

# 遅延リスクと事業評価

京都大学大学院 織田澤 利守\*1

日本建設コンサルタント(株) 四辻 裕文\*2

京都大学大学院 小林 潔司\*3

By Toshimori OTAZAWA, Hirofumi YOTSUTSUJI and Kiyoshi KOBAYASHI

本研究では、公共事業の関連主体間における合意形成の不備に起因する事業の遅延リスクがもたらす経済損失を明示的に考慮した事業評価手法を開発する。事業の遅延は、合意形成に要する期間の長期化や財政的な問題に因ることが多い。こうした場合、事業実施主体にとって、事業の完成時期は不確実であり、事業遅延による経済損失が発生する可能性（遅延リスク）が存在する。本研究は、事業の遅延リスクを合意形成の達成段階を示す指標を用いて表現する。その上で、リアルオプション理論を導入することにより、事業の実現可能性を考慮した合理的な事業評価手法ならびに投資意思決定ルールを提案する。

【キーワード】 事業評価、遅延リスク、機会損失費用、リアルオプション

## 1. はじめに

公共事業の効率性・有効性に対して衆目が集まる中、所管官庁は、新規事業に対して、費用便益分析を含めた新規採択時評価制度を導入した<sup>1)</sup>。長期継続中の事業箇所に対しては、現時点の費用便益分析を含めた再評価を実施し、重点投資による進捗速度の向上と事業便益の早期発現を目指している<sup>2)</sup>。

公共事業は、その計画策定・事業執行プロセスを通じて、遅延リスクに晒されており、必ずしも基本計画決定の時点で想定した工事完了年度に供用できるとは限らない。当初想定した工事着工及び完了予定年度から遅延している事業中箇所が、再評価の結果、社会経済情勢の変化によって中止しなければならなくなり、既投資額が回収できない場合もある。最近、事業遅延を便益発生が遅れによる社会的損失として評価する試みがある<sup>3),4)</sup>。しかし、便益発生が遅れを事後的に評価しているに過ぎず、関係主体間の合意形成不備等の遅延リスクは明示的に扱われていない。事業評価によって遅延リスクを回避するには、新規採択時評価と再評価からなる現行の事業評価システムの中に、遅延した事業が再評価の結果中止となるリスクを事業採択時に

評価できる枠組みを導入することが必要となる。

本研究では、遅延リスク要因として利害関係主体間の合意形成の熟度に着目し、遅延リスクを考慮した事業評価にリアルオプション理論を適用する。そして、事業着手の最適タイミングを選択できることによる遅延リスク軽減の便益（タイミングオプション価値）および一旦事業着手したものの実現可能性の低い事業を中止することによる損失回避便益（中止オプション価値）を経済評価に組み込んだ枠組みを提案する。さらに、事業実施主体が事業の実現可能性を勘案した上で、投資行動を選択するような効率的な投資意思決定ルールを導出する。

本研究では、遅延リスクを考慮したプロジェクトの事前・再評価モデルを提案する。さらに、事前・再評価モデルを用いて、単一事業の最適投資タイミングを評価できるのみならず、遅延リスクの大きさが異なる複数の事業計画案の中から最も望ましい代替案を選択することも可能となる。この場合、早期供用が可能な代替案の選択可能性により、機会損失のリスクを回避することが可能となる。以下、2. では本研究の基本的な考え方を説明し、3. で遅延リスクを考慮した事業評価手法を説明する。4. で、適用事例を示す。

\*1 工学研究科都市社会工学専攻 博士後期課程 075-753-5072

\*2 大阪支社 技術第二部 第三課 06-6453-2983

\*3 工学研究科都市社会工学専攻 教授 075-753-5071

## 2. 事業評価と遅延リスク

### (1) 現行の事業評価プロセスの課題

現行の事業評価実施要領では、個別事業の評価は、新規採択事業、および5年間未採択か事業採択後5年間未着工か10年間継続中の事業に対して行われる。新規採択時評価は、事業の投資効率性を評価することに重点があるのに対して、再評価は評価結果の説明責任を果たしプロセスの透明性を確保することが実質的な目的とされる。

都市高速道路事業を例に、計画策定・事業執行プロセスにおける事業評価の手続きを概観する。図-1に事業プロセスと民意が反映する主な段階を示す。まず、計画策定段階では、上位計画で政策的に決定した事業構想をもとに、予算化、基本計画策定、事業承認が行われる。ここでは、着工準備前を構想段階、着工準備から事業着手までを計画段階と呼ぶ。基本計画で決定される項目は、(1)路線名及び起終点、(2)車線数、(3)設計速度、(4)連結位置及び連結予定施設、(5)概算工事費、(6)その他必要な基本事項である。工事着工及び完了予定年度は、通常、基本計画策定時に項目(6)として行政の判断で決定され、事業承認時に公表される。基本計画決定後、路線選定を含む概略検討と工事実施計画策定が行われ、将来交通需要推計の結果と概算工事費をもとに費用便益比（以下、B/Cで表す）が算定される。B/C、事業の必要性、効果、熟度に関する新規採択時評価によって事業採択、事業承認になれば、事業着手となる。次に、事業執行段階では、住民への事業説明から始まり、測量設計、用地交渉、入札契約を経て、工事着工となる。ここでは、事業着手から工事着手までを整備段階、工事着手から供用までを工事段階と呼ぶ。一般的に、再評価の対象なる事業では、住民説明で合意が得られずに設計協議と用地取得に長期を要する場合が多い。そのため、事業手法として、通常は、先行用地取得や段階施工が行われる。再評価では、事業採択時のB/Cの変動要因、再評価時のB/C、代替案の実行可能性、今後の進捗見込みについて評価される。評価の結果、事業中止となれば上記のように手続き上発生したコストが回収不能となる。このようなリスクを回避するには、計画策定段階で民意を汲

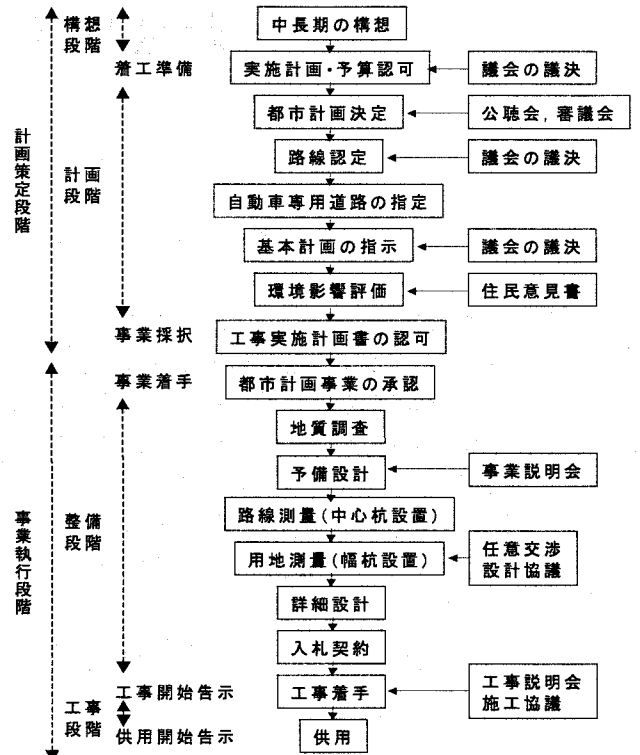


図-1 都市高速道路事業のプロセス

みとり合意形成の熟度（遅延リスク）を推量するとともに、事業採択時の評価に反映する必要がある。

### (2) 遅延リスクと合意形成の熟度

本研究では「事業の遅延」を「事業の完工が最小工期より遅れること」と定義する。遅延リスクの要因は様々である。本研究では、遅延リスクの重要な要因である住民との合意形成の遅れに着目する。東京外環道路事業の住民説明会における意見概要<sup>5)</sup>を例にとると、(1)計画の効果や必要性、(2)沿道環境や生活環境の変化（騒音振動、コミュニティ分断等）や交通状況や施工状況の変化（渋滞、事故、災害等）に対する懸念、(3)現在までの事業プロセスの不透明性と今後の予定の不確実性といった項目が住民との合意形成を困難にしており、事業を遅延させている。例えば、計画策定・事業執行プロセスのうち、都市計画決定や環境アセスメントの法的手続きの時点において市民の意見は事業に反映されていたとしても、事業着手後の用地交渉段階において事業が遅延する可能性がある。この場合、用地交渉の段階で合意形成が不十分であり、事業が長期化したと考えられる。用地取得が完了して工事が開始される時点では、住民との合意形成が熟

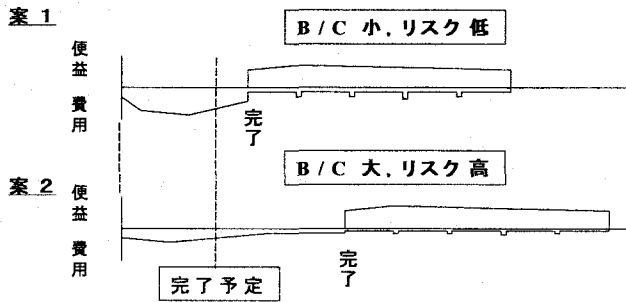


図-2 費用便益比と遅延リスクのトレードオフ

したと考える。

以上の例でも明らかなように、住民との合意形成過程には不確実性が介在し、工事完了予定年度が大幅に遅延する可能性がある。事業実施主体にとって、合意形成に至るまで期間は不確実な外生的要因により決定され、事業のスケジュールの全てを自由に制御することはできない。これまでの事業評価においては、種々の手続き上最低限必要な時間が予定事業期間と設定されることが多く、事業期間に介在する不確実性は考慮されていない。事業の効率的な実施のためには、合意形成に至るまでの期間の長期化に伴う費用の増大や機会損失の可能性を考慮に入れた評価手法の開発が必要である。無論、計画策定段階における住民参加による合意形成の熟成は遅延と言いが難いが、それでも無意味な事業の長期化は避けるべきである<sup>6)</sup>。

### (3) 早期供用オプション価値

従来、投資効率性の最も高い代替案を選択するのに費用便益比が用いられてきた。しかし、B/Cが最大となる代替案が必ずしも円滑に事業執行できるとは限らない。現実には、総合的な判断から、結果的に建設工事費が高くつくにせよ、遅延リスクの小さい代替案を選択することもある。例えば、図-2のようにコストは安いが遅延リスクが大きい案とコストは高いが遅延リスクが小さい案について経済評価をしなければならない場合に対して、従来の費用便益分析では十分に対応できない。本研究では、このようなリスクを考慮した経済評価手法に、リアルオプション理論<sup>7)-11)</sup>を適用する。代替案が1つしかない場合、合意形成が熟しておらず遅延リスクが大きいならば、評価主体が事業着手の最適タイミングを選択(熟考)できるオプシ

ンをもつことによって遅延リスクを軽減できる。この時、遅延リスク軽減便益(タイミングオプション価値)が生じる。また、一旦事業に着手したものの合意形成の不備から実行可能性が低くなる場合、評価主体が再評価によって中止できるオプションをもつことにより、事業を継続することで生じる追加的な損失を回避できる。この時、損失回避便益(中止オプション価値)が生じる。投資タイミングや中止のオプションを行使するか否かは、合意形成の熟度と事業価値を判断材料として決定される。

代替案が複数あって遅延リスクに相関がない場合、評価主体が、代替案選定(基本計画策定)の段階で、合意形成の熟度(遅延リスク)の異なる代替案のうち早期供用が可能な代替案を選択できるオプションをもつこととなり、便益発生が遅れによる機会損失を回避できる。この時、早期供用オプション価値が生じる。このようにリアルオプション理論を用いれば、タイミングオプション価値、中止オプション価値、早期供用オプション価値を明示的に考慮することができる。オプション価値の定式化に関しては、3.(5)で議論することとする。

## 3. 遅延リスクを考慮した事業評価手法

### (1) モデルの前提条件

本研究では合意形成の不備によって生じる事業遅延の発生可能性(遅延リスク)を明示的に考慮した事業評価手法を提案する。事業を予備的投資(事業着手)および本格的投資(建設工事)という2段階投資に関する意思決定問題として定式化する。初期時点より予備的投資(事業着手)の時点までを計画段階、事業着手時点より本格的投資(工事着手)の時点までを整備段階、工事着手から供用までを工事段階と呼ぶこととする。予備的投資の段階では建設工事の着工までに必要とされる種々の事前調整ための費用が支出される。予備的投資の実施に伴い、住民への事業説明会や測量、詳細設計、用地買収が開始される。事前調整には少なくとも一定期間 $\tau$ を要するが、その間の社会的・政治的な環境の変化により、予定どおりに事業の建設工事が実施されない可能性がある。すなわち、遅延リスクが存在する。

本モデルでは、事業は関連主体間の利害調整のた

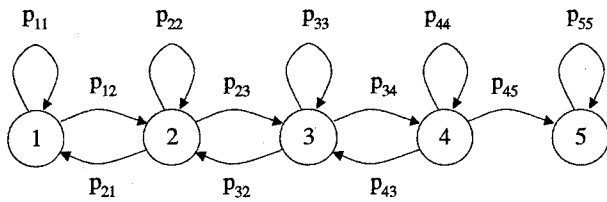


図-3 合意形成の熟度の推移グラフ

注) 記述の簡略化のため確率遷移行列  $P$  において  $N = 5$  であり, 遷移確率  $p_{i,i}$  ( $i = 1, \dots, 5$ ) 及び,  $p_{i,i+1}, p_{i+1,i}$  ( $i = 1, \dots, 4$ ) 以外の遷移確率がすべて 0 となる場合を想定している。

めに合意形成期間を必要とし, 賛同態度形成が達成された時点ではじめて本格的投資が可能になると仮定する。ここで, ある時点  $t_i$  ( $i = 0, 1, \dots$ ) における事業の合意形成に関する達成段階をフィージビリティ指標  $X_i$  を用いて表そう。状態変数  $X_i$  は離散的な  $N$  ( $N > 2$ ) 個の状態  $X_i = j$  ( $j = 1, \dots, N$ ) で定義される。フィージビリティ指標がはじめて  $X_i = N$  となった時点  $t_i$  で事業に関する関係主体間の合意形成が達成され, 本格的投資が可能となる。一方,  $X_i = j$  ( $j = 1, 2, \dots, N - 1$ ) の時, 当該時点では本格的投資に着手できないと考える。フィージビリティ指標  $X_i$  は, 時間軸に沿って確率的に変動する。図-3 は事業熟度が確率的に推移する様子を表した概念図である。ある時点で観測された事業熟度が次の時点でどのように推移するかは確率的に決定される。初期時点よりフィージビリティ指標  $X_i$  がはじめて状態  $N$  に達するまでの期間を合意形成期間と呼ぶ。本モデルでは, 合意形成の期間長は, 事業実施主体が制御できない外生パラメータであり, 不確実性を有すると仮定する。

事業が完成した時点ではじめて事業価値が発生する。簡単のため, 事業は本格的投資の実施後, 瞬時に完成すると仮定する。事業の建設期間を考慮しても, 以下の議論は本質的には変化しない。いま, 時点  $t_i$  において事業が完成した場合に獲得できる事業価値を  $B_i$  と表す。事業価値は, 仮にその時点で事業が完成した場合に当該時点から将来にわたって発生する期待総便益の当該期価値を意味する。事業価値は, 初期時点  $t_0$  における評価値  $B_0$  を初期値とし, 各期間において定率  $\alpha$  ( $< r$ ) で変化すると仮定しよう。事業価値の変化過程を確率過程で

表すことも可能であるが, ここでは議論の見通しをよくするため確定的なトレンド過程で表す。なお, 事業の予備的投資費用を  $C_1$ , 本格的投資費用を  $C_2$  とし, 時間を通じて一定と仮定する。また, 社会的割引率を  $r$  で表す。本モデルでは, 議論の簡略化のため意思決定時刻が事前調整の最短期間と同じ期間  $\tau$  毎に訪れる, すなわち  $t_i = i\tau$  ( $i = 0, 1, \dots$ ) と設定するが, この仮定を変更しても議論の本質は変わらない。

## (2) 遅延リスクのモデル化

$S = \{1, 2, \dots, N\}$  を離散的な  $N$  ( $N > 2$ ) 個の状態 で定義される状態空間とし, フィージビリティ指標  $\{X_i\}$  は  $S$  上で定義される斉時的マルコフ過程に従うと仮定する。状態  $j$  から状態  $k$  への 1 ステップ推移確率を

$$Pr[X_{i+1} = k | X_i = j] = p_{jk} \quad (1)$$

と定義する。したがって, 推移確率行列は,

$$P = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & \dots & p_{1N} \\ p_{21} & p_{22} & \dots & p_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{N1} & p_{N2} & \dots & p_{NN} \end{pmatrix} \quad (2)$$

となる。ここで, 推移確率行列  $P$  の構成要素である  $p_{jk}$  は, 推移確率であり非負の値をとる。ある時点で状態  $j$  であれば, 次の時点では取りうる状態のうちどれかには必ず推移するため,

$$\sum_{k=1}^N p_{jk} = 1, j \in S; \quad p_{jk} \geq 0, j, k \in S \quad (3)$$

を満足する。また,  $\{X_i\}$  はひとたび吸収状態  $N$  に到達すれば, それ以降他の状態に遷移せず,

$$p_{NN} = 1, p_{Nj} = 0 (j \in S, j \neq N) \quad (4)$$

が成立する。次に,  $T_{jk}$  を状態  $j$  から出発したマルコフ連鎖  $\{X_i\}$  が初めて状態  $k$  を訪れるステップ数を表す確率変数である。  $T_{jk}$  の確率分布は,

$$\begin{aligned} f_{jk}(m) &= Pr[T_{jk} = m] \\ &= Pr[X_{i+m} = k, X_{i+l} \neq k; l < m | X_i = j] \\ & \quad (m = 1, 2, \dots) \end{aligned} \quad (5)$$

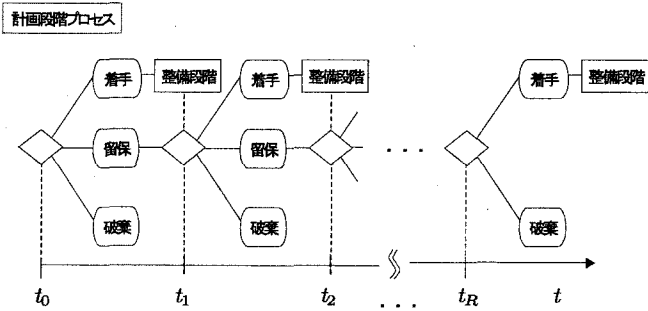


図-4 計画段階の意思決定構造

で表せる。  $f_{jk}(m)$  は  $X_i$  が  $j$  から始まり  $m$  ステップ後に初めて状態  $k$  に到達する確率を表す。確率変数  $T_{jk}$  を、状態  $j$  から状態  $k$  への最小到達時間と呼ぶ。また、状態  $j$  ( $j = 1, \dots, N-1$ ) から吸収状態  $N$  に到達するまでの期待到達時間  $E[m(j)]$  を

$$E[m(j)] = \sum_{m=1}^{\infty} m \cdot Pr[T_{jN} = m] \quad (6)$$

と表す。なお、本モデルを具体的な問題に適用する場合、フィージビリティ指標  $X_i$  をどのような状態変数で表現するかが問題となる。事業の遅延リスクに関する研究は緒についたばかりであり、フィージビリティ指標の表現は今後の研究の蓄積を待たざるを得ない。しかし、フィージビリティ指標  $X_i$  の各状態に対して、合意が形成されるまでの期待所要時間が求まる。したがって、フィージビリティ指標  $X_i$  の各状態  $j$  を「合意が形成されるまでの期待到達時間が  $E[m(j)]$  である」ような状態と解釈することができる。

### (3) 意思決定プロセスの構造

計画段階における事業着手に関する投資意思決定プロセスを図-4に示す。事業着手（予備的投資の開始）に関する意思決定は、初期時点  $t_0 = 0$  より時点  $t_R$  までの各時点で行われる。時点  $t_R$  は事業着手が可能な最終時点であり、時点  $t_R$  まで経過しても事業が着手されない場合、事業は廃案となる。時点  $t_R$  は無限遠であってもいい。

事業着手に関する意思決定問題は、時点  $t_i$  において観測されるフィージビリティ指標  $X_i$  と事業価値  $B_i$  のもとで「事業に着手するか（予備的投資を実施するか）」、「事業の着手を延期するか」、あるいは「事業を破棄するか」を決定する問題として定式化

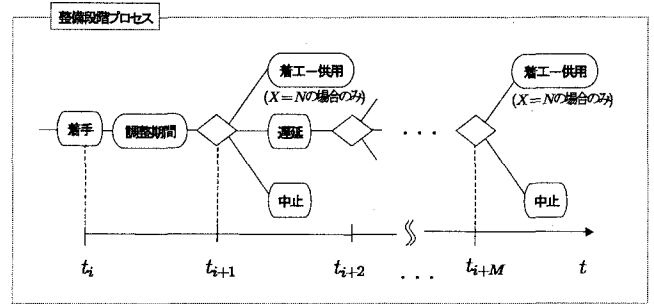


図-5 整備段階の意思決定構造

できる。いま、事業の着手を決定するある時点  $t_i$  に着目する。当該時点で事業への予備的投資を実施した場合、整備段階へと移行し、建設工事の開始時期が検討される。この時、もっとも早い場合には時点  $t_{i+1}$  で事業の本格的投資に着手できる。しかし、合意形成期間に関するリスクが存在するため、時点  $t_{i+1}$  に本格的投資を実施できるかどうか判らない。仮に、事業の熟度が低い水準にも関わらず事業に着手すれば、大幅な遅延が生じたのち事業が中止され、それまでに投下した事業費用を無駄にしまう可能性がある。一方、合意形成が完全に達成されるまで事業着手を待てば、便益の発現が必要以上に遅れることにより損失が生じる。事業主体は、当該時点における事業の熟度を判断材料として、期待総事業価値を最大とするような事業着手のタイミングを選択する。

事業が着手されると、整備段階へと移行する。整備段階における投資意思決定プロセスを図-5に示す。いま仮に、時点  $t_i$  に事業に着手したとしよう。事前調整がもっとも順調に進んだ場合、時点  $t_{i+1}$  に事業の本格的投資が可能となる。しかし、事業をめぐる社会的・政治的環境が整わない場合、時点  $t_i$  に本格的投資に着手できず事業の完成が遅延する。事業の本格的投資は時点  $t_i$  から時点  $t_{i+M}$  まで遅延することが許されていると考える。  $M$  は遅延が許される期間長である。時点  $t_i$  において事業に着手したのち、時点  $t_{i+i'}$  まで事業が遅延したとしよう。すなわち、時点  $t_{i+i'}$  において、当該期に観測される事業に対する合意形成の熟度  $X_{i+i'}$  と事業価値  $B_{i+i'}$  のもとで、1) 事業を完成できるか、できないならば、2) さらに事業の遅延を認めるか、3) 事業を破棄するかを決定する。このように、事業執行途中で事業を中止するという選択肢(中止オプ

ション)を含んだ意思決定構造は、再評価制度と整合的である。再評価時点において継続が望ましくない事業を中止する(中止オプションを行使する)ことにより、非効率な追加的投資を実施しないで済む。このとき、損失回避便益(中止オプション価値)が発生する。一方で、事業への既投資額は回収不可能であり、中止オプションを行使することはそれまでに投下した費用を無駄にすることを意味する。現実には、建設工事開始の意思決定タイミングと再評価実施のタイミングは一致するとは限らない。本モデルでは、煩雑さを防ぐため事前評価と再評価の見直しは時間軸上で等間隔に同じ時点で行われると仮定する。

#### (4) 整備段階における意思決定

まず、整備段階における建設工事開始に関する意思決定プロセスに着目しよう。時点 $t_i$ で事業に着手し、時点 $t_{i+i'}$ で $X_{i+i'} = N$ が成立し、いつでも建設工事の開始ができる場合を考えよう。当該期で事業を完成した場合に獲得できる事業価値 $B_{i+i'}$ は、時点 $t_0$ における価値 $B_0$ を初期値とし定率 $\alpha$ で変化すると仮定すれば、 $B_{i+i'} = (1+\alpha)^{(i+i')\tau} B_0$ と表される。したがって、当該期に事業を完成させることにより得られる事業純価値 $V_{i+i'}$ は、

$$V_{i+i'} = B_{i+i'} - C_2 \quad (7)$$

と表される。また、事業純価値の最大値の当該期価値 $\Phi_{i+i'}(N)$ は次のように表される。

$$\Phi_{i+i'}(N) = \max \left\{ V_{i+i'}, \frac{E_N[\Phi_{i+i'+1}(N)|X_{i+i'} = N]}{(1+r)^\tau} - G, -W \right\} \quad (8)$$

記号 $E_N[\cdot|X_{i+i'} = N]$ は推移確率 $p_{NN}$ に関する期待値操作を表す。 $r$ は社会的割引率であり、費用便益分析において用いられる値を採用する。 $N$ は吸収状態であるので $p_{NN} = 1.0$ である。 $G$ は事業の完成が1期遅延することにより生じる留保コストである。式(8)の右辺第1項は、当該時点で建設工事を開始した場合の期待純価値を、第2項は建設工事の開始を1期見送った場合に獲得できる期待純価値の最大値の当該期価値を表す。また、第3項は事業を中止した場合の純価値である。事業が中止した

場合、予備的投資は無駄となりスクラップ費用 $-W$ が発生する。本格的投資に関する意思決定問題の最終期限時点 $t_{i+M}$ においては、それ以上事業実施を留保することは許されない。従って、時点 $t_{i+M}$ において $X_{i+M} = N$ が観測された場合に獲得される事業の純価値の当該期価値は、

$$\Phi_{i+M}(N) = \max\{V_{i+M}, -W\} \quad (9)$$

となる。つづいて、時点 $t_{i+i'}$ において $X_{i+i'} = j$  ( $j \neq N$ )が観測された場合を考えよう。この時、事業実施主体の選択可能な行動は、1) 事業の完成を延期するか、あるいは2) 中止するかである。時点 $t_{i+i'}$ において $X_{i+i'} = j$  ( $j \neq N$ )が観測された下で、時点 $t_{i+i'}$ 以降最適な選択行動を採用した場合に獲得される事業期待純価値の最大値 $\Phi_{i+i'}(j)$ は

$$\begin{aligned} \Phi_{i+i'}(j) &= \max \left\{ \frac{E_k[\Phi_{i+i'+1}(k)|X_{i+i'} = j]}{(1+r)^\tau} - G, -W \right\} \\ &= \max \left\{ \frac{\sum_{k=1}^N p_{jk} \Phi_{i+i'+1}(k)}{(1+r)^\tau} - G, -W \right\} \quad (10) \end{aligned}$$

$$\Phi_{i+M}(j) = -W \quad (j \in S, j \neq N) \quad (11)$$

となる。記号 $E_k[\cdot|X_{i+i'} = j]$ は推移確率 $p_{jk}$  ( $k = 1, \dots, N$ )に関する期待値操作を表す。式(10)の右辺第1項は事業の完成を延期した場合の期待純価値の当該期価値を、第2項は中止する場合のスクラップ費用を表す。なお、式(11)は、本格的投資に関する意思決定問題の最終期限時点 $t_{i+M}$ において、 $X \neq N$ の場合事業は自動的に破棄されることを表す。式(11)および $\Phi_{i+i'}(N)$ を用いて、式(10)を後ろ向きに解くことにより、 $\Phi_{i+i'}(j)$ を得る。

#### (5) 計画段階における意思決定

時点 $t_{i+1}$ における合意形成の熟度が $X_{i+1} = j$  ( $j = 1, \dots, N$ )であったとしよう。すでに事業に着手している場合、時点 $t_{i+1}$ で獲得できる事業の期待純価値は最適値関数 $\Phi_{i+1}(j)$ で表される。いま、時点 $t_i$ において $X_i = j$ が観測されたとしよう。この時、事業期待純価値の当該期価値 $\Psi_i(j)$ は、

$$\Psi_i(j) = \max \left\{ \frac{E_k[\Phi_{i+1}(k)|X_i = j]}{(1+r)^\tau} - C_1, \frac{E_k[\Psi_{i+1}(k)|X_i = j]}{(1+r)^\tau} - H, 0 \right\} \quad (12)$$

と表される。式(12)の右辺第1項は事業着手により獲得される事業の期待純価値の当該期価値を表し、第2項は事業着手を延期した時の期待純価値の当該期価値を表す。 $H$ は事業着手が1期遅れることにより発生する遅延コストである。また、第3項は事業を廃止した時の価値である。事業着手に関する意思決定の最終期限時点 $t_R$ においては、それ以上事業着手を遅延することは許されない。したがって、時点 $t_R$ において $X_R = j$ が観測された場合に獲得される事業の期待純価値の当該期価値は、

$$\Psi_R(j) = \max \left\{ \frac{E_k[\Phi_{R+1}(k)|X_R = j]}{(1+r)^T} - C_1, 0 \right\} \quad (13)$$

となる。式(13)を境界条件として式(12)を後ろ向きに解くことにより、 $\Psi_i(j)$ を得る。

#### (5) オプション価値の定式化

本研究では、リアルオプション理論を適用することにより、事業開始のタイミングを選択できることによる遅延リスク軽減の便益（タイミングオプション価値）および、一旦事業を開始したものの、実現可能性が低い事業を中止することによる損失回避便益（中止オプション価値）を事業の経済評価に組み入れることが可能となる。タイミングオプションと中止オプションは時系列で相互に関連するコンパウンド・オプションとして作用しており、それぞれの価値を個別に導出することは困難である。整備段階において中止オプションが無い場合の最適値関数 $\Phi_{i+i'}^{\circ}(j)$ は次のように表される。

$$\Phi_{i+i'}^{\circ}(j) = \frac{E_k[\Phi_{i+i'+1}^{\circ}(k)|X_{i+i'} = j]}{(1+r)^T} - G \quad (14a)$$

$$\Phi_{i+M}^{\circ}(j) = -W \quad (j \in S, j \neq N) \quad (14b)$$

$$\Phi_{i+i'}^{\circ}(N) = V_{i+i'} \quad (i' = 1, \dots, M) \quad (14c)$$

最適値関数 $\Psi^{\circ}$ は、従来の費用便益分析で想定されるNow-or-Never原則（事業に関する意思決定を初期時点のみで実施し、一度出した結論の見直しは2度と行わない）に基づく事業の期待純価値を表し、次のように定式化される。

$$\Psi_0^{\circ}(j) = \max \left\{ \frac{E_k[\Phi_1^{\circ}(k)|X_0 = j]}{(1+r)^T} - C_1, 0 \right\} \quad (15)$$

タイミングオプションおよび中止オプションを同時に考慮した場合の最適値関数 $\Psi$ からNow-or-Never原則の下で最適値関数 $\Psi^{\circ}$ を差し引いた値が、事業のコンパウンドオプションの価値 $\Delta^{\circ}$ である。

$$\Delta^{\circ}(j) = \Psi_0(j) - \Psi_0^{\circ}(j) \quad (16)$$

本研究で提案した評価モデルは種々の拡張が可能である。特に、遅延リスクの大きさの異なる複数の代替案の中からもっとも望ましい代替案を選択する問題へ容易に適用することが可能である。この場合、早期供用が可能な代替案の選択可能性により、機会損失のリスクを回避することが可能となる。代替案の選定が初期時点においてのみ実施されるものと仮定すれば、代替案選択ルールは

$$\max \{ \Psi_0(j), \Psi_0'(l) \} \quad (17)$$

と表される。ただし、 $\Psi_0(j), \Psi_0'(l)$ は、初期時点においてそれぞれフィージビリティ指標 $j, l$ を観測した場合における事業の期待純価値である。本研究では、代替案の選定が初期時点においてのみ実施されるとしているが、事業期間を通じて代替案が利用可能であるような場合も想定し得る。例えば、計画段階の各時点で複数の代替案を保有することが許される場合や整備段階の途中で事業案をスイッチするという場合にも適用可能である。

## 4. 道路事業のケーススタディー

### (1) 対象事例の概要

現実に実施された大規模幹線道路事業をケーススタディーの対象とする。この事例は、旧国道のバイパスとして高速自動車道インターチェンジと市街地を結ぶ道路改築事業である。この事業は、着手した当初の代替案I(ルートI)がその後の過程で長期化する恐れが生じたため、早期供用を目指し代替案II(ルートII)で実施されたという経緯を持つ。代替案Iは直接的な建設費用は安いですが、事業が遅延するリスクが存在する。一方、代替案IIは事業が遅延するリスクは小さいが、直接的な建設費用が高い。いずれの代替案が望ましいかは、直接的な事業費用の減少量と早期供用がもたらす事業効果の発現量との間の関係によって決定される。事業費用

表-1 対象事業のデータ

		代替案I	代替案II
基準年月		S45.4	
事業価値(初期値)		36032.0	
事業費用	予備的投資 C1	1632.7	1601.5
	本格的投資 C2	7116.4	8593.9
	留保費用 H	126.7	
	遅延費用 G	257.8	
	スクラップ費用 W	0.0	

(単位:百万円)

表-2 推移確率行列と平均到達時間

k \ j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	E[m(j)] (年)
1	0.9	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	116.3
2	0.1	0.8	0.1	0	0	0	0	0	0	0	106.3
3	0	0.1	0.8	0.1	0	0	0	0	0	0	86.3
4	0	0	0.1	0.7	0.2	0	0	0	0	0	56.3
5	0	0	0	0.1	0.7	0.2	0	0	0	0	36.3
6	0	0	0	0	0.1	0.6	0.3	0	0	0	21.3
7	0	0	0	0	0	0.1	0.6	0.3	0	0	12.9
8	0	0	0	0	0	0	0.1	0.5	0.4	0	6.8
9	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.4	0.5	2.8
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0

の発生構造は次のようである。予備的投資費用ならびに本格的投資費用は2段階に分けて投下される。さらに、事業完成までの間、計画段階において事業を留保したときには留保費用が、整備段階において遅延が生じたときには遅延費用がそれぞれ発生する。表-1は、数値計算に用いた兩代替案の事業価値および費用のデータである。基準年月を昭和45年4月とし、事業価値ならびに費用のデータはその時点における現在価値で表記している。ベースマークケースとして事業価値の変化率  $\alpha = -0.01$  を用いて分析を行う。スクラップ費用は外生的に与えた。事業に介在する遅延リスク量を規定する合意形成の熟度(フィージビリティ指標)は、1から  $N = 10$  までの10個の状態とし、推移確率行列  $P$  は外生的に設定した。推移行列の各要素  $p_{jk}$  ならびに状態  $j$  より吸収状態に到達する(合意が形成される)までの期待到達時間  $E[m(j)]$  を表-2に示す。なお、社会的割引率を  $r = 0.04$ 、意思決定の間隔を  $\tau = 5$  とした。

(2) 単一路線に対する評価

事前・再評価の見直しが最大30年まで継続することが許容されていると仮定しよう。その上で、代替案Iに対する最適な投資決定ルールを求めた。図-6は、フィージビリティ指標  $X$  と初期時点にお

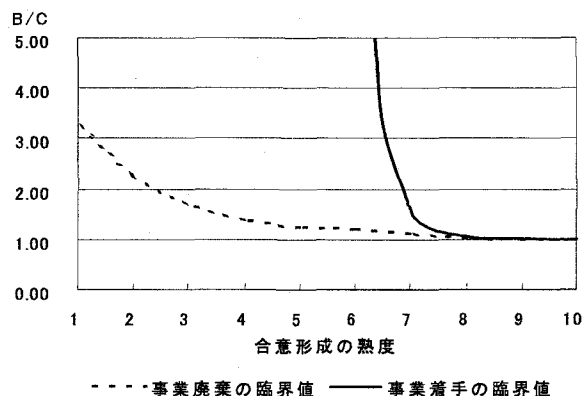


図-6 時刻  $t_0$  における事業投資の臨界的な  $B/C$

ける事業着手および破棄に関する臨界的な費用便益比 ( $B/C$ ) の関係を表している。図中の実線は事業着手に関する臨界的な費用便益比を表す。初期時点においてすでに合意形成が達成されている場合 ( $X_0 = 10$ )、事業には遅延リスクが一切介在せず、費用便益比が  $B/C \geq 1.0$  を満足すれば事業着手が正当化される。合意形成が達成されていない場合 ( $X_0 < 10$  の場合)、臨界的な費用便益比は遅延リスクを見込んだリスクプレミアムを上乗せした値となる。合意形成の熟度が低くなる(遅延リスクが増大する)につれリスクプレミアムの値は大きくなり、事業着工に対してより慎重な対応を要することとなる。一方、点線は事業破棄に関する臨界的な費用便益比を表す。事業の遅延リスクが大きければ、たとえ  $B/C \geq 1.0$  を満足していても事業を着手せずに直ちに破棄することが望ましくなる。また、実線と点線に囲まれた領域では、意思決定を留保する(事業の着工または破棄を見送る)ことが最適となる。図-7は、事前評価が実施される時刻とその時に観測されるフィージビリティ指標の組の下で達成可能なプロジェクト価値の最大値とプロジェクトの採択ルールを図示している。同様に、図-8は、初期時点で事業に着手した後、各再評価時点においてフィージビリティ指標  $X$  を観測した場合に達成できるプロジェクト価値の最大値と再評価ルールを示したものである。このように、本研究で提案した方法論を用いて合意形成の熟度と事業価値に基づいて最適な投資タイミングを選択できる。図-9は、初期時点における合意形成の熟度と最適値関数  $\Psi_0(j)$ 、 $\Psi'_0(j)$  の関係を示している。コンパウンドオプション価値  $\Delta^0$  は最適値関数の差  $\Psi_0(j) - \Psi'_0(j)$



時刻(年)	0	5	10	15	20	25	30
10	20682	19302	17989	16741	15554	14425	13351
9	19885	18551	17281	16074	14925	13834	12796
8	17553	16351	15209	14123	13090	12107	11173
7	13566	12595	11671	10793	9957	9163	8408
6	10213	9459	8736	8033	7336	6611	5776
5	6880	6327	5782	5229	4632	3923	2974
4	4212	3824	3428	3004	2513	1879	892
3	1667	1454	1227	975	685	337	0
2	511	402	290	169	54	0	0
1	72	21	0	0	0	0	0

着手 留保 破棄 (単位:百万円)

図-7 計画段階における事業採択ルール

時刻(年)	5	10	15	20	25	30
10	27150	25470	23873	22354	20910	19536
9	19916	18626	17363	16038	14110	0
8	17682	16441	15108	13355	9637	0
7	13833	12624	11092	8625	3702	0
6	10095	8864	7145	4417	638	0
5	6047	4844	3220	1221	0	0
4	3086	2140	1030	74	0	0
3	684	276	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0

建設開始 遅延 中止 (単位:百万円)

図-8 整備段階における再評価ルール

で定義される。コンパウンドオプション価値 $\Delta^{\circ}$ は、遅延リスクが小さい場合には極めて小さな値をとり、 $X = 10$ で $\Delta^{\circ} = 0.0$ となる。一方、遅延リスクが増大する( $X$ が小さくなる)につれて、コンパウンドオプション価値 $\Delta^{\circ}$ は大きくなる。

### (3) 路線選定に対する評価

図-10は、初期時点における代替案Iの期待純便益(NPV)と合意形成の熟度との関係を表す。遅延リスクが介在する代替案Iでは、合意形成の熟度が高くなるにつれ、期待純便益も増加する。一方、代替案IIには遅延リスクは介在しておらず、期待純便益は確定的な値をとる。代替案IおよびIIの期待純便益の大小によって、初期時点においていずれの代替案を採択すべきかが決まる。フィージビリティ指標  $X_0 = 10, 9$  の場合には代替案Iを採択し、 $X_0 < 9$  の場合には代替案IIを採択することが望ましいことがわかる。すなわち、代替案Iに関する合意形成が達成するまでの平均到達時間が約3年以内の場合は代替案Iを採択し、それ以上の場合は直ちに事業着手が可能な代替案IIを採択することが望ましいこととなる。さらに、遅延リスクが大

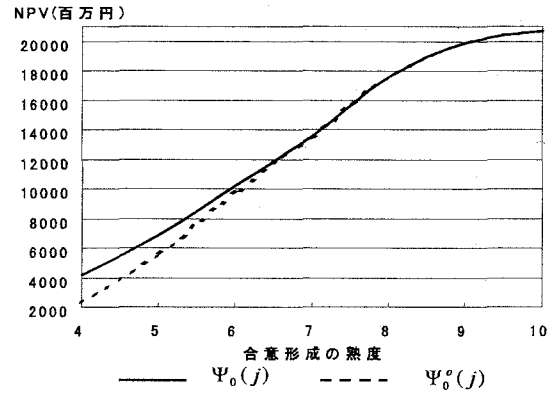


図-9 事業のコンパウンドオプション価値

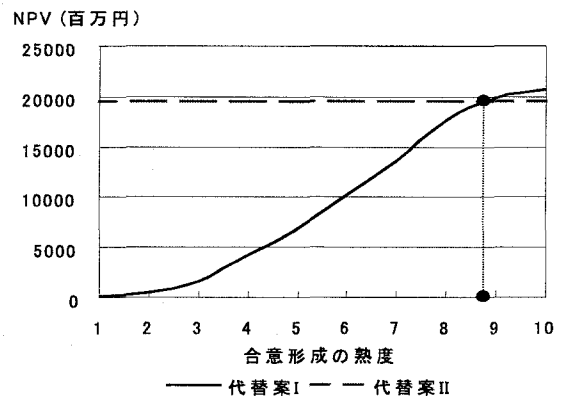


図-10 合意形成の熟度と代替案の選択

きいほど代替案IIがより優位となる。

## 5. おわりに

本研究では、公共事業の評価にあたり、関係主体との合意形成が難航することによる事業着手の遅延リスクをもたらす経済損失を明示的に考慮した事業評価手法を提案した。さらに、提案したモデルを拡張し、遅延リスクの大きさの異なる複数の代替案の中からもっとも望ましい代替案を選択する問題へ適用した。この場合、早期供用が可能な代替案の選択可能性により、機会損失のリスクを回避することが可能となる。公共事業の重点投資による早期供用の必要性が求められる中で、従来の事業評価手法では遅延リスクを含めた評価が困難であった。本研究で提案した評価手法により、事業評価の中に遅延リスクを明示的に組み入れることが可能となる。しかし、本研究において残された課題もいくつか存在する。まず、本研究では事業プロセスを2段階の投資問題としてモデル化した。今後は、用地先行取得や段階施工といった実際の事業手法

に対応できるようにモデルを拡張する必要がある。実際の事業執行においては、全体の工事費増や後段階への制約となるリスクがあるにもかかわらず、予算制約と住民の要望の関係上、用地先行取得や段階施工による暫定供用によって事業便益の早期発現を目指す場合が多い。この場合、モデルを多段階評価に拡張する必要がある。また、本モデルでは合意形成の熟度を斉時マルコフ過程で表現して各状態変数を外生的に与えているが、実際の事業の計画策定段階で評価主体が容易に設定できる合意形成の熟度の指標は、供用開始時期の期待値や標準偏差であろう。評価主体がより簡便に評価可能なツールとして拡張する必要がある。また、事業価値に不確実性が介在する場合には、早期供用可能な代替案を実施することが必ずしも望ましいとは限らない。本数値計算事例では、論点の見通しをよくするため、そのようなケースは除外した。事業価値が確率過程に従って変動する場合、最適値関数 $\Phi$ 、 $\Psi$ を状態変数 $X_i$ 、 $B_i$ を用いて定義する必要がある。この場合でも、本研究と同様の考え方により予備的投資、本格的投資のための意思決定ルールを導出することができる。将来の事業価値の不確実性が大きい場合には、この種の拡張が不可欠となる。

#### 【参考文献】

- 1) 公共事業評価システム研究会：公共事業評価の基本的考え方，国土交通省，2002。
- 2) 社会資本整備関係予算研究会：平成14年度公共事業と予算－国土交通省関係予算を中心として－，2002。

- 3) 外部コストを組み入れた建設事業コストの低減技術に関する検討委員会：総合的な建設事業コスト評価指針（試案），2002。
- 4) 建設経済研究所：公共事業の遅延による社会・経済的影響の把握に関する調査研究，2000。
- 5) 道路計画合意形成研究会：我が国の構想段階における新たな計画決定プロセスのあり方，2001。
- 6) 市民参画型道路計画プロセスのガイドラインについて，国土交通省道路局通達，2002。
- 7) Merton, R. C.: The theory of rational option pricing, *Bell Journal of Economics and Management Science*, Vol. 4, pp. 141-183, 1973.
- 8) Dixit, A. K. and Pindyck, R. S.: *Investment under Uncertainty*, Princeton University Press, 1994.
- 9) Trigeorgis, L.(ed.): *Real Options in Capital Investment: Models, Strategies, and Applications*, Praeger, 1995.
- 10) Trigeorgis, L.: *Real Options: Managerial Flexibility and Strategy in Resource Allocation*, MIT Press, 1996.
- 11) Brennan, M. J. and Trigeorgis, L. : *Project Flexibility, Agency, and Competition: New Developments in the Theory and Application of Real Options*, Oxford University Press, 2000.

## PROJECT EVALUATION WITH RISKS OF PROJECT DELAY

By Toshimori OTAZAWA, Hirofumi YOTSUTSUJI and Kiyoshi KOBAYASHI

In this paper, an economic evaluation methodology of projects is presented, which explicitly incorporates economic loss of project delay. In many projects, the implementation timing is typically regulated by uncontrollable social and political factors. In our model, the political risks are characterized by the probabilities of project delay. The real option model is formulated to determine the optimal investment rules when the implementing timing of the project is uncertain and exogenously determined by political risks. The economic loss caused by project delay can be measured by calculating option values.