

熊本電鉄LRT化プロジェクトに対する拡大オプション型段階整備計画の評価*

Project Evaluation of Kumamoto-Dentetsu Railway LRT Project by Real Option Approach *

溝上章志**・藤見俊夫***・平野俊彦****

By Shoshi MIZOKAMI**・Toshio FUJIMI***・Toshihiko HIRANO****

1. はじめに

近年、多くの地方民営鉄道は、利用者の減少によって経営が悪化し、存続の危機に陥っている。地方民営鉄道は、元々経営規模が小さい上に、経営が逼迫しているために投資余力がない。そのため、線路や駅などのインフラ部や車両などの設備だけでなく、運行頻度や表定速度などのサービス水準が劣悪なまま放置されているのが現状である。一方で、モータリゼーションが飛躍的に進化した上に、道路網整備やTDMの導入などにより、地方都市においても道路交通サービス水準は着実に改善されて、自動車の利便性は地方鉄道のそれに比して確実に向上した。今後、これらの状況はより深刻化していくものと予想されることから、鉄道をはじめとした地域公共交通には何らかの活性化策が求められる。

このような中、平成16年6月には、熊本都市圏北部を運行している熊本電鉄が、軌道延伸による熊本市電への乗り入れ、システムのLRT化、既存バス路線のフィーダー路線網への再編を骨子としたLRT化計画案を公表し、熊本市などに財政的支援を求めた。それと同時に平成16年度末には本LRT計画案に対する需要予測と費用便益分析が行われており、費用便益比はおよそ4.18と算定された。しかし、投資費用が100億円を越えること、LRT化後の利用需要が不確実であるなどの理由で、本計画を一括して整備することは困難であると考えられる。その代替案として、まずは水道町まで軌道を延伸して北熊本までのLRT化を行い、その後、大池まで北へ延伸して北熊本から大池までを全面LRT化をするという段階整備計画が検討されている。

従来の費用便益分析における便益額の評価には主として現在価値法(NPV: Net Present Value)が使われてきた。しかし、この方法では将来需要の不確実性などによる便益の不確実性を考慮に入れた適切なプロジェクト評価が容易でない。本研究では金融オプションの理論を取り入れたリアルオプション・アプローチを用いて本LRT化プロジェクトの評価を行い、従来の現在価値法による評

価と比較することによって、段階整備という柔軟性のある整備計画の価値を求めることを目的とする。

2. プロジェクトの段階的整備手法に関する従来の研究

(1) プロジェクトの段階整備手法

プロジェクトの段階的整備手法に関する研究としては、田村ら¹⁾の研究と青山・松中らの一連の研究^{2), 3)}以外にはあまりない。前者は、仮想ネットワーク上の新設・改良プロジェクトの最適な整備順序を決定する方法を提案したものであり、解法としてのGAの適用可能性の検討に主眼がある。一方、後者は我が国の長期にわたる高規格幹線道路網の整備プロセスの決定基準と評価方法を検討したものである。そこでは、1)短期動的：順次、プロジェクトが実施されてネットワークが形成されていく各時点、および2)長期動的：ネットワークが全て形成された時点、それぞれで最適な整備プロジェクトを決定する動的決定基準が提案され、これらの決定基準に基づく段階的整備プロセスと、一般的に用いられている3)短期静的：開始時点など、ある一時点における最適なプロジェクトの整備プロセスを決定するという基準による整備プロセスとを、社会経済的効率性や事業者の採算性、地域間の公平性といった複数の視点から比較考察している。その結果、3)と比較して、1)や2)のような動的な決定基準に基づく整備プロセスの方が社会経済的効率性や事業の採算性を大きく改善することができることなどを実証的に明らかにしている。

しかし、これらは高規格幹線道路網のような長期、かつ不確実性を伴うであろうプロジェクトを対象にしているにもかかわらず、各年次の便益をNPVに変換する際の社会的割引率を4.0%に固定するなど、便益の発生原資産となる将来の交通需要や費用などの不確実性については考慮していない。また、段階整備シナリオによってはサンクコストが極めて大きくなるとしても、撤退はできない。

(2) リアルオプションの概要

リアル・オプション・アプローチとは、将来が不確実なときに現時点でプロジェクトに関する意思決定をすべで行うのではなく、将来に意思決定を先延ばしにできる

*キーワード：リアルオプション、プロジェクト評価、LRT化計画

**正員、工博、熊本大学（熊本県熊本市黒髪2-39-1、TEL:096-342-3541、E-mail: smizo@gpo.kumamoto-u.ac.jp）

***正員、博(農)、熊本大学大学院自然科学研究科

****学生員、熊本大学大学院自然科学研究科

こと、つまり将来に事業変更できることなどのオプションに対する価値を評価に組み込むことを可能にする評価手法である。これには金融オプションの理論が用いられており、金融オプションに対して実物資産に対するオプションであることから、リアルオプションと呼ばれる。金融オプションとは、一般的には将来のある時点で株式や金融資産などを事前に決めた価格で売買する権利である。代表的な金融オプションであるコールオプションは、ある株式をある期日に市場価格に関係なく特定の価格で購入できる権利である。例えば、1年後に株式を1,000円で買う権利を考える。もし1年後に市場価格が1,000円よりも上昇すれば、オプションを行使してあらかじめ定められた行使価格である1,000円でその株を購入することができるが、逆に市場価格が1,000円よりも低くなった場合は、オプションを放棄して市場価格で購入することができる。このようなオプションには価値が存在するはずである。ここではこのオプション価値の考え方を社会基盤整備のプロジェクト評価に取り入れる。

将来の原資産、たとえば将来の需要などが不確実な場合、NPV法では、将来のキャッシュフローの期待値を推定し、それを通常よりも大きな割引率で割り引いて現在の価値に戻すという方法をとるのが一般的である。したがって、前述したような将来に事業が変更できるようなマネジメントの柔軟性を評価に組み入れることは容易ではない。しかし、リアル・オプション・アプローチの考え方では、最初から不確実性を前提として便益評価を行う枠組みを構成するため、マネジメントの柔軟性の評価を容易に組み入れることができる。つまり、将来有利な状況になればオプションを行使し、不利な状況になればオプションを放棄するというオプション価値をプロジェクトの評価に加えることができる。リアルオプションによる評価は、不確実な環境のもとで意思決定を行う必要があり、その上、当該プロジェクトが不確実性に応じて将来に事業を変更できる柔軟性を持っている場合に有効である。経済状況によって、輸送需要やそれに基づく社会的便益は変動するから、交通プロジェクトの評価へのリアルオプションの適用は有用であると考えられる。以下では、第1段階整備終了後に拡張事業となる第2段階整備を行うか否かを決定する拡大オプションを考える。

リアルオプションに関する理論的研究としては、赤松・長江^{4),5)}の一連の研究がある。これまでは、金融オプションを前提として発展してきたオプション理論であるが、彼らは社会基盤投資や運用事業をリアルオプションと見なし、それらの評価や整備プロセス決定問題を統一的に数学的に変分不等式で記述すると同時に、効率的な解法を開発した。さらに、この方法を任意の連鎖的な権利行使構造を持った複合リアルオプション問題に拡張している。しかし、高橋ら⁶⁾も述べているように、現実

の事業価値評価や整備プロジェクトの決定などに適用した実例や、その適用可能性や有用性などを考察した実証研究は、国内にはほとんど見出せない。

本研究で鉄道路線についての実証研究の例として参照したのは、手塚⁷⁾とBowe & Lee⁸⁾による研究である。前者では、将来の利用需要が不確実である場合、整備新幹線に比してサンクコストの小さいフリーゲージトレインの導入と撤退といったオプションを想定し、仮想的な設定シナリオのもと、数値例によってこの投資の価値の算出を行い、鉄道へのリアル・オプション・アプローチの適用可能性について考察を行っている。一方、後者は、台湾新幹線THSR (Taiwan High-Speed Rail) のような大規模で包括的、かつ現実のプロジェクトの価値評価にリアルオプションを適用した最初の実証研究であろう。ここでは、複数オプションの組合せによる事業価値評価がなされており、NPV法による評価がそのプロジェクトの価値を過小に推計するだけでなく、将来の不確実性の視点から意思決定を変更する柔軟性をも考慮した価値評価法が現実のプロジェクトの実行可能性を正当化するのに必要であったことが紹介されるなど、現実の事業評価の決定に対するリアル・オプション・アプローチの適用可能性について検討されている。

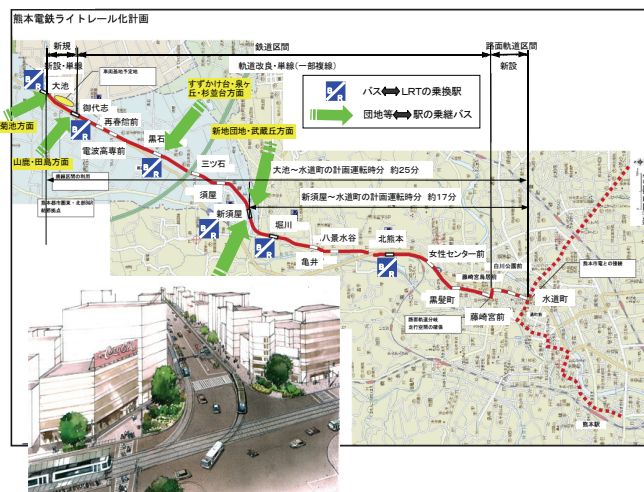
3. LRT化計画の需要予測と社会的便益額の推計

(1) 熊本電鉄の現状とLRT化計画案の概要

LRT化計画のある熊本電鉄藤崎宮線は、熊本市とその北部で隣接する合志市とを結ぶ、総延長9.7km、駅数13、軌道は単線・狭軌の民営鉄道である。サービス水準は、表定速度が22.4km/h、最小運行間隔は15分であり、離合可能な駅が3駅しかないことから、現行ではこれ以上の頻度を提供することは不可能である。さらに、都心側終点の藤崎宮前駅の終発は20時台である。また、藤崎宮前駅は市電路線がある通町筋まで約1kmの距離を残しているため、利用者にとって都心部へのアクセス性、市電やバスへの乗換えの利便性が極めて低い。以上のように、熊本電鉄は現在の機材や施設のままで飛躍的なサービス改善は困難である。今後、人口減少やモータリゼーションがさらに進めば、経営はさらに逼迫した状況になり、鉄道事業そのものを維持できなくなる恐れもある。一方で、熊本電鉄沿線の人口は市電沿線の人口と同程度であるなど、熊本電鉄沿線の潜在的利用者数は決して低いわけではない。本LRT化計画によってサービス水準を改善し、利便性を高めて利用需要を増やし、経営を健全化させる可能性は高いと考えられる。

公表されたLRT化計画案(図-1参照)の特徴を以下に示す。

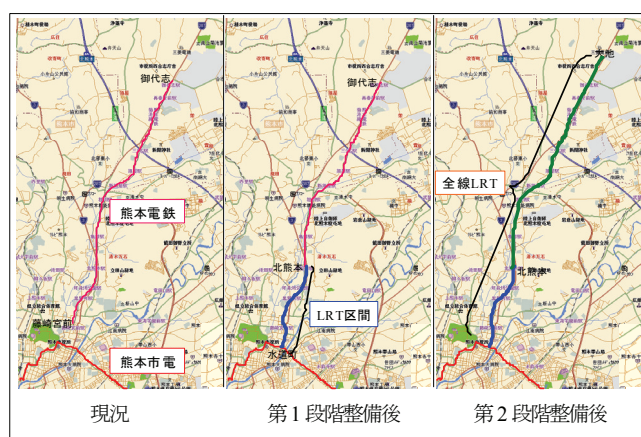
1) 路線延伸による都心部市電路線への乗入れ：現在終点



図－１ 熊本電鉄のLRT化計画案

表－１ 熊本電鉄の現況とLRT化計画案のサービス水準

	現況	LRT化計画案
運転区間	藤崎宮前～御代志 9.7km	水道町～大池 約12km
軌間	1067mm	1435mm
駅数	藤崎宮前～御代志 13 駅	水道町～大池 17 駅 (水道町, 白川公園, 女性センター, 大池を新設)
ホーム高	1100mm	350mm
車両数	2 両 6 編成, 単車 6 両	LRT 車両 12 編成
最高速度	50km/h	70km/h (路面区間)は 40km/h
営業時間	始発 6:51, 終発 20:25 営業時間 14 時間 30 分	始発 5 時台, 終発 23 時台 営業時間 約 19 時間程度
運転本数	御代志～藤崎宮前間 平日上下 81 本	水道町～大池間 平日上下 200 本程度
所要時間	御代志～藤崎宮前間約 25 分	御代志～藤崎宮前間約 17 分 大池～水道町間約 26 分
市内乗入れバス本数	上下 597 本	上下 288 本



図－２ 段階整備計画案

の藤崎宮前駅から水道町電停までの約 1km 軌道を延伸し、都心部まで乗り入れる。全線を標準軌にして熊本市電と結節し、新幹線開業後の熊本駅まで直通運転を行う。

2) LRT 化による運行サービスの高速・高頻度化：システ

ムの LRT 化、軌道の部分的複線化などにより、郊外部の専用軌道においては最高速度 70km/h で走行可能となる。これにより、現在の始・終点である御代志駅～藤崎宮前駅の所要時間は、現行の 25 分から約 17 分となる。運行時間帯は、現行では始発が 6 時台、終発が 21 時台であるが、計画案ではそれぞれ 5 時台、翌 0 時台と大幅に延長される。

3) 並行バス路線の整理と主要乗り継ぎ駅へのフィーダー路線化などのバス路線再編：効率的運行とバスサービスの高頻度化を実現するため、現行では鉄道と並行して都心部へ乗り入れている熊本電鉄のバス路線を整理し、LRT の主要駅を結節点とするフィーダーバス路線網へ再編する。それに伴い、郊外主要駅でのバスと LRT 間の乗換施設を整備する。料金体系はバスと LRT とも現在のバスと熊本電鉄線と同じとするが、両者を乗り継ぐ場合は、乗り継いだ手段の初乗り運賃を払うことなく、通しの料金とする。

現況のサービス水準と比較したものが表－１であるが、LRT化によってサービス水準は飛躍的に向上する。

（２） 熊本電鉄LRT化における段階整備計画

本計画案については、平成 16 年度に需要予測と費用対効果分析が行われ、B/C は 4.18 となり社会経済的に見て効率的な事業であるという成果が報告されている。しかし、建設費用が 100 億円以上と見込まれていることや、熊本電鉄単独での実施は不可能で公的支援が必要であること、LRT 化後の利用需要の不確実性が大いことなどから、図－２に示すように、本 LRT 化プロジェクトを２段階に分けて整備していく案が検討されている。第 1 段階整備では、藤崎宮前駅から都心部への路線延伸と北熊本駅までの LRT 化を行って市電区間に乗り入れ、北熊本駅から熊本駅までの直通運転を行う。北熊本駅では既存の熊本電鉄と LRT が同一ホームで乗り換えが可能である。整備後は総合女性センター前、白川公園の 2 箇所に新たに駅を整備する。第 2 段階整備では、現在の北側の終点である御代志駅から大池まで北部方面へ約 2.5km 延伸し、第 1 段階整備では LRT 化されていない北熊本駅から北側区間の LRT 化を行う。整備後の新設駅は御代志より北部の大池駅である。

（３） 将来の社会的便益額の予測

a) 交通需要の予測

原資産の価値とした将来の社会的便益額を推計するために、熊本電鉄の将来の利用需要の予測を行う。予測のフローを図－３に示す。需要予測の方法は、非集計方手段選択モデルと数え上げ法による集計化分担交通量の予測、および自動車利用 OD の道路網への均衡配分と公共交通 OD の確率配分とを組み合わせたヒューリスティック

な分担需要変動型統合均衡モデルである。予測プロセスの詳細は文献 9)に譲る。交通需要の予測は、現況の熊本電鉄、市電、JR とすべてのバス事業者が設定した路線網から構成されるネットワークに加えて、前述した第 1 段階整備後と第 2 段階整備後のネットワークの 3 ケースについて行っている。なお、バス路線網は第 1 段階整備時にはすべてフィーダー路線網に再編されるものとする。

公共交通機関分担需要を集計した結果、自動車から公共交通機関への転換トリップ数は、第 1 段階整備後で 300 トリップ/日、第 2 段階整備まで行くとさらに 100 トリップ/日、合計で 400 トリップ/日が見込まれる。本来なら、公共交通機関利用 OD 交通量は、他手段からの転換交通量により毎年、変化していくが、ここでは簡単のため、第 1 段階整備後と第 2 段階整備後の 2 時点で予測したものを用いている。得られた公共交通機関利用 OD を上記の 3 ケースのネットワークに配分し、公共交通の路線別の利用需要を求める。

各ネットワークに配分した結果を図-4に示す。現況利用者は約 3,700 人/日であるが、第 1 段階整備後では北熊本～御代志間の熊本電鉄藤崎線の需要は約 3,900 人/日、熊本駅～北熊本間の LRT 区間の需要は約 18,300 人/日となり、全区間では約 22,200 人/日になると予測された。さらに、第 2 段階整備後には、全線が LRT となる熊本駅～大池間の需要は約 24,000 人/日になると予測される。

b) 各段階整備後の便益の推計

需要予測の結果をもとに、原資産の価値となる将来の社会的便益額を算出する。計測する便益項目は利用者便益、供給者便益、環境等改善便益である。利用者便益とは、現況と比較して各整備後の公共交通機関利用者の一般化費用が変化することによって生じる便益である。供給者便益は現況と各整備後の事業者の利益の差額である。環境等改善便益は、LRT 化後の手段転換によって自動車交通需要が減少して道路交通混雑が緩和することによって生じる環境等改善効果を貨幣換算した便益である。この環境等改善便益は、自動車利用 OD 交通量を道路ネットワークに均衡配分し、得られたリンク交通量と旅行速度の予測値を用いて所要時間削減便益、走行費用減少便益、 $\text{NO}_x \cdot \text{CO}_2$ 排出量減少便益、交通事故損失額減少便益を求め、これらを合計したものである。

第 1 段階整備後、および第 2 段階整備後の社会的便益額の推計結果を表-2に示す。利用者便益については、両整備とも時間短縮効果が大い。第 2 段階整備によって北熊本駅での従来システムからの乗り継ぎの必要がなくなるために大きな時間短縮効果が生じ、第 1 段階整備の 2 倍以上の時間短縮効果が生じている。供給者便益については、現況の利益が実績値から年間で 0.90 億円であるのに対して、第 1 段階整備後は 0.67 億円、第 2 段階整備後は 2.56 億円の利益が生じる。これより、現況の利益

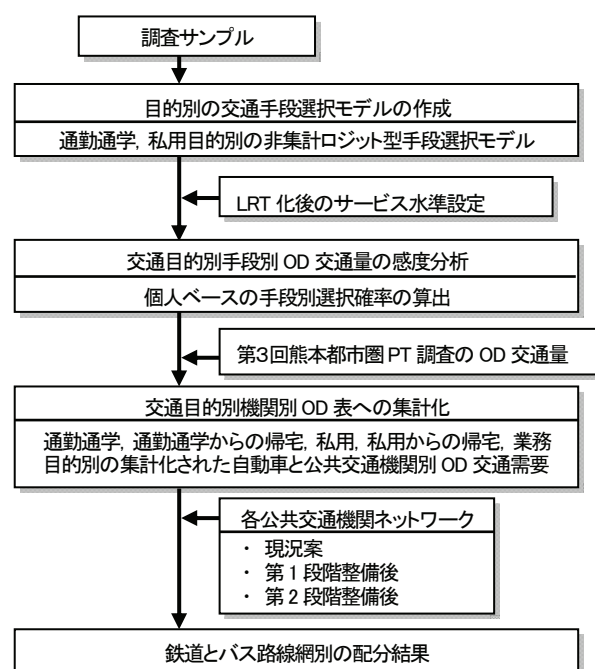


図-3 交通需要予測のフロー

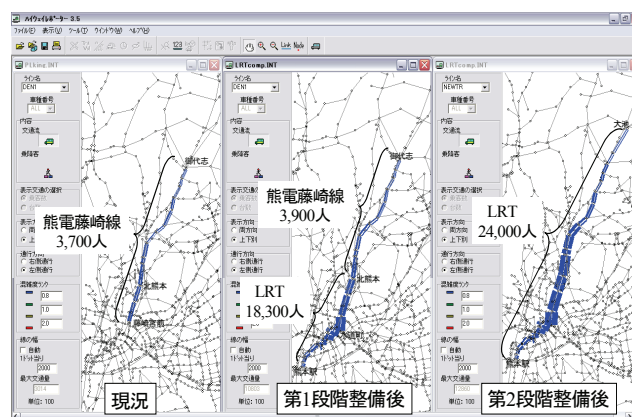


図-4 駅間利用需要の推移

表-2 各種便益額の推計結果

	第1段階整備後	第2段階整備後
利用者便益	12.01	25.47
供給者便益	-0.23	1.66
環境等改善便益	0.56	1.80
合計	12.34	28.93

注) 単位: 億円/年

との差で求められる供給者便益はそれぞれ -0.23 億円、1.66 億円となり、第 1 段階整備後の収入は現況を下回る。これは LRT 区間の大半が市電区間を走行することになり、ここでは LRT による収入の約半分を市交通局に計上したためである。バス部門についても、フィーダーバス路線網に再編したために、熊本電鉄に並行する路線が減少し、利用者が減少して収入が減少する。第 2 段階整備後は収入が現況より 0.79 億円増加し、支出は 0.87 億円減少する。これは、利用者数が増加する上、LRT が全線で運行されるためフィーダーバス路線によって、効率

的な運行が可能になったことを示している。環境等改善
 便益については、合計で第1段階整備後では0.56億円、
 第2段階整備後では1.80億円となり、第2段階整備後
 には第1段階整備後の3倍以上の環境改善の効果が得られ
 るという結果になった。ここでは、供給者便益は熊本電
 鉄の鉄道部門とバス部門だけを計上している。なぜなら、
 市電や他社バス部門はサービスを行っている地域が異な
 っているため、それらの供給者便益は熊本電鉄のそれに
 比べてかなり小さいと考えられるからである。一方、
 LRTへの手段転換により、道路交通混雑が改善されるこ
 とによって発生する環境等改善便益は、熊本都市圏全体
 に波及すると考えられることから、便益として計上した。

すべての便益を合計すると、第1段階整備後では
 14.23億円/年、第2段階まで整備されると28.93億円/年
 の便益が発生すると予測される。

4. リアルオプションによるプロジェクト評価

推計された社会的便益額を用いて本LRT化プロジェ
 クトの評価を行う。ここでは、まず、(1)本LRT化プロ
 ジェクトの一括整備計画、(2)前述した段階整備を独立の
 事業として行う独立型段階整備計画を現在価値法によ
 って評価する。次に、(3)リアルオプション・アプローチを
 用いて拡大オプション型段階整備計画を評価し、それぞ
 れの整備計画の評価結果を比較する。プロジェクト評価
 に必要な設定条件を表-3に示す。

ここでは、プロジェクトの段階整備にオプション価値
 を考慮した場合の評価値の違いを比較検討することが主
 要な課題である。そこで、オプションの価値が意思決定
 に影響を及ぼすような状況を再現するために、社会的割
 引率をやや高めの15%とした。不確実性の高い途上国
 における社会基盤整備や民間企業内の開発プロジェクト
 では、15%の社会的割引率を用いてオプション評価を行
 っている例もあり、現実的にあり得ない数値ではないと

考えられる。

以下で(1)～(3)の評価方法を解説する。

(1) 一括整備計画の評価

一括整備を行う場合を基本ケースとし、NPV法を用い
 てその評価を行う。以下に設定した条件を示す。ここ
 では、現時点(T=0年)でプロジェクトを計画し、整備期
 間は3年間とする。投資費用は、調査設計費として3.72億
 円、延伸と改軌工事等の軌道整備に61.41億円、車庫新設
 と車両購入費とで56.01億円が投入される予定である。ま
 た、20年後(T=20年)にLRTの運営、路線の維持補修な
 どの費用として0.30億円が計上される予定である。毎年
 発生する便益額は第2段階整備後の便益(=28.93億円)
 であり、便益の発生期間は整備完了後のT=4年目以降の
 30年間とする。一括整備と段階整備の投資費用が異なる
 のは、段階整備では追加投資として必要となる仮車庫新
 設の費用を追加しているためである。

以上の設定条件のもとで得られるプロジェクトの状況
 を表-4に示す。算出された総便益額、総投資額の現在
 価値は、それぞれ124.9億円、121.2億円となり、NPVは
 3.7億円となった。費用便益比は1.03となり、平成16年度
 の研究結果の4.18と比べると約4分の1となっている。こ
 れは、NPV法でLRT化プロジェクトの不確実性を考慮す
 るために、通常は4.0%程度にする社会的割引率を15.0%

表-3 プロジェクト評価における設定条件

	一括整備	段階整備	
		第1段階	第2段階
整備期間	3年	2年	1年
投資費用	121.14億円	62.32億円	64.01億円
毎年発生する便益額	28.93億円	12.34億円	16.59億円
便益の発生期間	30年間		
社会的割引率	15%		
ボラティリティ	—	20%	
安全資産利子率	—	1.6%	

注) ボラティリティ、安全資産利子率は拡大オプション型段階整備
 計画のみに係わる条件

表-4 一括整備を行う際のプロジェクトの状況(単位: 億円)

評価時点(T=0)を基準とした年次	0年目	1年目	2年目	3年目	4年目	5年目	6年目	...	20年目	...
プロジェクトの状況	判断	整備	整備	整備	供用	供用	供用	...	供用	...
各年に得られる便益額	0	0	0	0	28.93	28.93	28.93	...	28.93	...
投資費用	121.14	0	0	0	0	0	0	...	0.30	...

注) 年目の数字は評価時点(T=0)を基準とした年次を示す。

表-5 段階整備を行う際のプロジェクトの状況(単位: 億円)

第1段階整備	0年目	1年目	2年目	3年目	4年目	5年目	6年目	...	20年目	...
プロジェクトの状況	判断	整備	整備	供用	供用	供用	供用	...	供用	...
各年に得られる便益額	0	0	0	12.34	12.34	12.34	12.34	...	12.34	...
投資費用	62.25	0	0	0	0	0	0	...	0.07	...
第2段階整備	0年目	1年目	2年目	3年目	4年目	5年目	6年目	...	20年目	...
プロジェクトの状況					判断	整備	供用	...	供用	...
各年に得られる便益額	0	0	0	0	0	0	16.59	...	16.59	...
投資費用	0	0	0	0	63.78	0	0	...	0.23	...

に設定したためである。

(2) 独立型段階整備計画の評価

独立型段階整備とは、各段階整備を互いに独立した 2 つの事業とみなし、不確実性を考慮せずに現時点ですべての意思決定を行うものである。このとき、第 1 段階整備の便益は第 1 段階整備が終わってから 30 年、第 2 段階整備の便益は第 2 段階整備が終わってから 30 年発生するとしている。

独立型段階整備のプロジェクトの状況を表-5 に示す。独立型段階整備では、第 1 段階整備事業と第 2 段階整備事業をそれぞれ独立した事業として評価を行うことから、事業全体の NPV は NPV 法で算出される段階整備ごとの NPV の和として求められる。まず、第 1 段階整備による総便益額と総投資額の現在価値は、それぞれ 61.27 億円、62.25 億円となり、第 1 段階整備の NPV は-1.0 億円となった。第 2 段階整備による総便益額と総投資額の現在価値は、それぞれ 54.16 億円、63.79 億円となり、NPV は-9.6 億円となった。事業全体の NPV は両者の和の-10.6 億円となり、独立型段階整備は社会的に効率的ではないという結果になる。

以上の検討では、一括整備計画を行った方が良いということになるが、建設費の絶対額が非常に大きいために、建設費を分散できる段階整備が望まれている。次項ではオプションを考慮した段階整備計画の評価を行う。

(3) 拡大オプション型段階整備計画の評価

オプションには、延期や中断等、様々なものが考えられる。ここでは本プロジェクトに最も適していると思われる拡大オプションを考慮した段階整備について評価を行う。原資産は将来の社会的便益額とする。独立型段階整備方式では、現時点で第 2 段階整備まで行う意思決定をしてしまうことから、たとえリスク調整済みの社会的割引率を用いたとしてもリスク構造は将来も変化しないが、拡大オプション型では第 2 段階整備を行うかどうかは第 2 段階整備を行う前に意思決定できるという柔軟性を持っているという違いがある。

拡大オプション型でも各段階整備にかかる期間や投資額、整備後の便益は独立型と同じ値に設定した。ただし、拡大オプション型では、便益の現在価値が不確実性（ボラティリティ）により 1 年ごとに変動すると考えるので、ボラティリティと安全資産利率を条件に加える必要がある。ボラティリティについては、まず、熊本電鉄の 1965 年から 2004 年までの収入を S_t としたときの $\ln(S_{t+1}/S_t)$ の標準偏差であるヒストリカル・ボラティリティを求める。これによって算出された値は 8.6% であった。次にこの値を用いてインプライド・ボラティリティを予測する。しかし、モータリゼーションの進展や

少子高齢化社会など、地方鉄道を取り巻く状況には不確実な要因が多数存在するため、この値を予測するのは困難である。そこで、今回は得られた値より大きい 20% と仮定した。安全資産利率はオプション価値算定のための割引率として用いるが、その値は 10 年ものの日本国債の利回りである 1.6% とした。

第 1 段階整備については、オプションを考慮しないため、前項と同じ NPV (= -1.0 億円) となる。第 2 段階整備では拡大オプションを考慮し、Cox, Ross, Rubinstein の 2 項モデル¹⁰⁾を用いてオプションの価値を含むプロジェクト価値を求め、両者を足し合わせて事業全体の NPV を求める。

ここで、2 項モデルについて解説する。2 項モデルでは、Step-1：便益がボラティリティによりどのように変化するかを離散的（ここでは 1 年ごと）に、順次便益を推計して将来時点の便益を求める。

Step-2：求められた各ケースの便益から投資費用を引くことで将来時点のプロジェクトの価値を求める。

Step-3：そこから後戻り計算をしてプロジェクトの現在の価値を求めるという方法である。

以下に各ステップの詳細を解説する。Step-1 における便益の変化量は上昇率 u と下落率 d によって決まり、ボラティリティを σ とした場合、それぞれ $u = e^{\sigma}$ 、 $d = e^{-\sigma}$ となる。ここで、初期値（0 年目の便益）として与えられるのは便益の現在価値であり、これに上昇率、下落率をそれぞれ掛けて、次の時点で便益が上昇したときと下落したときの便益を算出する。この計算をオプション行使時点まで繰り返し行い、便益の変動を調べる。Step-2 では、Step-1 で算出したオプション行使時点での各ケースの便益からオプション行使時点での投資費用を引き、プロジェクトの価値を求める。このとき、便益より投資費用の方が大きいケースでは、プロジェクトの中止を決定するため、プロジェクトの価値は 0 となる。Step-3 では、各ケースのプロジェクトの価値をリスク中立確率で期待値を取り、安全資産利率で割り引いて、前の時点でのプロジェクトの価値へと戻す後戻り計算をする。これを現時点まで繰り返し行い、プロジェクトの現在価値を求める。

以下では、本プロジェクトの設定条件を用いて、上記の実際の計算手順を説明する。

Step-1：本プロジェクトの場合、ボラティリティは 20% としているため、上記の式に $\sigma = 0.2$ を代入すると上昇率、下落率はそれぞれ 1.22、0.82 となる。0 年目での便益は前項で算出された第 2 段階整備後の便益の現在価値 (= 54.2 億円) であり、1 年目で価値が上昇した場合は 66.1 億円 (= 54.2 億円 (0 年目の便益) $\times$ 1.22)、価値が下落した場合は 44.3 億円 (= 54.2 億円 (0 年目での価値) $\times$ 0.82) と計算される。この方法で第 2 段階整備開始年

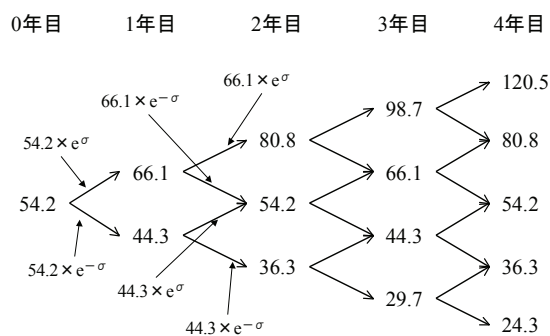


図-6 イベントツリー

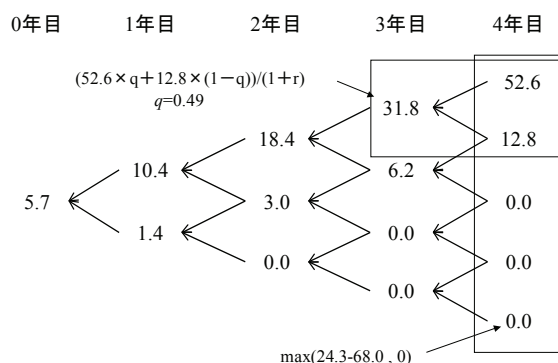


図-7 第2段階整備後のNPV算定ツリー

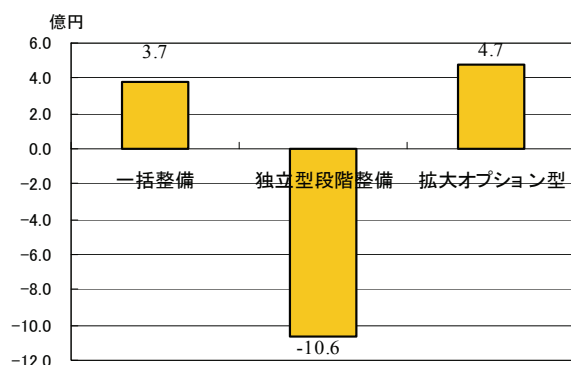


図-8 ケース別NPV推計結果

度である4年目まで1年ごとに便益の変動を算出したものを図-6に示す。

Step-2: その後、第2段階整備を開始する4年目の便益として算定された各ケースの値から第2段階整備に必要な費用の4年目での価値68.0億円(= $63.79 \times (1 + 0.016)^4$)を差し引いた値が、4年目でのプロジェクトの価値として与えられる。この時点で、便益よりも費用が大きくなる場合は、事業を放棄するため、プロジェクトの価値は0となる。

Step-3: このようにして求められた4年目での価値をリスク中立確率と安全資産利子率を用いて1年ごとに遡り、現時点でのプロジェクト価値に逆算する(図-7参照)。リスク中立確率とは、1時点後の原資産価格の期待収益率が安全資産利子率に等しくなるように算出される仮想的な値である。価値が上昇するときのリスク中立確率 q

$$\text{は、 } q = \frac{1+r-d}{u-d} = \frac{1+0.016-0.82}{1.22-0.82} = 0.49, \text{ 下落する}$$

ときのリスク中立確率は $1-q = 1-0.49 = 0.51$ となる。

ここで、 r は安全資産利子率である。算出したリスク中立確率を用いて期待値を取り、安全資産利子率で割り引くことで前年のプロジェクト価値を求める。この計算を0年目まで繰り返し行うことで現時点のプロジェクト価値を計算する。算出された第2段階整備のNPVは5.7億円となった。

以上より、全体事業のNPVは4.7億円となる。第1段階整備までのプロジェクトの価値はマイナスになってしまうが、オプションを含んだ第2段階整備まで考慮するとNPVはプラスに転じるため、プロジェクトを採用するのは効率的であるという結果になった。

(4) 各評価手法の比較

各ケースのNPV推計結果をまとめたものを図-8に示す。独立型段階整備の場合にはNPVは-10.6億円と負になるのに対して、拡大オプションの価値を考慮した段階整備の場合は4.7億円になる。また、一括整備計画と比較しても拡大オプション型のNPVは1.0億円だけ高く算出されている。以下に、この理由を考察する。

独立型段階整備よりも一括整備のNPVが大きくなったのには2つの理由がある。第一の理由は、第2段階整備による便益発生年次は一括整備に比べて遅くなるため、便益の割引率が大きくなり、総便益が低く算出されたためである。第二の理由は、段階整備では追加投資額が加算されるため、総投資費用が一括整備よりも高くなったためである。

独立型段階整備で、第1、第2段階ともNPVが負になった理由は以下の2つである。1つは、第1段階整備による便益額(12.34億円/年)がそれほど大きくないために、現在価値化された便益が投資費用を上回らなかったためである。他の1つは、第2段階整備の便益額は第1段階整備よりも大きいものの、その発生年次が遅れるために割り引かれる率が大きく、便益を現在価値に戻した場合、投資費用を上回る額にならなかったためである。これに対して、拡大オプション型では、将来の不確実性を考慮するために、第2段階整備時の便益に変動を持たせている。そのため、第2段階整備開始時(4年目)に便益額が投資費用を上回るケースが出現する。さらに、第2段階整備開始時(4年目)の便益よりも投資費用が大きくなる場合は、整備を実施しないこと(4年目時点のNPVはゼロ)を選択できるため、第2段階整備のNPVは正值となる。ちなみに、4年目時点のNPVがマイナスのまま現在価値に戻すと独立型の第2段階整備のNPVが算出されることから、第2段階整備開始時点に

において NPV が負にならない場合は、拡大オプション型と独立型の NPV は等しくなる。

今回のケースでは、同じ段階整備であっても独立型と拡大オプション型とで NPV の正負が逆転したが、常にならざるを得ない。同様に、一括整備の方が拡大オプション型よりも NPV が常に小さくなるというわけではない。これらの結果は、社会的割引率とボラティリティの値に密に関係しており、実際の評価の際には吟味された値を設定する必要がある。

5. NPVとオプション価値の感度分析

ここでは、4. で基本的条件として設定した種々の変数が各ケースのNPVやオプション価値に及ぼす影響を調べるため、感度分析を行う。以下では、便益、投資費用、社会的割引率、ボラティリティ、安全資産利率の5項目について、数値的な感度分析を行った。また、社会的割引率、ボラティリティ、安全資産利率については、NPVに対する弾力性値についても考察する。

(1) 感度分析

a) 便益に対する感度

通常、便益の変動に対する感度を見る場合には、需要の変化から便益を求め直して感度分析を行うのが良い。しかし、今回は各期に発生する便益の期待値がNPVに与える影響を調べるため、ここでは単純に便益だけを変化させた。便益については、基準の便益より10%少ない場合と10%大きい場合について感度分析を行った。便益を変動させたときのNPVの変化を図-9に示す。便益の期待値が増加することによって便益の現在価値も大きくなるため、どのケースでもNPVは増加する。しかし、増加率には違いが見られ、拡大オプション型が最も小さくなっている。そのため、便益が小さい場合には一括整備より拡大オプション型の方がNPVは大きいものの、便益が増加すると一括整備の方が拡大オプション型よりNPVは大きくなる。

b) 投資費用に対する感度

投資費用についても基準の額より10%少ない場合と10%大きい場合について感度を調べた。投資費用を変動させたときのNPVの変化を図-10に示す。便益の現在価値は変化せずに費用だけ増減するため、投資費用が増加するとNPVはどのケースでも減少する。しかし、便益の変動と同様に減少率には違いがあり、拡大オプション型の減少率が最も小さくなっている。そのため、投資費用が大きくなれば一括整備よりも拡大オプション型の方がNPVは大きくなる。

c) 社会的割引率に対する感度

社会的割引率を変動させると便益の現在価値が大きく

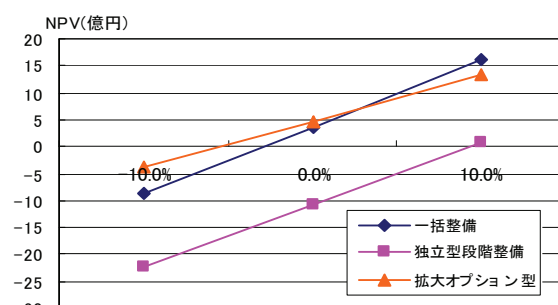


図-9 便益の変動によるNPVの変化

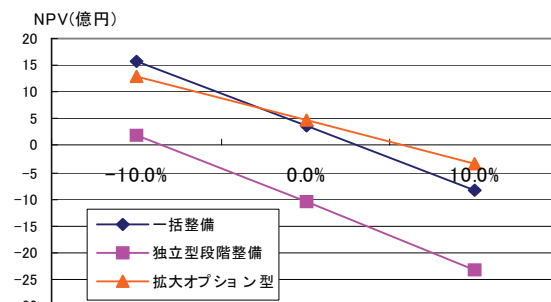


図-10 投資費用の変動によるNPVの変化

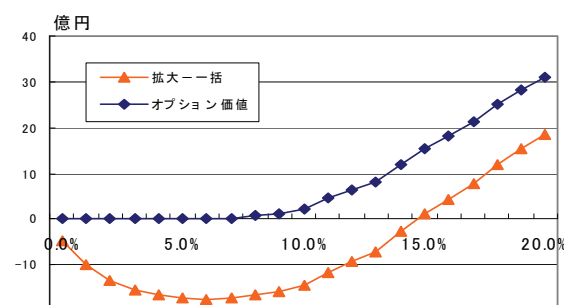


図-11 社会的割引率によるオプション価値の変化

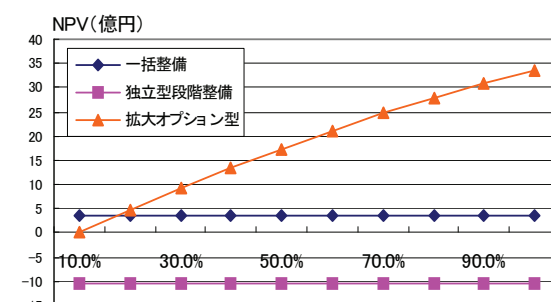


図-12 ボラティリティの変動によるNPVの変化

変わるため、NPVも大きく変化する。NPVの絶対額のスケールに比べて各計画案の差は非常に小さいため、NPVそのものの比較は難しい。そこで、一括整備については拡大オプション型とのNPVの差(拡大一括)の変動を、オプション価値の変動と併せて考察する。ここでは、社会的割引率を通常考えられる範囲である0%から20%まで1%ずつ変化させた。その結果を図-11に示す。オプション価値は、社会的割引率が6%までは0となった。これは、6%までは独立型段階整備も拡大オプション型もNPVが等しいことを示す。オプション価値は第2段階目

の整備が放棄される可能性を持つときに大きくなることから、社会的割引率が6%を超えると将来の便益が拡大のための投資費用を下回るケースが発生し、それにつれてオプション価値が増加していくためである。

次に、拡大オプション型と一括整備のNPVの差について考察する。オプション価値が発生する8%あたりまでは一括整備の減少率の方が拡大オプション型よりも小さいため、両者のNPVの差は減少していく。しかし、それより社会的割引率が大きくなると、拡大オプションの価値が増加していくため、NPVの差の値も増加していく。そして社会的割引率が15%あたりで、拡大オプション型のNPVが一括整備のそれより大きくなる。

d) ボラティリティに対する感度

ボラティリティの値を設定することは容易ではないため、ここでは10%から100%までの間を10%ずつ変動させてNPVの変化を考察する。その結果を図-12に示す。ボラティリティは、拡大オプション型段階整備計画を評価する際、1年ごとの便益の変動に影響を与える変数であり、他の評価法によるNPVには影響を与えない。ボラティリティが変動すると、便益の上昇率 u と下落率 d が変わり、 u と d の変数であるリスク中立確率も変わる。ボラティリティが大きい程、上昇率、下落率共に大きくなり、第2段階整備を行う4年目での便益の値の下限と上限の幅が広がる。そのため、便益が投資費用より小さくなるケースが増え、便益の動向が悪くなったときには第2段階整備を放棄できる拡大オプションの価値は高くなる。また、便益の動向が良くなる場合には4年目での値はかなり上昇しているため、拡大オプション型のNPVは大きくなる。これより、ボラティリティが大きくなる程、拡大オプション型のNPVは大きくなり、ボラティリティが20%を超えると一括整備のNPVを上回る。

e) 安全資産利子率に対する感度

安全資産利子率は第2段階整備後のNPV算定のための割引率として用いるため、ボラティリティと同じく拡大オプション型以外の評価法によるNPVには影響を与えない。安全資産利子率を0%から6%まで0.5%ずつ変動させたときのNPVの変化を図-13に示す。安全資産利子率の変動がNPVに与える影響は他の変数を与える影響に比べると小さい。しかし、安全資産利子率が大きくなるに従って拡大オプション型のNPVは減少し、4.8%を超えると一括整備よりも小さくなる。

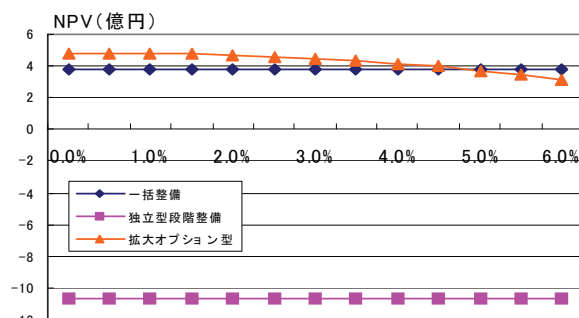


図-13 安全資産利子率の変動によるNPVの変化

(2) 弾力性分析

次に拡大オプション型段階整備計画のNPVの弾力性について考察する。各変数の変化率に対するNPVの変化率 $\frac{\Delta NPV}{NPV} / \frac{\Delta p}{p}$ を弾力性とする。 p は分析対象の各変数である。ここでは、標準として定めた各変数の値（社会的割引率：15%、ボラティリティ：20%、安全資産利子率：1.6%）からそれぞれ1%増加させたときに、NPVが何%変化するかを計算した。表-6にその結果を示す。社会的割引率に対する弾力性値が-23.59と、他の2つと比較して大きくなっていることから、社会的割引率がNPVに与える影響は大きいことがわかる。また、ボラティリティについても弾力性値が1.0を超えているため、弾力的であるといえる。社会的割引率と安全資産利子率については変化率の符号がマイナスであるため、この2変数の値が大きくなるとNPVは小さくなる。逆にボラティリティが大きくなるとNPVも大きくなる。

6. おわりに

本研究では、リアル・オプション・アプローチによる便益評価手法を用いて、熊本電鉄LRT化プロジェクトの段階整備の評価を行い、従来のプロジェクト評価手法である現在価値法による評価との比較を行った。従来、社会基盤整備にリアルオプション評価を適用した実証研究例は少なく、種々の設定変数が評価値NPVに与える影響を分析するために感度についても分析した。以下に得られた結果を列挙する。

1) 熊本電鉄の鉄道部門のLRT化、バス路線網のフィーダー化によって、これまでの6倍以上の利用者数が見込

表-6 NPVの弾力性

	社会的割引率	ボラティリティ	安全資産利子率
1%増加時のNPV (各変数の値)	3.62 億円 (15.15%)	4.83 億円 (20.2%)	4.74 億円 (1.616%)
変化量 (ΔNPV)	-1.12 億円	0.09 億円	0.00 億円
変化率 ($\Delta NPV / NPV$)	-23.59%	1.97%	-0.03%
弾力性値	-23.59	1.97	-0.03

注) 標準のNPVは4.74 億円である。

まれる。

- 2) 社会基盤整備プロジェクトに対する段階的整備計画を行う際は、拡大などのオプションを考慮した方がプロジェクトの価値は高まる可能性があるといえる。
- 3) 便益が小さいとか投資費用が大きいなど、プロジェクトに不利な状況が多く、社会的割引率やボラティリティが大きいほど、オプションの効果が表れる。
- 4) 中でも社会的割引率とボラティリティの与える影響は特に大きい。

以上より、リアル・オプション・アプローチは、拡大や中止といった、意思決定を変更する柔軟性をも価値として評価に導入した方が良いと考えられるような不確実な要素の多い大規模整備プロジェクトの場合には、有用な評価方法の一つとなりうるであろう。

また、本手法を適用する際の課題を以下に挙げる。

- 1) 原資産の価値として用いた社会的便益は実際に運用できる資金ではないため、リアルオプション・アプローチにそのまま用いるのには適切でないかもしれない。収支額など、その他の指標を原資産とする場合にも適用して、社会基盤整備プロセスの評価へのリアル・オプション・アプローチの有効性を総合的に検証することも必要であろう。
- 2) ボラティリティは重要なパラメーターであると同時にその設定は非常に困難である。適切なボラティリティの値を推定する理論的・実証的方法を見出す必要がある。

参考文献

- 1) 田村 亨, 杉本博之, 上前孝之: 遺伝的アルゴリズムの道路整備順位決定問題への適用, 土木学会論文集, No.428, pp.37-46, 1994.
- 2) 青山吉隆, 松中亮治, 野村友哉: 大規模高速道路ネットワークの段階的整備プロセスの最適化手法とその応用, 運輸政策研究, Vol.5, No.2, pp.2-13, 2002.
- 3) 松中亮治, 谷口 守, 青山吉隆, 舛岡田渡史: 高規格幹線道路網整備計画における段階的整備プロセスの評価, 土木学会論文集, No.793, pp.13-25, 2005.
- 4) 赤松 隆, 長江剛志: 不確実性下での社会基盤投資・運用問題に対する変分不等式アプローチ, 土木学会論文集, No.765, pp.155-171, 2004.
- 5) 長江剛志, 赤松 隆: 連鎖的な意思決定構造を持つプロジェクトの動学的評価法: オプション・グラフ・モデルとその解法, 土木学会論文集, No.772, pp.185-202, 2004.
- 6) 高橋宏直, 吉田二郎, 山本幸司: 社会資本の段階整備計画へのリアルオプション適用に関する研究, 運輸政策研究, Vol.8, No.3, pp.25-32, 2005.
- 7) 手塚広一郎: 不確実性下の意思決定ーリアル・オプション・アプローチと鉄道分野への適用可能性, 国土交通政策研究, 第15号, pp.1-33, 2002.
- 8) Bowe, M. and Lee, D. L.: Project evaluation in the presence of multiple embedded real options: evidence from the Taiwan high-Speed Rail Project, Journal of Asian Economics, 15, pp.71-98, 2004.
- 9) 溝上章志, 橋内次郎, 斎藤雄二郎: 熊本電鉄の都心乗り入れとLRT化計画案実施に伴う利用需要予測, および費用対効果の実証分析, 土木学会論文集 D, Vol.63, No.1, pp.1-13, 2007.
- 10) Trigeorgis, L. A: Log-Transformed Binomial Numerical Analysis Method for Valuing Complex Multi-Option Investments, Journal of Financial and Quantitative analysis, Vol.26, pp.309-326, 1991.
- 1) 田村 亨, 杉本博之, 上前孝之: 遺伝的アルゴリズムの道路整備順位決定問題への適用, 土木学会論文集,

熊本電鉄LRT化プロジェクトに対する拡大オプション型段階整備計画の評価**

溝上章志**・藤見俊夫***・平野俊彦****

費用便益分析において便益額の算定に用いられている現在価値法では、将来需要の不確実性による予測便益額の不確実性を考慮に入れた適切なプロジェクト評価はできない。本研究では、リアルオプション・アプローチを用いて、熊本電鉄LRT化プロジェクトの拡大オプション型段階整備の評価を行い、従来の現在価値法による評価結果と比較した。その結果、本手法は段階整備という柔軟性のある整備計画の価値を評価できること、社会基盤整備プロジェクトに対する段階的整備計画を行う際は、拡大などのオプションを考慮した方がプロジェクトの価値は高まる可能性があることなどが明らかになった。

Project Evaluation of Kumamoto-Dentetsu Railway LRT Project by Real Option Approach *

By Shoshi MIZOKAMI**・Toshio FUJIMI***・Toshihiko HIRANO****

Cost benefit analysis is very important in project evaluation. However, conventional methods cannot build the flexibility in the future into the evaluation. The background of this study is a proposal of a new project evaluation technique intended for the innovation of the LRT system of the local railway. In this study, the project is evaluated by real option approach applying finance option theory to consider the risk. In the results, real option approach is proved very effective evaluation method because the project value rises more than usual evaluation value in considering the option.
