物の種類別収支（試算）によれば、平成11年度の郵便サービス全体で514億円の赤字であるが、第1種郵便物のみが黒字である。独占分野（ここでの定形外郵便を含む）で278億円の黒字、非独占分野（書籍その他）でも28億円の黒字で、第1種全体では306億円の黒字となっている。他の郵便物（例えば、はがき（第2種）の86億円、定期刊行物（第3種）の297億円）と比べれば、第1種郵便は大変貴重な収益源であるといえる。

(2) 4. 小型書類運送市場 市場構造と参加者の投資判断の関係に関する分析

このように、メール便は、郵便サービスに対する大変な脅威となっているが、その焦点は、メール便全体ではなく、信書か否か確定していない小型書類市場の部分である。信書でない関係者間で確定している部分は、すでに事業規制については確定しており、競争環境が変動することはないと思われる。

他方、先にも触れたとおり、信書か否かに争いのある小型書類市場は、信書であることになれば、制限的な参入政策がとられると寡占的な構造になり、非制限的な参入政策がとられれば、競争的な市場構造になる。以下に14年4月末現在の状況をまとめた¹¹⁾。

このため、輸送サービスを所管する行政当局からすれば、この市場は大変関心のある分野である。特に、市場構造の変更により、利用者関連のサービス水準がどの程度の変動をうけるのか、より具体的には、例えばIT関連などサービス高度化のための投資を郵政公社や事業者がどの程度行うのか、を知ることは、そもそも、市場の構造をどの程度競争的にすべきかに関して大きな示唆を与えられると思われる。

小型書類市場においては、郵便サービスが黒字で、新規参入事業者が出現していることから、当該市場においては、以下別に述べる経済的レントが存在し、参入者やIT化などの外的環境¹²⁾によりそのレントが破壊されつつある状況と考えることが可能である。

政策担当者にとって興味深いあるべき市場構造に関する議論に資するため、以下では、前提として必要になる市場構造と参加者の投資行動の分析として、「経済的なレント（超過利潤）」と「競争による経済的なレント（オプション価値も含む）の破壊」の考え方を導入したうえで、リアル・オプション価値評価手法のうち、2項モデルを用い、また、一部ゲームの理論の考え方もあわせて用いて、考え方を整理する。

¹¹⁾ なお、その後の報道によれば、調整により、いわゆるグレイメールは基本的に信書であり、クレジットカードは非信書とされる模様であると報道されている。（平成14年7月3日付け日本経済新聞など）

¹²⁾ 情報化が郵便事業に与える影響について、当事者側（郵政研究所）は、現時点では通数の明確な減少は見られないが、潜在的脅威となる要素（例えば、電子請求書通知サービスなど）が存在するとしている。（総務省郵政研究所 龍野第一経営経済研究部長「社会経済の情報化と郵便事業 - インターネットが与える影響（インパクト） - 」第14回研究発表会第1部・研究発表要旨集（平成14年6月）p8）

(参考)

メール便と信書便の比較

競合サービス			現状のメール便サービス	信書便法案の規制 (要求サービス水準) の内容	
			メール便 (Y社)	一般信書便	特定信書便
規格	最長辺最大	cm	40	40	90 超 (該当レベル)
	3辺合計最大	cm	70	73 (=40+30+3)	-
	最大厚さ	cm	2	3	-
	重量 (以下)	kg	1	0.25	4 超 (該当レベル)
地域別料金			全国一律	全国一律	-
料 金			160 円, 210 円, 310 円	定額又は定率 25g 以下 80 円まで	1,000 円以上 (該当レベル) 料金自体に規制なし
所要時間		日	3 ~ 4	原則 3	3 時間以内
取扱所/ユニバーサルサービス			(事業所) 3,054 (取扱店) 286,389	信書便差出箱 10 万以上な ど全国サービス提供義務	-
事業 規制	参 入		許可 (国交大臣)	許可 (総務大臣)	許可 (総務大臣)
	事業計画・運送約款		認可 (国交大臣)	認可 (総務大臣)	認可 (総務大臣)
	料 金		(事前届出 廃止へ)	事前届出 (総務大臣)	-

(注) '14 年 4 月末現在の状況に基づく。信書便の内容は、政府提出の信書便法案による。

・メール便は、貨物一般の運送事業に関する貨物自動車運送事業法の規制にしたがうのみで、メール便開始時の許可などのメール便固有の規制は存在しない。

なお、一般貨物自動車運送事業の料金事前届出制の廃止等を内容とする改正案が国会審議中。

特定信書便は、規格、料金、所要時間いずれかが該当すれば信書便法案の規制対象。

特定信書便には、料金規制やユニバーサルサービス提供関連の規制がない。

他人の需要に応じ有償で自動車を使用して貨物を運送する事業者は、貨物自動車運送事業法

に基づき、国土交通大臣の規制を受ける。そのうち、一般・特定信書便のサービスを

提供するものは、信書便法案にしたがって、総務大臣の規制を受けることとなる。

平成 12 年度末の郵便局数 24,778、ポスト数 177,217

(3) 交通市場における経済的レント(超過利潤)の存在について

現実の交通サービス市場(の少なくともいくつか)においては、安全規制などの(参入)規制があること、規模・範囲の経済が存在すると思われること、サービス供給者が新たな技術・ビジネスモデル開発により特許などの知的所有権を取得すること、長年にわたりサービスの信頼性に関するブランド価値を培うことなど様々な理由により、サービス供給者に、市場において長期的に収束するレベルと考えられる資本コスト分の収益を超過した収益、いわゆる超過利潤(経済的なレント)を得ることがある。また、交通サービスという実物サービス市場においては、金融市場と異なり、取引コストが有意なレベルにあると思われ、情報伝達における効率性命題が成立していないと考えられる。

したがって、こうした経済的なレントは相当期間にわたり継続することが見込まれる。ただ、中期的にはこうした経済レントは、競争状況では新規参入者により、あるいは技術革新により、時とともに失われていく。ここでは、リアル・オプション理論による分析に入る前提として、市場構造の違い(完全競争・複占・独占)に応じて、こうした経済的なレントがどのように変化(減少)してゆくかについてのモデルを説明する¹³。

(4) 経済的レントについての基本モデル

企業の各期のキャッシュ・フローを以下のようにもモデル化する。ここでは、長期的には、超過利潤のない水準に利益水準が落ち着くので、まず、資本コストに対応する部分(Ii)があり、短期的には、超過利潤があり得るので、その部分(ER_t)を加えるという形になる。

$$\overline{CF}_t = (I)i + \overline{ER}_t \quad (1)$$

$$t = 1, 2, 3, \dots, \infty$$

\overline{CF}_t = キャッシュフロー (= 各期の期待値)

I = 投資に伴うキャッシュの支払

i = 資本コスト(機会費用)

\overline{ER}_t = 経済的なレント(超過利潤)の期待値

(5) 完全競争から独占までについての経済的なレントに関する変化

(5) 1. 完全競争の状況における経済的なレントの減少モデル

経済的なレントについては、完全競争下においては、指数関数的に減少すると考える。

¹³ この例についても、Smit・Ankum(1993)に拠った。

$$\overline{ER}_t = (\overline{ER}_0) e^{-dt}, \quad (2)$$

$t = 1, 2, 3, \dots, \infty$

(5) 2 (1) 複占におけるモデル ゲーム理論の知見を2項モデルへ導入

複占（供給側の市場参加者数が2）の場合、あるプロジェクト実施のタイミングは、競争相手の行動により影響を受けると考えられる。したがって、参加者の意思決定は、通常の2項モデルにおけるような、プロジェクトの価値がコストを上回れば実施し、コストを下回れば延期する（ $= \max[V_{t,s} - I, 0]$ ）という比較的単純な構造をはなれて、各時期におけるプロジェクトの価値が、参加2者によるゲームの結果により定まる構造が加わる。すなわち、ゲームの結果得られたある時期におけるプロジェクトの価値（ナッシュ均衡解）について、通常の2項モデルと同様の考えにより、リスク中立確率とリスク・フリー・レートにより現時点に（後ろ向きに）割引くことにより意思決定する構造となる。

この構造は、より一般的には、以下のように考えることができる。通常の2項モデルでは、外的経済状況により定まる需要動向などのプロジェクト価値変動への影響を、一定の価値変動モデルにしたがって上昇と下落の2つに分け、それぞれの場合のプロジェクト価値を算出し、価値が算出された後には、コストと比べて価値が高ければプロジェクトを実施し、価値がコスト割れしていればプロジェクトを延期するという意思決定モデルにより上昇、下落の場合の状態におけるプロジェクト価値を確定する。最終的には、市場の完備性を仮定し、リスク中立確率を用いて、各時期におけるプロジェクトの期待値を算出し、それを、リスク・フリー・レートにより現在価値に割り引いて、柔軟性を考慮したプロジェクト価値を計算していた。

ここでは、上昇、下落の各状態における意思決定を、コストと比べて実行するかしないか決めるという固定的なものでなく、上昇、下落に関する一定の価値変動モデルを前提として、さらに参加者同志のゲームによる選択があり、その結果として状態におけるプロジェクトの価値が確定するという構造となる。

具体的には、ゲームに関しては基本的なモデルとして、ナッシュ均衡におけるモデル、すなわち、完全情報下の非協力型のモデルを考え、これに加えて現実に近い市場構造を加味するため、複占の当事者同士は、非対称な市場支配力を有する（一方が他方に対して優位な市場構造）と考える。（完全情報下なので、起こり得るゲームの結果は全て判明している。一つの場合を選び、通常の2項モデルと同様に所与の条件にしたがって最終期限までのペイオフを確定し、それから、コスト割れしたら延期するという柔軟性を反映した確定的なペイオフを定め、それをリスク中立確率により割引く。これを全ての場合について行う。得られたゲームについて、ナッシュ均衡を考えることとなる。

ゲームのペイオフについては、投資した場合には、 $V - I$ （プロジェクト価値 - コスト）、延期した場合には延期できるオプションの価値 C を得るものとする。ここで、これらの価値は、両者の行動（投資するまたは延期する）によって定まることになる。注意すべきは、相手が延期しても投資した参加者は、（投資しても延期しても）先行者として多くの価値を得ることである。

$V_{\text{リーダー}} > V$ (= 完全競争下のプロジェクト価値)
 $C_{\text{フォロワー}} < C$ (= 完全競争下のオプション価値)

延期できる柔軟性のある同時投資ゲーム(完全情報・非協力・非対称型)
参加者 A:リーダー、B:フォロワー

		参加者 B	
		投資する	延期する
参加者 A	投資する	V-I V-I	$V_{\text{リーダー}} - I$ $C_{\text{フォロワー}}$
	延期する	$C_{\text{リーダー}}$ $V_{\text{フォロワー}} - I$	C C

(凡例)

Aのペイオフ	Bのペイオフ
--------	--------

V:原資産価値
 I:投資コスト
 C:延期する場合のオプション価値

(5) 2 - (2) .複占市場における経済的なレントの減少モデル

ここでは、競争条件における経済レントの減少の仕方については、ゲームの結果(ペイオフ)の設定を定める際に、両者が同時に投資した場合における原資産の競争による価値破壊(係数: $v(0 < v < 1)$)と一方だけが先行的に投資した場合における原資産の競争による価値破壊(係数: $(0 < \dots < 1)$)を比較し、同時投資の減少分(v)をやや少なくし、一方先行投資の場合の減少分()をやや大きくする($v < \dots$)こととする。
 [「2項モデルと寡占ゲームの基本」の図 参照]

(5) - 3 .独占における経済的レント減少のモデル

仮に市場が自然独占状態にあり、当該市場には供給者 1 者のみが存在する場合を考えると、産業組織論で従来から分析されてきたように、新たな参入等が全く想定されないため、経済的レントは減少しないと考えられる。したがって、この場合の経済的レントは、以下のように一定であるとモデル化される。

2項モデルと寡占ゲームの基本

(各ボックス内の凡例)

Aの*ハイ*カ Bの*ハイ*カ

u:市場環境の好転によるプロジェクト価値の上昇割合
d:市場環境の悪化によるプロジェクト価値の下落割合

A:市場支配力大
B:市場支配力小

		B			
		投資する:I	延期する:D		
A	投資する:I	$vV_0 - I$	$vV_0 - I$	*1	$V_0 - I$
	延期する:D	$V_0 - I$	*1	*1	*1

u

d

		I		D	
		$vV_{1,u} - I$	$vV_{1,u} - I$	$V_{1,u} - I$	*2
D	I	*2	$V_{1,u} - I$	*2	*2
	D	*2	*2	*2	*2

		I		D	
		$vV_{1,d} - I$	$vV_{1,d} - I$	$V_{1,d} - I$	*3
D	I	*3	$V_{1,d} - I$	*3	*3
	D	*3	*3	*3	*3

V_0 : プロジェクト等の現在価値、 V_1 : 次期におけるプロジェクト価値
 I : コスト
 q : リーダーが先行して投資する場合に残るプロジェクト価値の割合
 v : 両者が同時投資する場合に残るプロジェクト価値の割合
 p : リスク中立確率
 r : リスク・フリー割引率
 $C_{1,u}$: 次期に価値が上昇したときに延期するオプション価値
 $C_{1,d}$: 次期に価値が下落したときに延期するオプション価値

$$*1 = \max\left[\frac{pC_{1,u} + (1-p)C_{1,d}}{1+r}, 0\right]$$

$$*2 = \max\left[\frac{pC_{2,uu} + (1-p)C_{2,ud}}{1+r}, 0\right]$$

$$*3 = \max\left[\frac{pC_{2,du} + (1-p)C_{2,dd}}{1+r}, 0\right]$$

$$\overline{ER}_t = \overline{ER}_1$$

$$t = 1, 2, 3, \dots, \infty$$

(6) 市場構造と参加者の投資行動に関する定性的な分析

(6) 1. 完全競争

完全競争状況においては、経済的レントが瞬間的に現れると、他の参加者が一斉に同種サービスを長期均衡価格にて提供するので、経済的レントが長期的に残ることはない。この場合、市場内参加者は、最善の技術・ビジネスモデルをもって常に良いサービスをよりやすく提供しており、イノベーションのための研究開発等、投資判断はすばやく行われると考えられる。

(6) 2. 経済的レントの存在する競争的市場

ブランドイメージなどにより経済的なレントを有する参加者は、市場において優位な立場に立つが、こうした経済的なレントの存在に気づいた競争相手は、こうした既存の経済的なレントを狙い、参入が起こるか、または、潜在的な参入の可能性により、企業価値やプロジェクト価値の現在割引価値は、減少する。これが競争によるプロジェクト価値の破壊（プロジェクト価値にオプション価値があれば、その部分は、競争によるオプション価値の破壊）である。

(6) 3. 独占状況

独占的状況においては、参入がなく、その可能性という脅威もない。経済的レントは減少しない。したがって、投資の延期は、（経済的レントの減少がないので）プロジェクトの現在価値も競争による破壊がなく、減少しない。独占者にとっては、投資すべきか否かの臨界値は、将来にわたり一定と考えられる。ここで、独占者においてどのような投資判断が行われるかについては、次のように考えることができる。

比較的低い現在価値のプロジェクトについては、投資を延期する強いインセンティブが働く。

比較的高い現在価値のプロジェクトについては、早めに投資するインセンティブが働く。

(6) 4. 複占状況

対称型の複占の場合（参加者の支配力が等しい場合）には、いずれの参加者にとっても投資プロジェクトの現在価値は等しい。したがって、両者にとってのペイオフは、同じとなる。

非対称の複占の場合（参加者の一方が優位性を持つ場合）には、優位者（リーダー）にとって投資プロジェクトの現在価値は、非優位者（フォロワー）にとっての投資プロジェクトの現在価値より大きい。しかし、いずれの場合においても、投資タイミングについては、参加2者のゲームにより定まる。したがって、ゲームの具体的な内容をどのように設定するかにより、投資タイミングが変わる可能性が大きい。最も単純な、完全情報下の非協力型ゲームの場合でいわゆるナッシュ均衡が達成される場合においても、投資タイミングがいかなるものになるかについては、投資プロジェクトの価値と投資

しないときのオプション価値の差、など、きわめて具体的な市場の条件により、異なることとなる。

(7) 複占状況下の競争モデルを用いた「小型書類運送市場」における分析(簡略モデル)

(7) 1. 複占市場の分析の前提

以下では、約 1,000 億円(売上高)程度の市場規模である小型書類運送市場において、信書便法案(指針等も含む。)の規制内容によっては、宅配便事業者ほぼ全てに参入・サービス提供を許すような非常に競争的な市場環境から、国家による独占までの幅広い可能性が存在する。こうした市場構造が、参加者の投資行動にどのように影響を与えるか、例えば、ITを活用して貨物のトラッキングや携帯端末への到着予告など、利用者へのサービス水準を高める投資行動に、市場の競争レベルがどのように影響を与えるかにつき、分析例を紹介する。

具体的には、現実にも最も可能性の高いといわれている複占構造、すなわち、主要な2者のみが参入してサービス提供する複占的な状況につき、2項モデルを用い、ゲーム理論の考え方も結合して分析し、その分析内容との対比で競争的な環境と独占的な状況とを述べる。複占状況における数値例においては、IT関連などの利用者のサービス水準を高める新規投資を考える。本市場においては、先行者のブランド戦略や顧客ニーズに適応した(到着時刻保証などの)サービスバリエーションにより経済的なレント(超過利潤)が存在するとする。ここでは、IT関連投資による(双方型の到着時期通知・変更・トラッキングなど)サービス向上のタイミングを考えているが、電子メール等の代替手段の出現により、刻々書類運送市場は侵食されており、こうした経済的なレントは、時期の経過とともに破壊されていくものとする。

ここでは、複占市場への影響力が非対称な2者(一方がリーダーで、他方がフォロワー)となるような構造を考え、完全情報下非協力的なゲームを行い、ナッシュ均衡に達する場合を想定して、計算する。参加者は、ゲームにおいて、相手の行動を考えて、投資するか延期するかの決定を行い、両者が投資した段階でゲームが終了する。(ただしここでは、どちらかが投資した段階までを記述した。)

具体的には、約50百万円程度の投資負担により、リーダーにとっては100百万円のリターン、フォロワーにとっては80百万円のリターンをもたらすと仮定する。ゲームは、双方投資また、競争による経済的レントの破壊については、リーダーが先行投資した場合には、同時投資した場合より破壊が少ないと考え、破壊の係数を($\alpha=0.55$)とし、同時投資した場合の原資産の破壊については、破壊の係数($\nu=0.5$)とする。また、1期投資を延期した場合のプロジェクトについては、約13%の価値破壊が起きると仮定する。その他のバリエーションについては、H. Smit and L. Ankum に倣って、以下の具体例のように設定した。

[「数値計算例」の図 参照]

(7) 2. 複占状況での数値(簡略モデル)分析の結果

別図の「数値計算例」の設定にしたがい分析を行うと、今期においては、リーダー・フォロワーとも投資を延期し、市場環境(需要動向、ニーズの変化等)の好転により投資プロジェクトの収益が上昇した場合には、リーダーのみが投資し、市場環境が悪化し投資プロジェクトの収益が下落した場合には、リーダー・フォロワーとも投資を延期する、という結果となる。

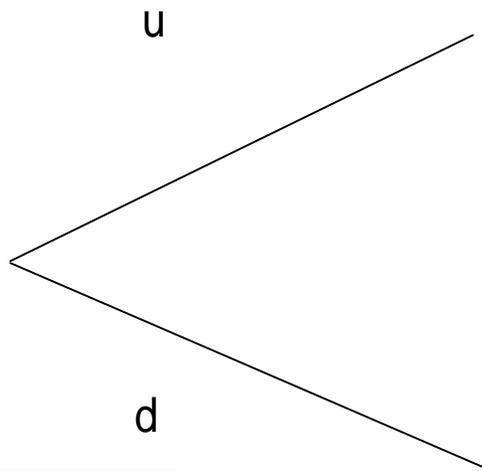
数値計算例

(各ボックス内の凡例)
 Aのハイチ Bのハイチ

u:市場環境の好転によるプロジェクト価値の上昇割合=1.5
 d:市場環境の悪化によるプロジェクト価値の下落割合=0.66

A: (支配力大)
 B: (支配力小)

		B	
		投資する:I	延期する:D
A	投資する:I	0 -10	5 4
	延期する:D	7 6	11 3



		I	D
		15 2	21 7
D	I	13 7	18 8
	D		

		I	D
		-21 -27	-18 0
D	I	11 -25	2 0
	D		

V_0 : プロジェクトの現在価値 = Aに対して100, Bに対して80
 V_1 : 次期におけるプロジェクトの価値 (毎期約13%競争による価値の破壊が起きると仮定して計算)
 I : コスト = 50
 q : リーダーが先行して投資する場合に残るプロジェクト価値の割合 = 0.55
 v : 両者が同時投資する場合に残るプロジェクト価値の割合 = 0.5
 p : リスク中立確率 = 0.52
 r : リスク・フリー割引率 = 0.1
 $C_{1,u}$: 次期に価値が上昇したときに延期するオプション価値 (以下次々期においても同様)
 $C_{1,d}$: 次期に価値が下落したときに延期するオプション価値

ゲームによる均衡を示す。

(7) 3.非対称型複占状況での分析のまとめ

市場参加者の優位性に差がある非対称型の複占市場において、参加企業の投資行動はどのようになるかに関する以上の定性的な分析及び簡便なモデル数値分析をあわせてまとめを以下に記す。

市場において優位な立場にあるリーダーにあつては、投資するプロジェクトの現在価値が大きい場合には、投資しないことによる機会費用が大きいいため、劣位な立場の参加者(フォロワー)が投資するか否かにかかわらず、速やかに投資するインセンティブが働くと考えられる。この意味で、リーダーの柔軟性は大きくないといえる。

市場のリーダーが、現在価値の小さいプロジェクトの投資タイミングを考える場合には、と反対に、投資のタイミングに関する大きな柔軟性があることになると考えられる。(裏返して言えば投資するインセンティブが小さく、投資を延期するインセンティブが働くことになる。)リーダーは市場で優位な立場にあるため、競争による経済的なレントが破壊される可能性が小さい。したがって、市場を取り巻くマクロ的な経済環境が好転(例えば、需要が増えるなど)するまで安心して投資タイミングを遅らせることができる。(上記の簡易な数値モデルにおけるリーダーのケース) 経済環境が好転しなければ、フォロワーが先行投資しても、破壊される経済的なレントが充分小さければ、リーダーは投資しない、という選択肢もあり得る。

市場のフォロワーについては、現在価値の大きなプロジェクトの投資タイミングは、リーダーの先行投資による経済的なレントの大きな破壊が行われる前に、速やかに投資するインセンティブが働くものと考えられる。

市場のフォロワーが、現在価値の小さいプロジェクトの投資タイミングを考える場合、いずれにせよ大きなリターンが期待できないため、市場環境が好転するまで待つインセンティブが働くと考えられる。(簡易な数値モデルのB:フォロワーの場合と同じ。)

投資行動分析の項目	市場のリーダー		市場のフォロワー	
	プロジェクトのNPV		プロジェクトのNPV	
	大	小	大	小
投資のインセンティブ	+	-	+	-
投資タイミングの柔軟性	-	+	-	+

(注)表中、+はインセンティブ大又は柔軟性が大きいこと、-はその逆を指す。

なお、本稿での分析は、小型の書類に関する輸送サービスという極限られた部分、すなわち、書類・貨物の輸送サービス全体から見れば大変限られた一部分(せいぜい

数%程度)について、仮想的な条件を設定したうえで、市場支配力に不均衡がある場合を中心に市場参加者の投資行動を分析したにとどまる。この意味で、郵政事業全体に関する示唆を含むものでないことは勿論、小口貨物輸送サービスや郵便サービスの全体にわたる分析を意図するものではない。

(8) 実際の小型書類運送市場への応用の可能性について

実際の小型書類運送市場にこうしたモデルを用いて分析するにあたっては、当面、以下のことに注意することが必要と考えられる。

市場を取り巻くマクロ的な経済環境の変動に金融市場と同様の(幾何ブラウン運動)モデルを当てはめることについては、経験的に許されると考えるが、その具体的な内容(例えば、資産価値変動のボラティリティ(標準偏差)の値すなわち価値の上昇と下落に関する係数)について、どのような数値を当てはめてゆくのが妥当か、さらに小型書類運送市場自体の構造(例えば、どの程度市場支配力は非対称なのかなど)について、どのような数値を用いるのが適当か、に関する実証的な研究が不可欠の前提となる。

その上で、現実の寡占市場においては、相手の行動が全て明らかになっているわけではなく、完全情報の仮定を緩める(不完全情報のゲーム)、最大の優位者に対して、その他の競争者同志が協力することを想定し、非協力の仮定を(一部)緩める(協力型のゲーム)など、適用するモデル自体についても、さらに改良・高度化することが必要となる可能性が大きい。

4-10 動的計画法 (ベルマン方程式法)

(1) 準備

(1) 1. 動的計画法の基本的な考え方

決定が数段階にわたって行われる場合に、各段階の意思決定によりその都度結果が生じ、その結果がそれ以後の段階における決定問題の前提になってくるような構造が考えられる。空港などの交通関係社会資本によく見られる、段階的な整備方式においては、このような意思決定の構造を見ることができる。

こうした構造の意思決定問題を体系的に扱った理論が、動的計画法 (Dynamic Programming) であり、1950 年代以降ベルマン (R. Bellman) を中心に、数理計画法の基本部門として進展してきた。Bellman によって展開される動的計画法は、以下の、最適性原理を一貫して利用することに、その特徴がある¹。

ベルマンによる動的計画法における最適性原理：

最適な意思決定とは、初期時点の状態と決定がいかなるものであろうとも、最初の決定の結果として起こった状態を所与としたときそれ以後の問題に関して最適であるという性質をもつものである。

こうした最適性原理を中心とする動的計画法の考え方は、意思決定の前提として必要となる変数が時系列に従って確率的に変化するいわゆる確率過程を用いる場合に、意思決定の時点に対して影響を与えるのはその直前の変数のみとするいわゆるマルコフ過程を用いた意思決定方式に大変なじむものである。マルコフ過程とは、確率過程において、ある時点の確率変数が生じる確率は、その直前の確率変数の結果のみに依存し、それより前の結果には依存しない確率過程のことをさす。

リアル・オプションのように原資産の変化モデルを考える必要がある場合に、そのモデルについて時系列的な変数の変化を確率的に把握する確率過程を用いることができ、かつ、その確率過程に上記のマルコフ過程を用いることができれば、ベルマンによる動的計画法を用いることができることになる。

(1) 2. 動的計画法の枠組みは交通関係社会資本等のプロジェクトその他に適用することも可能と思われる。

空港などの交通関係社会資本の整備が、段階的に行われる場合において、次の段階の意思決定は、前の段階までに得られた情報に基づき、その時点の状況に基づいて決定されるものであり、空港等のプロジェクトをモデル化する場合に、現在の意思決定が前の段階の状況のみに依存すると仮定することも許されるものと考えられる。前の段階までに明らかになった状況が、その時点のプロジェクトの価値に反映されると考えることは、金融市場において株価等にはその時点までの公表情報が全て瞬時に反映されるという効率性命題を交通関係プロジェクトの市場にも仮定することになる。価値決定

¹ この部分は、ディキジット・ピンディック (2002) 「投資意思決定理論とリアルオプション」第3章、Economists' Mathematical Manual (3rd ed.) Springer Chapter17などを参考にした。

の仕組みが市場と公共プロジェクトでは大きく異なり、例えば、後者は情報の流動性が大変緩やかで（徐々に慎重に決定され）、市場のように瞬時に価値が調整・決定されることはない。ただ、これもモデルにおける意思決定段階の間隔を長めにとるようになる等の適当な条件を付加することにより、慎重な検討を経て民主的な過程である国会の議決を経て決定されるプロジェクトの価値に、マルコフ性など動的計画法の前提を仮定することは、不可能とまではいえないであろう。また、これ以外の、自動車排ガスに関する環境規制措置の段階的实施などについても、各段階において、次の段階の規制実施措置に柔軟性があれば、最適実施措置に関するモデル化などについて、動的計画法の枠組みを用いて分析することは十分可能であろう。

(1) 3.最適化問題への適用についての基本的考え方

ある交通関係プロジェクトの価値を、以下のように、モデル化して最適化（例えば、価値の最大化）する。

ベルマンによる動的計画法の最適性原理の考え方に従い、現時点（ t ）におけるプロジェクトの純現在価値を、プロジェクトからの今期の収益（ p_t ）と次の時点（ $t+1$ ）におけるプロジェクトの価値の t 時点における期待値（ $E_t [F_{t+1}]$ ）に2分割する。

$t+1$ 時点におけるプロジェクトの t 時点における期待値を割引率（ r ）を用いて t 時点の価値に割り戻し、 t 期の収益と足し合わせる。（フローの価値とストックの価値の調整）

その足しあわされたプロジェクトの純現在価値について、最大のものを与えるように操作変数（ u_t ）を選び（意思決定し）得られた最大のプロジェクトの純現在価値を（ F_t ）とする。（最適化）

（動的計画法の基本的考え方の数式表現：ベルマン（Bellman）方程式）

$$F_t(x_t) = \max_{u_t} \left\{ p_t(x_t, u_t) + \frac{1}{1+r} E_t [F_{t+1}(x_{t+1})] \right\} \quad (1)$$

$$E_t [F_{t+1}(x_{t+1})] = \int F_{t+1}(x_{t+1}) d\Phi_t(x_{t+1} | x_t, u_t)$$

（各変数の説明）

F_t ：プロジェクトの純現在価値のうち最大のもの

x_t ：状態変数 = 現時点にて利用可能な情報を示す確率変数（マルコフ過程に従う。）

u_t ：操作変数・意思決定変数（例えば、投資を実行すること = 1、待つこと = 0 など）

$\Phi_t(x_{t+1} | x_t, u_t)$ ：現在の情報（状態変数・操作変数）に基づいた（条件付きの）次期における状態変数の累積確率分布関数

r ：割引率

(1) 4.有限期間から無限期間への拡張も可能

なお、有限期間内だけでなく、無限期間において、ベルマン方程式を考えることができる。この場合には、状態変数・操作変数が時間 t ($0 = t = T$) によらないと考え、単純に x とそれと異なる値 x' をとるなどとして、以下のように上記(1)のベルマン方程式を変更することで、無限時間でのモデル化が可能となる。

(無限期間におけるベルマン方程式)

$$F(x) = \max_u \left\{ p(x, u) + \frac{1}{1+r} E[F(x')] \right\} \quad (2)$$

これは、空港等のプロジェクトを実行するか否かの意思決定を行う場合、20年以内など意思決定の期限を考える場合が有限期間内の最適化問題であり、特に意思決定の期限を設けない場合が無限期間内の最適化問題と考えることができる。

(2) 動的計画法(ベルマン方程式法)を用いたリアル・オプションの考え方

(2) 1. 原資産の不確実性のモデル化

状態変数が確率的に変化することから、その確率的な変化に適切なモデルを採用することにより、状態に関するプロジェクト価値の不確実性を織り込むことになる。空港等の交通関係プロジェクトについてみれば、例えば、外的な経済環境により、空港管理主体の着陸料収入が変動するため、空港等の建設プロジェクトの価値(=将来の着陸料収入に関するキャッシュ・フローを現在に割り戻した価値から建設費等のコストの現在価値を引いた純現在価値)は、時系列に沿って株価のように確率的な変動をすると考えることが可能であろう。こうしたプロジェクト価値の変動をモデル化する場合、用いる確率的分布等に特に制限があるわけではない。しかし、もともとリアル・オプションが金融商品に関するオプションからの類推により発生してきたことから、以下に示すように、金融資産と同様の価値変動モデルを用いることが通例である。

(2) 2. 原資産の不確実性を反映した変動モデルは、通常幾何ブラウン運動が用いられる。

ベルマン方程式を用いた動的計画法を用いて、リアル・オプションの価値=交通関係プロジェクト等に柔軟性が備わっていることに関する価値(オプション価値)を評価する場合、

この場合、株価の時系列変化に用いられている幾何ブラウン運動のモデルを空港等のプロジェクト価値(x_t)の時系列変化に適用することになる。具体的には、微小時間 dt の間における x の変化に関する以下の微分方程式とその付随式に表現される内容となる。

幾何ブラウン運動の確率微分方程式：

$$dx = \mu dt + \sigma dz$$

$$dz = e\sqrt{dt} \text{ (拡散過程又はwiener過程の表現式)}$$

$$e \sim N(0,1) \text{ (確率変数 } e \text{ が標準正規分布にしたがうとの表現式)}$$

$$\Rightarrow \ln x \sim N\left(\ln x + \left(\mu - \frac{\sigma^2}{2}\right)T, \sigma\sqrt{T}\right) \text{ (変形すると対数正規分布にしたがう表現式となる。)}$$

ここで、プロジェクトの価値に関する不確実性は、プロジェクトの価値の変化が幾何ブラウン運動の確率微分方程式（対数正規分布）で示される確率的な（不確実な）変化をすることにより表現されている。

(2) 3. 柔軟性価値を含めたプロジェクト価値の評価

上記のベルマン方程式に示されている不確実性を加味した原資産の価値に関するモデルを用いて、不確実性に対応する柔軟なオプション（権利）を有する構造を反映した適当な原資産の価値の最適化問題を設定し、その解を求めることで、例えば、柔軟性（オプション）を最適に行使する時期の分析や、その場合のプロジェクト価値を算出できる。

この際、柔軟なオプション（権利）を有する構造を反映する設定については、分析したい目的により、さまざまなものが用いられる。他のリアル・オプションの評価手法で多く分析される最適行使時期を選ぶことによりプロジェクト価値を最大化すること、段階的なプロジェクトについて、多段階の実施時期を最適化することなども行われる。

ここでは、これらいくつかの設定による動的計画法のうち、比較的簡便に扱うことができ、応用範囲の広いと考えられる、いわゆる最適停止問題について、説明する。これは、プロジェクトをいつ停止するのが最適かに関するベルマン方程式を用いた動的計画法である。

(2) 4. 最適停止問題について

動的計画法のうち、最適停止問題は、交通プロジェクトの価値評価などの投資意思決定に用いることに加えて、交通関係の環境規制実施の最適な時期（事業を停止する時期の変わりに排出量をゼロとする時期を考える）を求めるなど広い応用範囲を有する。

まず、伝統的な交通関係プロジェクトに関する例に則して、プロジェクトを継続するか、停止して最終利益を得るかを意思決定する典型的な場合について、最適停止問題を説明する。

必要な前提条件として、ある交通関係プロジェクト等の現在価値を $F(x,t)$ とし、外生的な割引率を r とする。また、最終時点 T における本プロジェクト等の価値 (x_T, T) とし、今期の収益を (x, t) とする。次期におけるプロジェクトの価値 $F(x+dx, t+dt)$ の期待値を考え、それを t 時点に r を用いて割り引いた値を求める。今期の収益と次期のプロジェクト価値の割引期待値を比べ、大きい方を選択するというモデルを考える。また、状態変数 x は、幾何ブラウン運動 $(dx = \mu x dt + \sigma x dz)$ に従うこととする。具体的には、以下の式となる。

(最適停止問題におけるベルマン方程式)

$$F(x,t) = \max\{\Omega(x,t), p(x,t) + (1+rdt)^{-1} E[F(x+dx, t+dt) | x]\}$$

上式の右辺の、第2項が第1項より大きい場合には停止せず継続し、逆の場合には停止して最終利益を得ることとなる。ここで、停止するか継続するかのぎりぎりの境界状況においては、連続的な値をとると仮定することから、 $F(x,t)$ =右辺第1項() = 右辺第2項となる。ここで、 x が幾何ブラウン運動に従うことに留意し、 $F(x,t)$ =右辺第2項について伊藤の公式により展開し、整理すると以下の微分方程式が求まる。

$$\frac{1}{2} \sigma^2 x^2 F_{xx}(x,t) + \alpha x F_x(x,t) + F_t(x,t) - rF(x,t) + p(x,t) = 0$$

これに、以下の3つの条件を与えることで、境界値 x^* (この値において、継続する場合と停止する場合のプロジェクトの価値が一致する。)を求め又は分析することができる。

初期値の条件:

$$F(x, t_0) = F_0 \text{ (初期値は既知と考える。)}$$

さらに、プロジェクトの価値 F は、終末時点 T において F_T をとるので、以下の式で示される境界条件が必要である。境界値において、最終利益とプロジェクト価値は同一の値をとり(バリュー・マッチング条件) それぞれの関数の状態変数 x に関する一階微分係数の値も同一(スムーズ・ペースティング条件)となる。(この点、厳密な議論は、参考文献に譲る²。)

境界条件(バリュー・マッチング条件):

$$F(x^*, t) = F_T(x^*, t) \text{ (全ての } t \text{ に関して)}$$

高次境界条件(スムーズ・ペースティング条件):

$$F_x(x^*, t) = F_{Tx}(x^*, t) \text{ (全ての } t \text{ に関して)}$$

² ディキジット・ピンディック(2002)「投資意思決定理論とリアルオプション」第4章 pp136-137, pp160-165 参照。

(3) 他のリアル・オプション評価法との違い

(3) 1. 市場の完備性 (一物一価の原則) は必要としない。

動的計画法においては、原則、市場の完備性は必要としないものの、市場の完備性を仮定できれば、条件付請求権 (contingent claim) 法といわれる手法になる。ここでのポイントは、原資産の価値の期待収益率 = 割引率 () は、一物一価の原則から、外生的に与える必要がないことである。原資産を複製する複製資産 (スパニング・アセット) を構成し、その価値を計測することで、結局、リスクのない資産である国債の割引率であるリスク・フリー・レート (r) との関係から計算することが可能となる。したがって、個別プロジェクトごとに期待収益率を推計したり、仮定したうえでそれを外生的に与えられる割引率として用いる必要がなく、リスク中立確率とあわせて、リスク・フリー・レートを用いて割引くことが可能となることである。

(3) 2. その他金融市場類似性も必ずしも必要としない。

2 項モデルにおいてと同様、動的計画法においても、金融市場のような、情報伝達に関する効率性命題などの様々な仮定は必要としない。

特に、市場に多数の参加者を仮定する必要もないことから、寡占状態にあり、少数の参加者の行動が、市場での価格その他の決定結果に影響を及ぼす場合についても、動的計画法 (ベルマン方程式法) を用いて分析することが可能である。

(3) 3. 多くの条件を必要としないが、モデルとしてやや難しく操作性は他の方法に比べ劣る。

汎用性の高かった 2 項モデルと比べてみても、意思決定の期限を有限期間に限定することなく無限に意思決定を延期することも可能な状況で分析できるなど、動的計画法は相当自由度の高いモデルである。しかし、個々のモデルを数学的に、解析的に扱うことはそれに反比例して、時に、大変困難になる。行政官が複雑なモデルを取り扱うことは、実務上も難しいことから、こうした操作性に劣る点については、動的計画法の制約と言わざるを得ない。

4- 11 動的計画法による分析例

自動車排ガス規制を実施するタイミングに対してリアル・オプション意思決定法(動的計画法)を応用

以下においては、動的計画法(ベルマン方程式法)の手法を用いて、環境政策を実施するタイミングに関する分析を行う事例を説明する³。ここでは、様々な動的計画法の手法のうち、最適停止問題に関する手法を用いる。

(1) 条件設定

- イ) 自動車排ガスに含まれる環境に有害である物資を考える。
- ロ) 環境面のみからすると、当該物質の許容排出量をゼロと規制するのが最も望ましいと仮定する。(この場合、有害物質は、温室効果ガス=CO₂のように、自動車のみならず自然界の動物も排出するような物質(排出自体が悪とは言い切れず、量や排出率が問題となるような物質)ではなく、自動車のみが排出するディーゼル排出の粒子状物質(PM)のような物質を考える⁴。)
- ハ) このような自動車排出ガス規制を実施する法的権限を有する行政官庁は、
 - 規制を実施して、一定の社会的コストが生じることを前提に、新規の排ガスに含まれる有害物質の排出量をゼロとするか、
 - 規制の実施を延期して、林野・農業分野における革新的な技術の開発により環境負荷の影響を押える方法の出現を待つ、又は、より効率性を重視する国民意識の変化が生じるのを待つ、(いずれの場合でも、排出物質の自然界の物理的なストック量は同一でも社会的な負荷が実質的に軽減されることとなる)
 - という環境規制の実施時期に関するタイミングの選択権(=リアル・オプションのうち、タイミング・オプション)を有することとなる。
- ニ) いつゼロ規制を実施するのが適当か、という不確実性下の意思決定問題は、この実施時期に関するタイミング・オプションをいつ行使するのが社会的な効用を最大化(=社会的な費用を最小化)するか、という問題と捉えることができる。

(2) モデルと仮定

このタイミング・オプションについて、動的計画法(Dynamic Programming)の手法を用いた以下のモデルを用いて分析する。(数学的な表現は、補論 参照。以下の()内の数字は、補論の数式番号に対応。)

(2) - 1.モデルについて

$\boxed{\text{自然界における負荷物質のストック量の変化率}} = \boxed{\text{毎年の排出率}} - \boxed{\text{自然浄化率}} \quad (1)$
ここで、

³ この部分は、ディキシット・ピンディック(2002)「投資意思決定理論とリアルオプション」p510-517に記述されたモデルを基に作成した。

⁴ OECDが公表している、est!(Economically Sustainable Transport)のためのガイドライン(2000年、p20)によれば、WHOからの助言を基に、運輸からの粒径10µm以下の粒子状物質(PM10)排出量は、est!達成のため、90年レベルに比べ、地域の状況等により、55%~99%削減する必要がある可能性を示している。

毎年の排出率：年間あたり排出物質量（トン）

自然界浄化率 = 一定割合を示す値 × その時の不可物質ストック量

$$\text{社会的費用} = \text{不確実性を代表する変数} \times \text{負荷物質のストック量} \quad (2)$$

ここで、

不確実性を示す変数 = 国民の嗜好又は影響低減技術のレベルを示す変数とし、負荷物質 1 単位当りの金銭換算社会的費用を示しており、確率的な分布を有するものとする。具体的には、株価や商品価格の時間変化と同様に、時間の経過に伴い、幾何ブラウン運動(伊藤過程)に従って変化する = 対数正規分布に従って変化するものと仮定する。

(2) - 2. モデルを用いた考え方について

こうした前提条件に基づいて、動的計画法の手法を用いて、いつ規制を実施するか = いつタイミング・オプションを行使するか = 社会的費用を最小にする（負の社会的効用を最大化する）政策実施時点は何時か、について分析する。

この問題は、いつ規制を実施して排出量をゼロとするのが社会的に最適かという問題となり、企業の投資判断における、最適操業停止点を分析する問題、すなわち、最適停止問題⁵と同一に扱えることとなる。

具体的には、以下の条件のもと、社会的費用を最小化するような不確実性を示す変数の均衡値（*）を求めることとなる。

初期値条件：社会的費用の定義（2）から、不確実性を代表する変数がゼロの場合は、社会的費用もゼロ

バリューマッチング条件：均衡値においては、規制を実施する場合と延期する場合の社会的費用は同じ。（境界条件）

スムースペースティング条件：規制を実施する場合と延期する場合の社会的費用の値が同じことに加え、均衡値周辺におけるそれぞれの限界値（それぞれの関数の接線の傾き）も一致する。（高次境界条件）

ここで、最適停止点に関する動的計画法の手法によると、最適な実施時点として、実施しなかった場合の社会的な費用と実施したときの社会的費用（実施に伴う実施コストを含む）とが均衡する点が算出できることとなり、その点における不確実性を代表する変数の値を求めることができる。

ここで求められる不確実性を代表する変数の均衡値は、規制の実施を待てる余裕を示す指標値と考えることができる。これは、この不確実性を示す変数の均衡値が大きいと、条件式（3）から、規制延期が耐えられない程度となる限界値 = 規制を延期した場合の社会的費用と規制を実施した場合の社会的費用とが均衡する際の数値が大きいこととなり、社会的な寛容度・余裕度が増加することを示すと解釈できるからである。

⁵ 具体的な数学的解法について詳しくは、ディキジット・ピンディック（2002）第4章参照。

なお、規制の実施を待てる余裕の指標値を通じて、政策の実施タイミングを判断することについては、直接、実施時期を変数として扱い、均衡点における解を解析的に導出するやり方に比べて、間接的であり、若干わかり難い面がある。これは、意思決定を、行使期限のないオプションとして、無限時間のなかで決定できることとすることによりモデルが時間によらない設定となることから導かれる⁶。

(3) 具体的数値による分析

以上のモデルを用い、一定の具体的な数値例に従って、この「規制実行を待てる限界を示す指標値」である不確実性を代表する変数の均衡値を算出する。その後、以下に列挙する、タイミングに影響を与える要因の増減が、この限界により示されるタイミングにどのような影響を与えるかを、グラフを用いて、直感的に確認する。最後に、このモデルと数値例に基づき、各要因の変動が、実施タイミングの限界にどのような影響を与えるかを試算・分析する。

(3) - 1 具体的数値計算

環境負荷を与える物質 1 単位当りの社会的費用は一定 (= 社会的費用の変化の期待値は、ゼロ) という条件のもと、以下の表において上から 6 つの数値を用いて、最適実施のタイミングを示す指標値を計算し、その結果を最後の欄に記載した。

変 数	具体的数値
(社会的)割引率	2 %
自然界の吸収率	2 %
嗜好や技術の変化の激しさ(ボラティリティー)	20 %
排出率のウェイト	1 (負荷・軽減なし)
年間排出量	10万トン ⁷
現在における技術水準と国民の嗜好を反映した不確実性を代表する変数 = 有害物質の1単位当りの金銭換算社会的費用	20 (ドル/年)
実施時点における不確実性を代表する変数の均衡値 (タイミングを示す指標値)	42 (ドル/年)

(3) - 2 結果

最後の欄に示すように、これらの数字をもとに、計算すると、最適政策実施時は、有害物質の1単位当りの金銭換算社会的費用が、42ドルとなる年に実施する(現在より110%増加したとき実施することとなる)。

この具体的数値が示すことをより抽象的に要約すると、変数でモデル化された人々が現在環境を重視する度合い(人々が環境に置く金銭的な価値)が、約2.1倍になった場合(又は環境浄化に関する現在の技術水準が約2.1倍になった場合)に、排出量

⁶ ディキソット・ピンディック(2002) p134 参照。

⁷ この数字は、US EPA(1999)が発表した、1996年米国におけるディーゼル(道路交通発生源)排気粒子の年間排出量: 11万1,530(トン/年)に、相当近い値であることが注目される。

をゼロとする規制を実施するのが、最適であることである。

42/20 = 2.1

(4) 実施タイミングに影響を与える要因とその影響

本モデルにおいて、環境規制の実施時期に対して影響を与える要因は、以下の4つが考えられる。

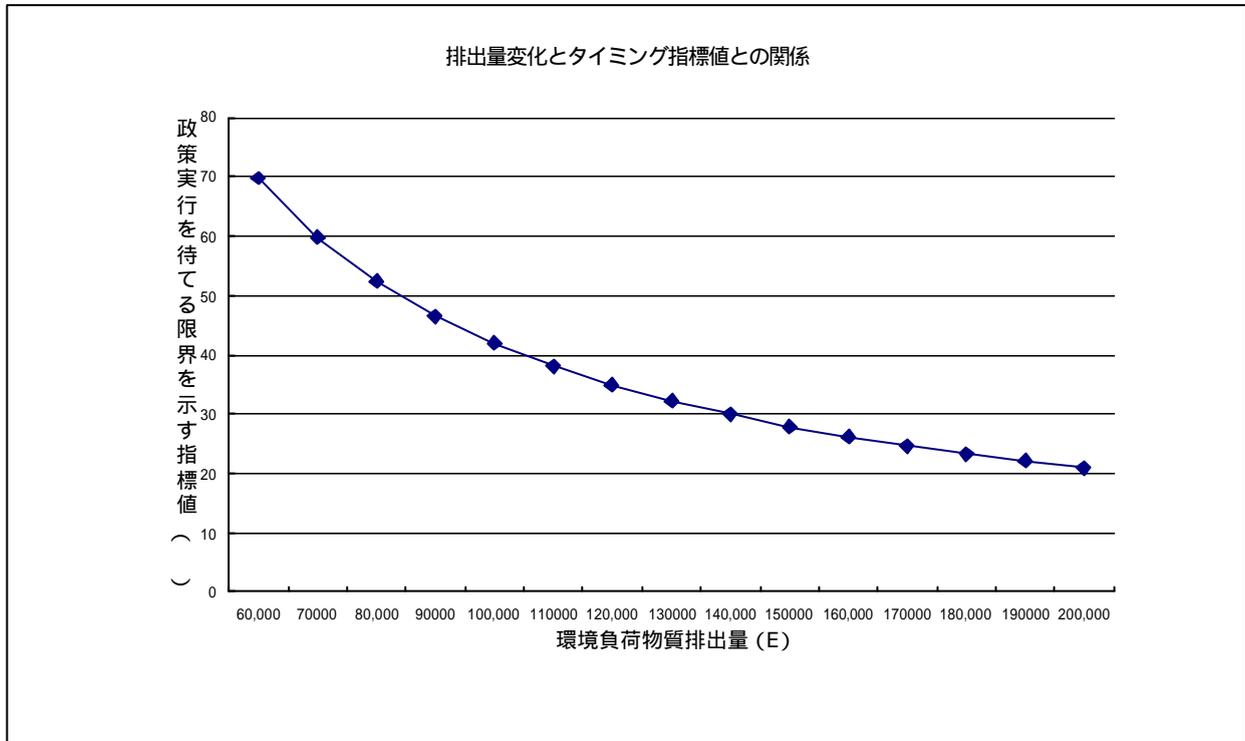
規制実施タイミングに影響を与える要因	単位	記号
有害物質の排出率	ト/年	E
有害物質のストック量に対する自然による年間吸収量	%	
環境への国民の意識・環境関連技術の変化の激しさ（ポラリティ）	%	
（社会的）割引率	%	r

有害物質1単位当りの金銭換算社会的費用の均衡値が増加することは、この均衡値が規制の実施を待てる余裕を示す指標値であることから、規制実施のタイミングを遅らせることができることとなる。逆に、この均衡値が減少することは、規制を待てる余裕がなくなり、規制を実施する必要が高まることとなる。

これらの要因の変動が規制の実施を待てる余裕を示す指標値に与える影響を調べることで、タイミングへの影響を整理する。各要因が、規制実施のタイミングに与える影響をグラフ化したものを以下に示す。

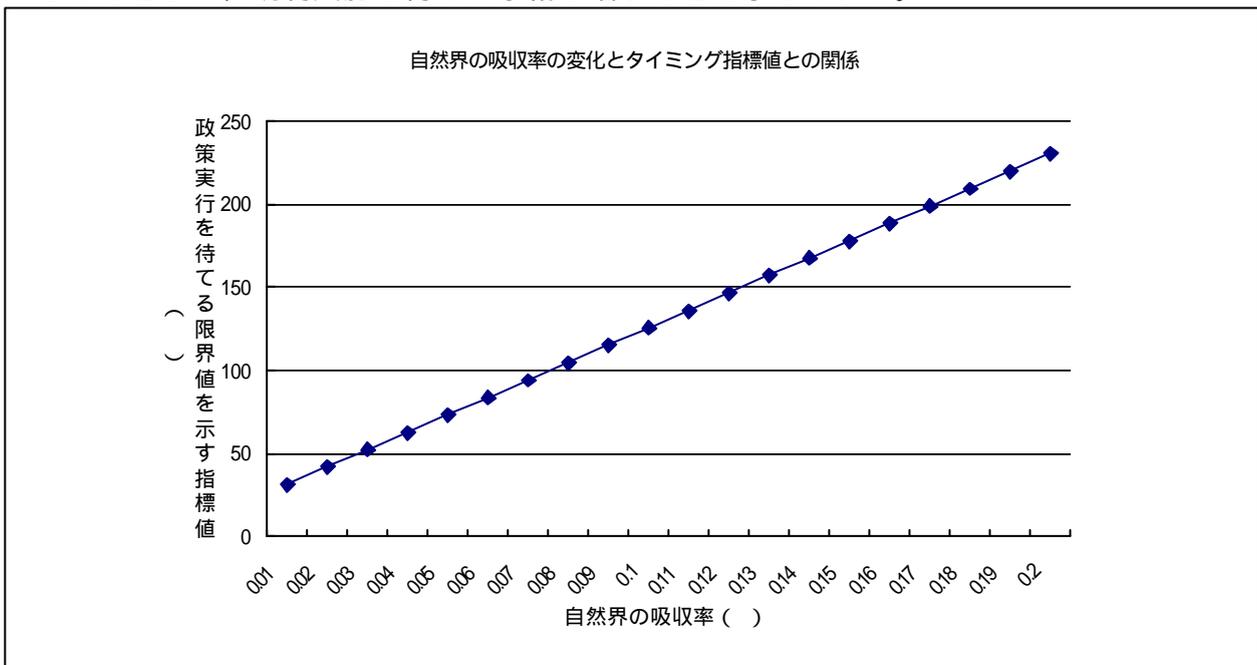
(4) - 1 環境負荷物質の排出量とタイミングとの関係

環境負荷物質の排出量が増えれば、それだけ社会的費用が大きくなり、規制政策の実施を待てる余裕がなくなること示している。



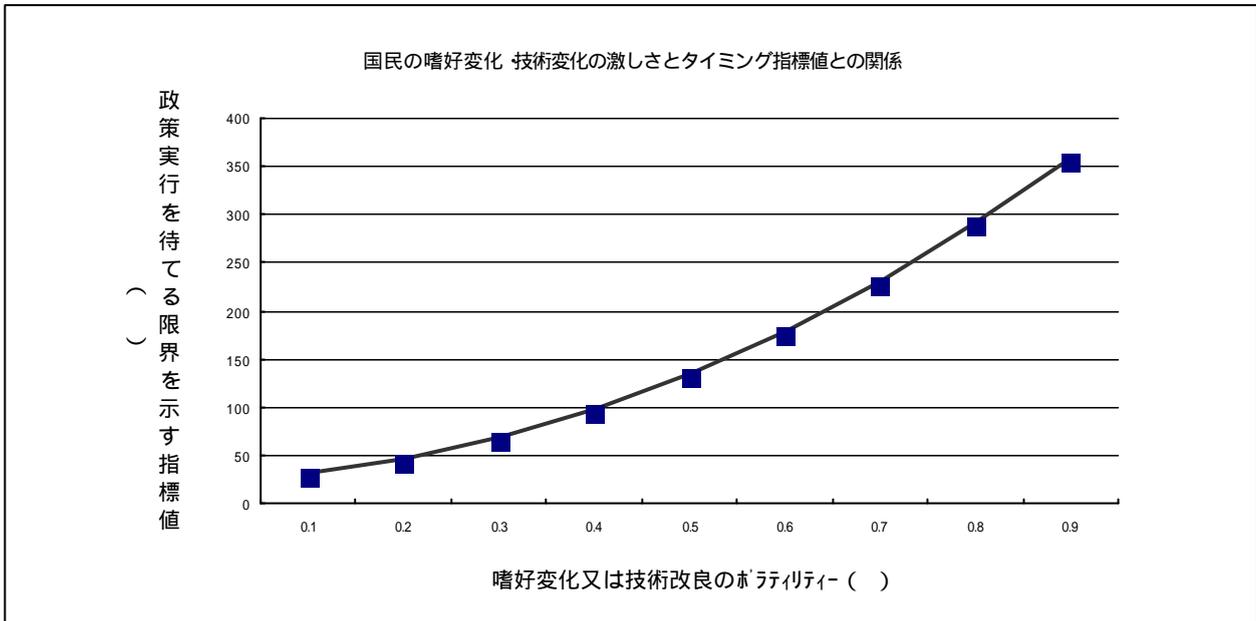
(4) - 2 自然界の吸収率とタイミングとの関係

自然界による環境負荷物質の吸収率が増加することにより、社会的な費用が小さくなることから、規制実施を待てる余裕が増すことを示している。



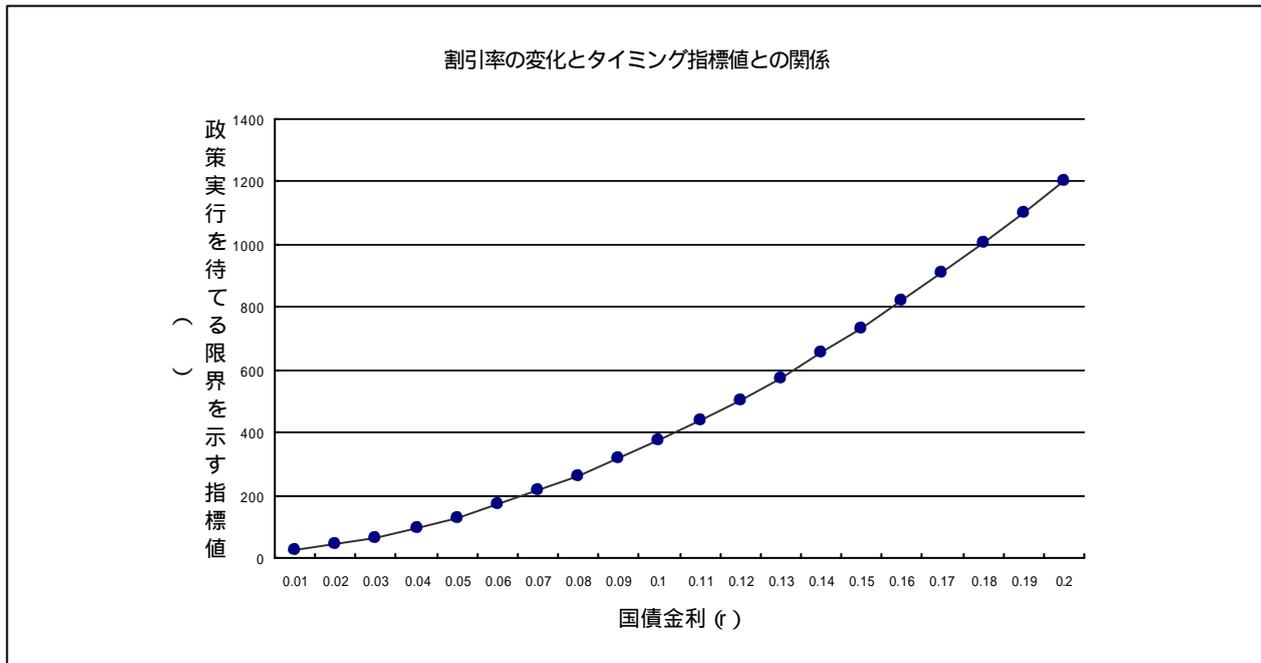
(4) - 3 嗜好変化・技術変化の激しさとタイミングとの関係

国民の嗜好の変化や技術革新の激しさが大きくなればなるほど、排出量をゼロにするという強力な規制の実施は延期し、状況を見極めることがより望まれることを示している。



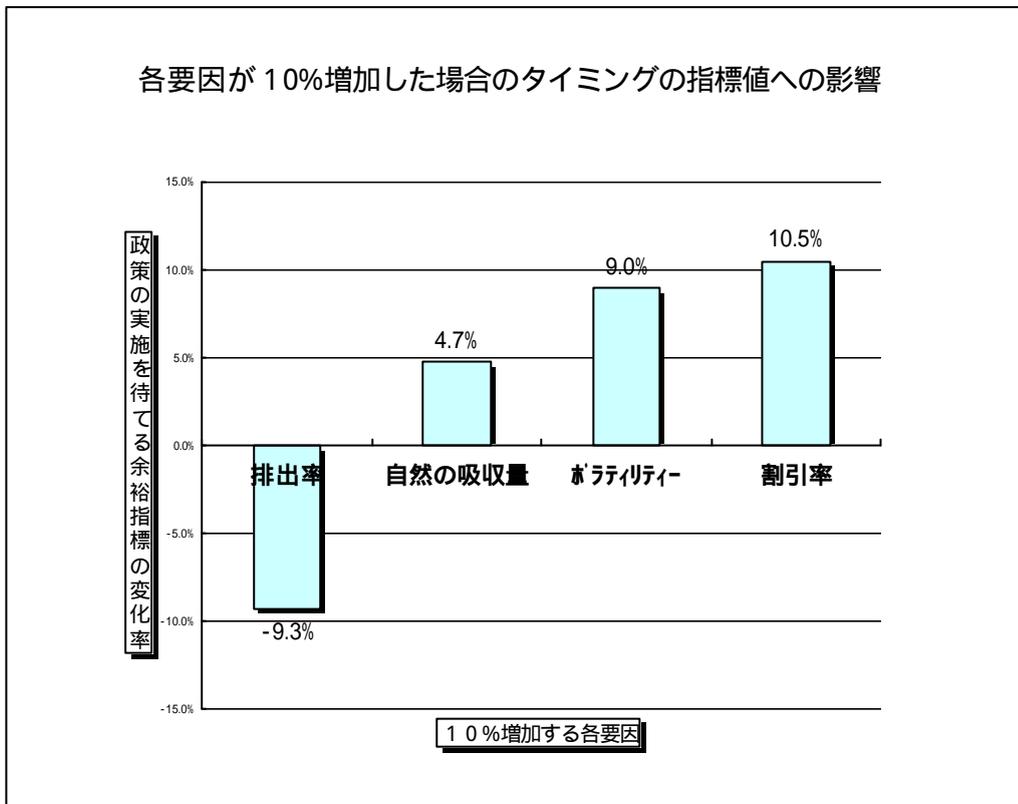
(4) - 4 社会的割引率とタイミングとの関係

社会的割引率（ここでは、単純化のため、国債金利と考へた。）が大きくなると、将来の規制実施に伴うコストの現在価値が小さくなり、規制をすぐに実施せず延期し将来実施する場合の社会的費用の方がすぐに実施する場合より相対的に小さくなることから、以下のように、規制実施を延期できる余裕が増すことを示している。



(5) 各要因によるタイミングへの弾力性について (モデルの総合的な特性)

このモデルにおいて、各要因が、10%増加した場合、規制実施のタイミングの余裕度を示す指標値がどの程度の影響を受けるか、%で以下示す。



このモデルにおいては、弾力性の大きさ(絶対値)は、(社会的)割引率、環境負荷物質の排出率、嗜好・技術のホテイティ-、自然界の吸収率の順となっている。これが意味するのは、自然界の吸収量が多少上がっても、タイミングに与える余裕は少なく、排出率や嗜好や技術革新の激しさ(ホテイティ-)の変化の方が、タイミングに与える影響として大きいことを示している。つまり、環境負荷物質の排出率が増加することにより、政策の実施を待てる余裕がなくなる度合いの方が、自然界の吸収率により余裕が出る度合いに比べて大きく、また、国民の嗜好や技術革新の変化が大きくなったため政策の実施を待つ方がよいこととなる度合いの方が、自然界の吸収率により余裕がでる度合いに比べて大きいことを示している。自然界による再生の度合いより、環境破壊の度合いを重視するモデルとなっていることが判る。

また、割引率が増加することにより政策の実施を待てる度合いが一番大きいことは、政策実施のコストを非常に重視するモデルであることを示している。

(6) 要因それぞれを同時に変動させるシミュレーション

更に、これらを前提に、タイミングへ影響を与える要因全てが、一定の分布に従って同時に変動した場合をシミュレートしてみる。

(6) - 1 シミュレーションの前提条件等について

具体的には、要因ごとに以下の前提条件、分布等によりシミュレートすることとする。

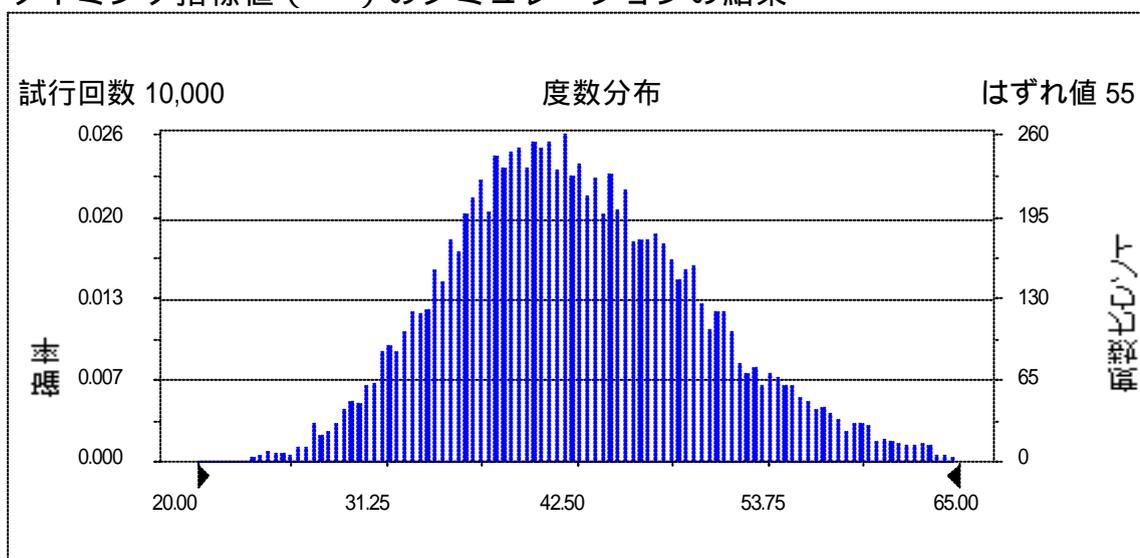
影響を与える要因についてのシミュレーションの前提

規制実施タイミングに影響を与える要因	単位	仮定分布	平均	標準偏差
有害物質の排出率	ト/年	対数正規分布	100,000	10,000
有害物質のストック量に対する自然による年間吸収量	%	正規分布	2	0.2
環境への国民の意識・環境関連技術の変化の激しさ（ポテンティール）	%	正規分布	20	2
（社会的）割引率	%	対数正規分布	2	0.2

(6) - 2 シミュレーションの結果について

上記の前提に従い、モンテカルロ・シミュレーションの手法により、タイミングを示す指標値がどのように変動するか試算した結果を以下に示す。

タイミング指標値（*）のシミュレーションの結果



シミュレーションの結果 2

試行回数	10,000
平均値	42.57
中央値	41.91
標準偏差	7.56
分散	57.17

17.8% (平均値に対する割合)

このシミュレーションの結果が示すところによれば、タイミングの指標値については、平均値に対して、約 17.8 % の変動（標準偏差）が計算される。この意味するところは、タイミングの余裕度について、各要因を同時に前述の条件によりシミュレートしてみると、本モデルにより分析された指標値^{*}で示される規制政策の実施タイミングについては、ボラティリティーとして、約 17.8 % の変動誤差が存在することを示している。

(7) 本モデルの特色と限界

(7) - 1 本モデルの特色について

この動的計画法においては、市場の完備性（一物一価の原則）を仮定していない。社会的割引率 r については、外生的に与えているのみで、ブラック-ショールズの公式におけるように、リスク・フリーレートを用いているわけではない。ここでは、単純さから国債金利を用いたに過ぎず、実際上は、実証研究に基づく適切な社会的割引率が必要となる。また、決断するタイミングについては、一定の有限期限を設けない、すなわち、原理的には、無限に実施を延期することも可能な問題設定により、モデル化している。こうした点は、本モデルの特色といえる。

(7) - 2 本モデルの限界について

他方、現実の問題の複雑さに比べ相当単純化しているとはいえ、上記のように扱いやすさについては、容易とはいえない。むしろ、行政実務における操作性を考えると、相当複雑なモデルになっているといえる。このことは本モデル最大の限界と考えられる。

また、規制を行う場合に実務上大変重視される政策実施のコストについては、相当単純なモデル（排出量に比例）となっている点にも充分注意を要する。本モデルの特性として、（社会的）割引率がタイミングへ与える影響（弾力性）が各種の要因のうちで最も大きい構造となっていることは既に述べたとおりである。これが意味するのは、本モデルで考えた場合の実施タイミングは、すくなくとも直接的には、政策実施の将来コストが現在どの程度大きいと評価されるかに最も依存することになる。したがって、政策実施の将来コストの推計自体が単純に推定されている場合には、推計されたコストの値と割引率の選択如何によって、実施タイミングの結論にも大きな影響が及ぶことになる。この点は、実際の政策実施のタイミング分析で本モデルを用いようとする場合に、相当の配慮が必要となろう。現実には、規制導入により、当初割高であった規制実施のコストが、その後規制の浸透に伴う規模の経済によりコストダウンする場合や、規制の実施自体により技術開発が誘発・促進され、より低廉な技術が利用可能になることも充分考えられる。こうした意味から、本モデルのコストの部分に関しては、将来的に改善の余地が大きいと思われる⁸。

⁸ なお、R. Pindyck は、その後本モデル（原モデルは1994年作成）に追加的な改良を加え（Pindyck(2000)）、自然界の排出物質量自体が、確率的な変動をする場合や、削減コストが非線形に増加する場合、ゼロへの削減政策だけでなく一部の削減規制、削減規制の段階的实施などの場合を分析している。

(8) 我が国の状況への適用可能性について 実証研究が不可欠

本モデルに数値を与えて分析した部分は、主に米国における状況を念頭に設定されている。仮に、本モデルの基本部分を用いるにしても、我が国に合致する具体的な数値を用いて、我が国の状況を分析するためには、当然、我が国の状況に関する実証分析が不可欠である。特に、我が国の自動車からの粒子状物質の年間排出量については、環境省の検討会、ディーゼル排気微粒子リスク評価検討委員会による13年度報告（平成14年3月5日）によれば、道路交通からの排出量として、1994年の数字として、5万8,902（ト/年）が公表されている。本モデルにて計算を行うためには、この数字の検証に加えて、これ以外に、社会的割引率、自然界の吸収率、嗜好や技術の変化の激しさ、技術水準と国民の嗜好を反映した不確実性を代表する変数の現在値（ θ ）を入力する必要がある。

これら数値、特に最後の2つ（嗜好や技術の変化の激しさ、技術水準と国民の嗜好を反映した不確実性を代表する変数の現在値（ θ ））については、十分な実証研究が前提となると思われる。このため、本稿では、主に米国での数値解析の紹介とシミュレーションによるモデルの予測特性の分析にとどめ、我が国の状況に関する具体的な数値による分析は控えることとした。しかし、こうした事項に対する十分な実証分析を前提とすれば、本モデルによる実施タイミングの分析は、日本についても相当該当するものと考えられる。この場合、以下の点に、注意すべきと考える。

国民の嗜好の面については、高速道路沿道の住民への粒子状物質等による健康被害を認定し一部の差し止めを認める最高裁判決や、東京都等を始めとする一部の自治体による粒子状物質に対する厳しい政策により、最近、特に都市部住民において、粒子状物質への（諸外国に比べても）相当否定的な嗜好があると思われる。（環境嗜好に関する初期値が米国等より高い可能性がある。）

他方、貨物輸送については、物流拠点と大消費地の都市部との間のいわば幹線部分における非自動車輸送の比率が、米国に比べ、圧倒的に低い水準（国内貨物の輸送トンキロベースの分担率で、安定増加傾向の自動車54%に比べ、内航海運、鉄道とも減少してきており、鉄道貨物はわずか4%）にあり、物流に占めるトラック輸送の比重が大きいことは、国民経済全体としてみれば、米国より、トラック由来の粒子状物質を社会的により許容する可能性もあることも指摘できよう。なお、我が国においては、大陸系諸国に比べ、都市内の貨物自動車による配送において利便性を環境に比べ相当重視している状況にあるとの示唆もなされる。例えば、環境重視において先進的な欧州各国においては、狭い路地に小型トラックが頻繁に来訪するような状況を好まず、静謐を好み排ガスを嫌うなど環境をより重視するため、日本の宅配便のような戸口までの配送事業がそれほど成長してきていないとの指摘もある⁹。（環境嗜好に関する初期値が欧米諸国より低い可能性がある。）

⁹ 運輸政策研究機構 2001年春研究報告会（第9回）クラウス・エバーハート 「宅配便システム：Eビジネス物流問題解決への模範的先例となるか」

補論 ディキジットとピンディックによる環境政策の実施タイミングに対する動的計画法 (ベルマン方程式法) の数値モデル¹⁰について

自動車排ガス規制のタイミング分析に用いた、ディキジットとピンディックによる環境政策の実施タイミングに対する動的計画法 (ベルマン方程式法) の数値モデルについて以下、簡略に紹介する。

1. モデルにおける定義について

M : 環境負荷物資のストック量

E : 汚染物質の排出率 (ト/年)

 : 自然吸収率 ($0 < < 1$)

B : 社会的費用

 : 不確実性を代表する確率変数。具体的には、国民の環境問題への嗜好変化や林業・農業分野の技術革新等による社会的費用への影響を代表するウェイト。人口学的な変化により、 β が上昇することもあれば、新農業技術により減少することもある。この確率変数自身が、時間的経過に伴い、幾何ブラウン運動に従って変化 = 対数正規分布に従って変化するものと仮定。

K : 政策実施時の社会的コストの現在価値

k : 政策実施時の社会的コスト(K)が排出率に比例すると仮定したときの係数

W : 社会的効用

\tilde{T} : 政策実施の時点

W^N : 政策不採用時の社会的効用 ($E_t = E$)

W^A : 政策採用時の社会的効用 ($E_t = 0$)

r : 社会的割引率

2. 動的計画法 (ベルマン方程式法) の具体的な数式について

以上のような定義に従って、規制実施のタイミングを示す指標値 \tilde{T} が(3)式の幾何ブラウン運動を行うことを前提に、規制の実施コストを加味して、不可物質による社会的な費用を最小化 (すなわち、社会的な効用を最大化) するタイミング時期を導出する最適問題を解くこととなる。ここでは、(6)式で示されるベルマン方程式から、微分方程式 (7)と(8)式) が得られ、(9)から(11)の境界条件等から(16)又は(18)の解が得られる。(18)は規制実施のコストが一定ではなく、排出量に比例するとした場合の解である。

¹⁰ ディキジット・ピンディック (2002) p510-517

$$(1): \frac{dM}{dt} = gE(t) - lM(t)$$

$$(2): B(M_t, q_t) = -q_t M_t$$

不確実性を代表する変数 (q) が、以下のように幾何ブラウン運動に従う。

$$(3): dq = aqdt + sqdz$$

$$(4): dz = e\sqrt{dt}$$

$$(5): E(e) = 0, \text{Var}(e) = 1$$

この最適停止問題におけるベルマン方程式：

$$(6): \text{Max} : W = e_0 \int_0^{\infty} B(M_t, q_t) e^{-rt} dt - e_0 [Ke^{-r\tilde{T}}], e_0 : \text{時点 } 0 \text{ における期待値}$$

導かれる微分方程式：

$$(7): rW^N = -qM + (gE - lM)W_M^N + aqW_q^N + \frac{1}{2}s^2q^2W_{qq}^N$$

$$(8): rW^A = -qM - lMW_M^A + aqW_q^A + \frac{1}{2}s^2q^2W_{qq}^A$$

解の条件：

$$(9): W^N(0, M) = 0 \text{ (初期値)}$$

$$(10): W^N(q^*, M) = W^A(q^*, M) - K \text{ (バリューマッチング条件)}$$

$$(11): W_q^N(q^*, M) = W_q^A(q^*, M) \text{ (スムーズペースティング条件)}$$

$$(12): W^N(q, M) = Aq^b - \frac{qM}{r+l-a} - \frac{gEq}{(r-a)(r+l-a)}$$

$$(13): W^A(q, M) = -\frac{qM}{r+l-a}$$

$$(14): b = \frac{1}{2} - \frac{a}{s^2} + \sqrt{\left(\frac{a}{s^2} - \frac{1}{2}\right)^2 + \frac{2r}{s^2}} (> 1)$$

$$(15): A = \left(\frac{b-1}{K}\right)^{b-1} \left[\frac{gE}{(r-a)(r+l-a)b}\right]^b$$

解：

$$(16): q^* = \left(\frac{K}{b-1}\right) \left[\frac{(r-a)(r+l-a)b}{gE}\right]$$

$$(17): K = kE \text{ (} K \text{ を } E \text{ の一定倍と仮定する。)}$$

$$(18): q^* = \frac{k(r-a)(r+l-a)b}{g(b-1)} \text{ ((17) の仮定のもとでの均衡値 } q^* \text{)}$$

以上のモデルについて、以下の具体的数値を代入して、均衡値 q^* を計算した。

$$E = 100,000 \text{ (トン/年)};$$

$= 0.02;$
 $\rho = 20 (\text{\$/年});$
 $K = 2B\text{\$}; (k=20,000(\text{\$});)$
 $r = 0.02;$
 $\alpha = 0;$
 $\beta = 1;$
 $\gamma = 0.20;$
 $\delta = 1.62;$
 $A = 7,681,000;$
 $\lambda^* = 42 (\text{\$/年})$

4-12 リアル・オプションの課題 シンプルさと実用性の相反

リアル・オプションに基づく意思決定手法は、意思決定に不確実性を明示的に取り込み、柔軟な構造をモデル化でき、かつ、不確実性に関する前提条件に関する処理を、直感的な議論から解放し、客観的なモデルの前提条件に取り込むことができる点で、大変画期的と考える。

他方、こうした柔軟性を実務上使用可能な程度の操作性を確保するためには、大変シンプルで使いやすい「ブラック・ショールズ」の公式に見られるように、原資産の価格変化に関する特定のモデルや市場の完備性、効率的な市場等に関する多くの仮定を必要とする。行政実務への応用を考える場合には、このような多くの仮定は、現実的でない場合が多い。

また、必要とする仮定は少ない動的計画法（ベルマン方程式法）については、モデルが大変複雑で実務上使用し易いとはいえない。さらに、行政実務への応用を考える場合においては、参加者の数が限られた場面においても一定のモデル化が可能なゲームの理論等に関する知見を用いる分野も今後の研究が待たれるところである。

このように、不確実性の処理を従来のような直感的な議論から解法し、客観的なモデルの前提条件として処理できる利点を最大限に活かした上で、いかに単純で、かつ、行政実務に耐えられる妥当性と操作性を併せ持つモデルとするかが最大の課題と考える。このため、交通関係市場の寡占構造を反映させるための研究や、最近のコンピュータの進歩に伴い、大変手軽に行えるようになったモンテ・カルロ・シミュレーションの活用手法など、行政官を利用者とした、より実践的な利用を考慮したリアル・オプションのモデル構築に関する研究を進めていく必要があると思われる。

経済社会情勢が急速に変化するなかで、民間企業の投資判断等において浸透してきているリアル・オプションについて、十分理解し、行政における意思決定の特質を踏まえつつ十分な活用を図ることは、それ自体で国民に高い付加価値を提供する、21世紀型の行政運営方式に不可欠の要素であろう。

こうした不確実性を明示的に扱えるリアル・オプションの意思決定手法としての特質を、双方向コミュニケーション型行政スタイルの全体像に組み合わせて、不確実性に関する処理・前提条件について、国民・行政双方が信頼関係に基づき十分な意思疎通を行って、可能な限り一定の合意に到達し、その合意に基づいて具体的な政策を実施してゆく運営方式が望まれる。

(参考) リアル・オプションをめぐる想定問答¹¹

問1 リアル・オプションは、いかなる場合に使えるのか。
(リアル・オプションを用いた分析により、判断・評価の結果が大きく変わるのほどのような場合か。)

答

以下のような場合には、リアル・オプションの適用に大きな意味があると考えられる。

将来の不確実性が高い。

将来新しい情報をもたらす効果が大きい。

意思決定主体の対応の柔軟性が大きい。

十分新情報に対応可能

柔軟性を考慮しない NPV がゼロに近い。

NPV によれば、はっきりと良くも悪くもない場合、計画変更の柔軟性が決定的な役割を果たすこととなり、それだけ柔軟性の価値が大きいこととなる。

問2 リアル・オプション (= 柔軟性の価値を示す。) は、常にプラスの価値を有するので、柔軟性を評価するオプションの価値を意思決定で考慮すると、本来実施されるべきでないプロジェクトを正当化しようとするだけではないか。

答

柔軟性の価値が常にプラスの価値を有するのは、そのとおりだが、以下を考慮すべき。

柔軟性を通常考慮しない NPV 法によれば、事業等を常に過小評価をしていることを認識すべき。

常にプラスの価値を有する柔軟性 (リアル・オプション) を獲得するための対価は、柔軟性そのものの価値を上回る場合が往々にして存在することにも注意すべき。

¹¹ 全般に、コーブランド・アンティカロフ (2001) p13-14 を参考に作成した。

問3 常に不確実性があるのだから、より情報が集まる将来時点まで待つべきで、不確実性を考慮すると、プロジェクトは開始できなくなるのではないか。

答

- 1．確かに、情報の蓄積の観点でいえば、現在より将来の方がより多くの情報が利用できる。
- 2．しかし、プロジェクトの実施を待つことによる機会費用も考慮して、分析すべきである。これは、単に情報を収集するためにコストが必要となることに加えて、決定を待っていることに伴い、収益の機会を喪失することになるという機会費用も考慮する必要があるということの意味する。
- 3．例えば、知識・情報を創造する国際的な拠点を構築しようとしている我が国が、他国とそうした拠点構築に関して競争状況にある場合に、人流・物流・情報流通のコスト（広義の輸送費）を低減する効果をもつ交通関連投資を延期することにより、国際的な競争上の地位が他国との関係で悪化することも充分考えられる。（競争によるオプション価値の破壊の問題¹²） 仮に大規模国際空港の建設を考えている場合、建設を延期して情報収集している間に他国に大規模空港が出現しその国の広義輸送費が低減すれば、知識・情報を創造する国際的な拠点として自国の優位性が悪化することも充分あり得る。）
- 4．なお、将来においては、現在不明であった情報が蓄積されるが、当然のことながら、その将来時点において、さらにその先の将来についてはやはり不明な情報が存在する。単位時間内での不確実性がいずれの時点においても一定というモデル（例えば、原資産の価値変動のボラティリティー（標準偏差）は単位時間内で一定という、幾何ブラウン運動）を用いる場合には、結局、そのような意味で時間の経過と共に不確実性は減らないということになる。

¹² この部分は、Smit・Ankum（1993）、刈屋監修・山本著（2001）pp55-56などを参考にした。

参考文献

第1章 新たな運営方式 :不確実性を明示的に扱う。

- 石井 至(2002)「図解 リスクの仕組み」 東洋経済新報社
運輸省航空局(1980)「関西国際空港の建設計画案について」(昭和55年11月)
大田弘子(1995)「リスクの経済学」東洋経済新報社
小倉義光(1999)「一般気象学」(第2版) 東京大学出版会
杉本大一郎他(2002)「複雑システム科学」放送大学大学院教材
酒井泰弘(1982)「不確実性の経済学」 有斐閣
野口悠紀雄・藤井 真理子(2000a)「金融工学」 ダイヤモンド社
バーンスタイン、P.(2001)(青山護訳)「リスク(上・下)」 日経ビジネス人文庫
日本リスク研究学会編(2000)「リスク学事典」TBSブリタニカ
藤井彌太郎・中条潮(1992)「現代交通政策」 東京大学出版会
JIS規格「リスクマネジメントシステム構築のための指針」(JIS Q2001:2001)
「金融工学のマネジメント」(2001)ダイヤモンド社
Cutler, D. and R. Zeckhauser(1999), Reinsurance of Catastrophe Risk and Cataclysm, p243, The Financing of Catastrophe Risk (work and publication of the National Bureau of Economic Research), K. A. Froot 監修, the University of Chicago Press

第2章 不確実性を考慮した双方向コミュニケーション型の国土交通行政に向けて

- 岡本浩一(1992)「リスク心理学入門」サイエンス社
「現代経済学」(増訂版)ハダ-ソク-クワト 1973年(小宮隆太郎・兼光秀郎訳)
国土庁(1978)「地震予知情報影響調査報告書」
国土庁(1984)「地震予知情報への対応調査報告書」
吉川肇子(1999)「リスク・コミュニケーション」福村出版株式会社
吉川肇子(2000)「リスクとつきあう 危険な時代のコミュニケーション」有斐閣選書
小林潔司・横松宗太(2000)「不確実性下における交通行動のモデル化」 国際交通安全学会誌 Vol.26, No.1
高桑圭一(2001)「オーストラリアにおける外国人旅行客誘致方策」(財)運輸政策研究機構国際問題研究所
谷川 純(1985)「イタリアにおける警報発令」『近代消防』昭和60年8月号
地震調査研究推進本部(1999)「地震調査研究の推進についてー地震に関する観測、測量、調査及び研究の推進についての総合的克基本的な施策」(いわゆる「総合基本施策」)
地震調査研究推進本部(2001)「長期的な地震発生確率の評価手法について」
地震調査研究推進本部 政策委員会 成果を社会に活かす部会(2001)「政策委員会成果を社会に活かす部会報告 - 地震調査研究における長期評価を社会に活かしていくために -」
廣井 脩他 東京大学新聞研究所編(1979)「地震予知と社会的反応」東京大学出版会
廣井 脩他 東京大学新聞研究所編(1981)「続地震予知と社会的反応」東京大学出版会
廣井 脩(2001)「流言とデマの社会学」文春新書

- 山下輝夫編著(2000)「大地の躍動を見る」岩波ジュニア新書
- 山本浩一(2001)「日本人のリスク観は変わるか, HUMAN STUDIES SEPTEMBER
- Hofstede, G., et al., The Culture in the Workplace Questionnaire™
(www.itapintl.com/ITAPCWQuestionnaire.htm)
- Kahneman, D., and A. Tversky (1979), , PROSPECT THEORY: AN ANALYSIS OF DECISION UNDER RISK, ECONOMETRICA, Vol.47, 263-291
- Sydsater, K., Storm, A., Berck, P., Economist ' Mathematical Manual, 3rd ed. Springer
- Kleinmesselink, R and E. Rosa(1991), "Cognitive representation of risk perceptions: A comparison of Japan and the United States" Journal of Cross-cultural Psychology 22,11-28
- Kunreuther, H., N. Novemsky and D. Kahneman(2001), "Making Low Probabilities Useful", the Journal of Risk and Uncertainty, 23:2, 103-120
- National Research Council(1989) "Improving risk communication" Washington DC: National Academy Press
- Slovic, P.(1987), "Perception of risk," Science 236, 280-285
- Tversky, A., and D. Kahneman.(1981), The Framing of Decisions and the Psychology of Choice, Science Vol. 211, 453-458
- Tversky, A., and D. Kahneman.(1992), Advances in Prospect Theory: Cumulative Representation of Uncertainty, Journal of Risk and Uncertainty 5, 297-323
- Sorensen, J. and W. Dombrowsky(1998), Results of the working group "risk communication for emergencies and disasters" Risk Communication Junlich: KFA
- Sydsater, K., A. Storm and P. Berck(2000), Economist ' Mathematical Manual(3rd ed.), Springer
- Covello, V., P. Slovic and D. von Winterfeld(1998), Disaster and crisis communication: Findings and implications for research and policy, Risk Communication, Julich: KFA

第3章 地震リスク・ファイナンス・マネージメントの可能性

- 大塚仁(1988)「刑法各論」青林書院
- 岡田恒男・土岐憲三編集(2000) 地震防災の事典 朝倉書店
- 刈屋武昭(1999)「信用リスク分析の基礎」保険リスクのプライシング 東洋経済新報社
- 刈屋 武昭(2000)「金融工学とは何か」岩波新書
- 国土交通政策研究所講演録(2001) 藤田昌久教授「空間経済学からみた国土交通政策」
- 国立天文台編(2001) 理科年表 丸善
- 齊藤 誠(2000a) 「金融技術の考え方使い方」 リスクと流動性の経済分析 有斐閣
- 齊藤 誠(2000b) 「自然災害リスク・マネージメントにおける市場システムと公的システム」 ECONOMICS AND POLICY 3, 148-160
- 酒井道雄編(1995) 「神戸発 阪神大震災以後」 岩波新書
- 損害保険料率算定会
阪神・淡路大震災資料集 地震保険調査報告26 1997年

カリフォルニア州地震保険制度 地震保険調査報告 31 1999年
ニュージーランドの地震保険制度 地震保険調査報告 33 2000年
地震災害予測の研究 特集：平成7年兵庫県南部地震（阪神・淡路大震災）地
震調査研究 45 1996年
地震危険に関する消費者意識調査 地震保険調査報告 30 1999年
地震危険に関するアンケート調査（専門家編）地震保険調査報告 32 2000年
日本の地震学と地震工学 地震保険調査研究 45 1998年

- 橘木俊詔（2002）「安心の経済学」岩波書店
中森善彦（1996）「刑法各論」有斐閣
野口 悠紀雄、藤井 眞理子（2000b）「マルチンゲールと資産価格理論」金融工学のダイナミクス ダイアモンド・ハート・ビジネス 9, 58-67
野口 悠紀雄、藤井 眞理子（2000c）「リスクのタイプと金融革新の意義」ECONOMICS AND POLICY 3, 161-171
ドーフマン、M.(1993)（鈴木辰紀監訳）「保険入門」成分堂土方 薫(2000)「天候デリバティブ」シグマベイズキャピタル
土方 薫(2002)「保険デリバティブ」日本経済新聞社
平野龍一（1977）「刑法概説」東京大学出版会
福島良治(1997)「デリバティブ取引の法務とリスク管理」きんざい
山口 光恒(1998)「現代のリスクと保険」岩波書店
Aase, K.(1995), "Catastrophe insurance futures contracts", Norwegian School of Economics and Business Administration, Institute of Finance and Management Sciences
Arrow, K. J. (1964), "The Role of Securities in the Optimal Allocation of Risk-bearing." Review of Economic Studies, 31, 91-96.
Allen, F. and Gale, D. (1991), "ARBITRAGE, SHORT SALES, AND FINANCIAL INNOVATION," Econometrica, vol.59, No.4, 1041-1068.
Kleindorfer, P. and H. Kunreuther(1999), "Challenge facing the insurance industry in managing catastrophic risks" The financing of Catastrophic risk, A Froot (ed.) University of Chicago Press
Lucas, R.(1978), Asset Prices and in an Exchange Economy, Econometrica 46, 1429-45
Shiller, R.,(1993) Macro Markets Creating Institutions for Managing Society's Largest Economic Risks, Oxford University Press
Tufano, P. (1989), "Financial Innovation and First Mover Advantages," Journal of Financial Economics, 25, 213-240.

第4章 不確実性を考慮した意思決定方式（リアルオプション）の国土交通行政への導入（リアル・オプションに関する一般的な教科書等）

- アムラム、M. and N. クラティラカ(2001)（石原雅行他訳）「リアル・オプション」東洋経済新報社
刈屋武昭編 山本大輔著(2001)「入門 リアル・オプション」東洋経済新報社
トゥリジオリス、L. (2001)（川口有一郎他訳）「リアルオプション」エコノミスト社
Copeland, T., and V. Antikarov(2001) REAL OPTIONS: A Practitioner's Guide, WW Norton & Co.（(梶本克之監訳)(2002)「[決定版]リアル・オプション」MONITOR GROUP 東洋経済新報社）

Dixit, A, and R. Pindyck(1994), INVESTMENT UNDER UNCERTAINTY Princeton University Press ((川口有一郎翻訳主幹)(2002)「投資意思決定理論とリアルオプション」不確実性のもとでの投資 エコノミスト社)

Dixit, A. and R. Pindyck(2001), 「オプション理論が高める経営の柔軟性」 金融工学のマネジメント ダイヤモンド社

Howell, S., et. al. (2001), real options Evaluating Corporate Investment Opportunities in a Dynamic World Financial Times/Premtice Hall

Kulatilaka, N. and M. Amram(2001) 「リアル・オプションが経営戦略を変える」 金融工学のマネジメント ダイヤモンド社, pp102-105

Trigeorgis, L.(1999), Real Options and Business Strategy, Risk Books

Trigeorgis, L.(edt) (2001), Real Options and Investment Under Uncertainty: Classical Readings and Recent Contributions, MIT Press

(より一般的な金融に関する教科書等)

ハル、J.(三菱銀行商品開発部訳)(1998) 「フィナンシャルエンジニアリング」第3版 きんざい

ハル、J.(三菱銀行商品開発部訳)(1994) 「デリバティブ入門」 きんざい

マートン、R 大野克人(1996) 「金融技術革命」 東洋経済新報社

Benninga, S.(2000) Financial Modeling MIT Press

Black, F., and M. Sholes(1973), The Pricing of Options and Corporate Liabilities, Journal of Political Economy 81, 637-659

Brealey, R., and S. Myers(1991), PRINCIPLES OF CORPORATE FINANCE McGraw-Hill 4th ed. (藤井眞理子・国枝繁樹監訳(2002) 「コーポレート ファイナンス」(第6版) 日経BP社)

Geman, H.(ed.)(1999), Insurance and Weather Derivatives, Risk Books

Merton, R. (1992) CONTINUOUS-TIME FINANCE, Cambridge MA, BLACKWELL

(その他文献)

運輸政策研究機構(2001) 「長期需要予測に関する調査報告書」

運輸省航空局監修(1999) 空港整備事業の費用対効果分析のマニュアル1999 運輸政策研究機構

運輸省鉄道局監修(1999) 鉄道プロジェクトの費用対効果分析 マニュアル 99 運輸政策研究機構

刈屋武昭(2001) 「金融工学を利用したリアルオプション事業リスク評価」 日経テレコム「デジタル現代金融工学入門」講座

小山昭雄(1999) 「経済数学教室 別巻 確率論」 岩波書店

鈴木光男(1994) 「新ゲーム理論」 勁草書房

総務省郵政研究所(2002) 第14回研究発表会第1部・研究発表要旨集

日原勝也(2001) 「空港の赤字」をどう考えるべきか。 リアル・オプション理論による分析の試み 国土交通政策研究所機関誌 PRI Review 第2号

藤井彌太郎監修(2001) 「自由化時代の交通政策」 東京大学出版会

- 舟木直久(1997) 「確率微分方程式」岩波書店
- OECD(2000), est! (Economically Sustainable Transport)のためのガイドライン
- Pindyck, R.(2000), Irreversibilities and the timing of environmental policy
RESOURCE and ENERGY ECONOMICS 22(3)
- Smit, H. and Ankum, L. (1993), A Real Options and Game-Theoretic Approach to
Corporate Investment Strategy Under Competition, FINANCIAL MANAGEMENT
AUTUMN
- von Neumann, J., and O. Morgenstern(1944), Theory of Games and Economic Behavior,
Princeton University Press (邦訳、鈴木浩他訳(1972) 「ゲームの理論と経済
行動」 東京図書)

不確実性を考慮した交通行政の 新たな運営方式に関する研究

～平成13年度実施研究・概要報告

国土交通政策研究所 主任研究官
日原勝也

1

ご案内

- ◆ なぜ、新しい方式？
- ◆ どういう点が新しい？
- ◆ 具体的な研究項目
- ◆ 得られた主な知見
- ◆ 今後の課題

国土交通政策研究所 主任研究官
日原勝也

2

なぜ、新しい方式？(その1)

- 社会経済情勢の変化により不確実性が増大
→不確実性を明示的に扱った方式が必要。
- 低成長・デフレの時代で、行政の判断が誤る(予測が外れるなど)ことに対し、国民が許容できなくなりつつある。(「過大予測」への厳しい批判など)
→あらかじめ不確実性(=誤る可能性)に関する情報も提示し、信頼関係に基づき実施を合意する必要

国土交通政策研究所 主任研究官
日原勝也

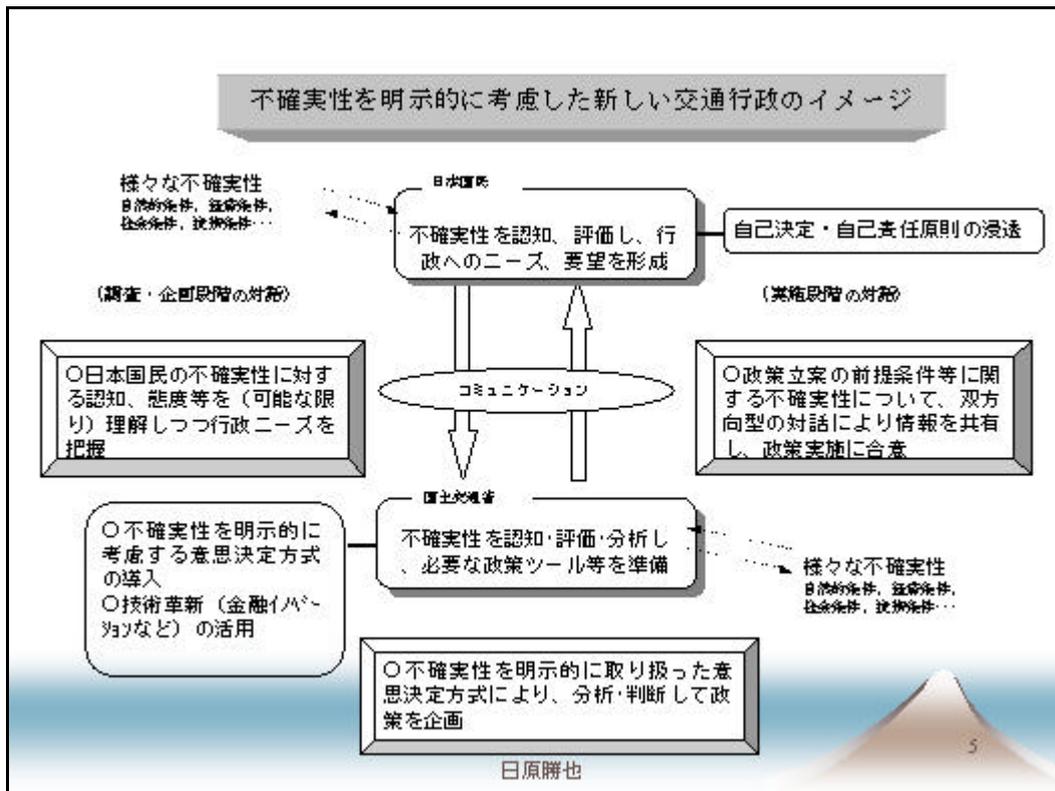
3

なぜ、新しい方式？(その2)

- 自己決定・責任原則の時代へ(リスクの民主化)
→国民が自己決定するため、前提としてより正確な(=不確実性を含む。)、きめ細かい情報提供の必要
- 事後にだましたと言われないうために
→従来の説得型からコミュニケーション型・合意形成型への転換が必要

国土交通政策研究所 主任研究官
日原勝也

4



どういう点が新しい?

(新たな方式の主なイメージ)

情報の流れ: 一方向型 → 双方向型へ

方法 : 説得のみ → 信頼関係・合意へ

交信時 : 政策実施時 → 恒常的・計画段階から

提示内容 : 結論・「正解」のみ

→ 不確実性に関する想定などを含む。

行政の意思決定: 不確実性は限定的に考慮

→ 明示的に考慮・イノベーションも活用

具体的な研究項目

1. リスク・コミュニケーション: 地震等の自然災害に関しコミュニケーションの前提となる国民と行政の認識モデルなどについて、基礎的な研究
2. リスク・ファイナンス: 地震等の自然災害に関し、金銭的な負担を軽減するイノベーションについて、基礎的な研究
3. リアル・オプション: 不確実性を明示的に考慮した意思決定方式の行政への応用を研究

国土交通政策研究所 主任研究官
日原勝也

7

得られた主な知見(その I)

リスク・コミュニケーションについて(基礎的な理論の整理)

1. 地震発生に関する確率的な情報のような自然災害関連の不確実な事象に関する情報は、原子力事故などに比べ、人々は事前により反応しないことが指摘されている。
2. 反面、一定のリスク評価モデルによると、損害に関する事態には、リスク選好的な態度をとることから、地震防災対策が十分でない、と判断される可能性がある。(特に事後的に非難されることもあり得る。)

国土交通政策研究所 主任研究官
日原勝也

8

得られた主な知見(そのⅡ)

リスク・ファイナンスについて(基礎的な理論の整理・分析)

1. 地震被害の(金銭的)負担軽減のため、適確な情報開示を前提に、個人が自立してリスク・ヘッジできるよう「リスクの市場化」も検討し得る。
2. 地震被害のように、被害に相関性が想定される場合には、従来の地震保険に加え、地震債券などによる金融イノベーションにより社会的効用が増加する可能性がある。

国土交通政策研究所 主任研究官
日原勝也

9

得られた知見(そのⅢ-1)

リアル・オプションについて(理論の整理+国土交通行政への応用に関する簡単な分析)

1. ブラック・ショールズの公式:

理想的な市場に関する仮定の下、高い操作性が得られる。

分析例:A空港株式会社の投資判断

不確実性が高い等の状況であれば、柔軟性をもたらす拡張オプションを維持すべき。

国土交通政策研究所 主任研究官
日原勝也

10

得られた知見(そのⅢ-2)

2. 2項モデル:

簡単な構造であり、仮定も限定的。交通市場の寡占構造分析などへの応用が期待される。

分析例: 小型書類運送市場の構造と企業の投資行動(ゲームの理論との簡単な融合)
非対称な複占市場では、投資のNPVが大きくなると投資を延期する可能性がある。

得られた知見(そのⅢ-3)

3. 動的計画法(ベルマン方程式法):

仮定は少ないが、モデルがやや難解で操作性に劣る。

分析例: 排ガス規制のタイミング分析に関するモデルについて、特性を整理し、現実の適用への課題等を整理。

技術や嗜好の変化等が激しい場合には、実施を遅らせ、排出率が伸びる場合には早期に実施することが社会的に望ましい。

今後の課題

リアル・オプション: 行政実務に適用するため、理想的な市場に関する仮定を緩める必要。



ゲームの理論、シミュレーションの活用など、他の領域との融合、応用に関する研究を行う。

本報告書は、各執筆者個人の見解としてとりまとめた
ものです。
本資料が皆様の業務の参考となれば幸いです。

国土交通政策研究 第9号

不確実性を考慮した交通行政の新たな運営方式に関する研究

2002年9月発行

発行 国土交通省国土交通政策研究所

〒100-8918 東京都千代田区霞が関2 - 1 - 2

中央合同庁舎第2号館

Tel (03) 5253-8816 (直通番号)

Fax (03) 5253-1678