

動的キャッシュフローモデルによる インフラ投資評価と最適ポートフォリオ構成

江尻 良¹

¹ 個人正会員 京都大学 経営管理大学院 特別教授 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

E-mail: ejiri.ryo.7u@kyoto-u.ac.jp

投資家の視点から見ると、インフラプロジェクトへの投資はリスク/リターン特性が時間とともに変化する資産として認識され、この特性は投資ポートフォリオ作成の重要な要因となる。本研究ではインフラ資産の特性を評価するために、確率微分方程式（SDE）で定義した動的なキャッシュフローモデルを用いた資産評価モデルを提案する。現実のインフラ投資では、そのライフサイクルに対応して、建設段階と運営段階とは異なるキャッシュフローが創出されるため、各段階に対応した資産評価モデルを構築する。このモデルを用いて財務シミュレーションと感度分析を行い、パラメータ変化の影響を把握する。さらに資産・負債および（株主）資本の各バランスシート項目を SDE で記述した動的なバランスシートを作成し、インフラ資産のリスク/リターン特性を踏まえた機関投資家の最適なポートフォリオ構成に関する特徴を明らかにする。

キーワード：インフラ投資評価、動的キャッシュフロー、確率微分方程式、ポートフォリオ

1. はじめに

インフラ投資は、安定したキャッシュフローを生み出す長期投資として特徴付けられ、分散投資の可能性が高く、インフレ等金融市場の変動に対しても投資資産の価値を損なうことが小さいなどの特徴がある¹⁾。このことは、年金基金や保険会社など機関投資家から見ると、インフラ資産は魅力的な投資対象として認識されている。一方でインフラ資産は、市場データが入手できないか、あるいは非上場資産のようにデータの入手可能性が極めて低いという課題がある。このため、個別の投資資産としての特性、またはマクロな投資資産の市場全体としてのリスク・リターンの特徴に関する情報が入手しにくい状況にある。結果として DCF 手法に代表される資産評価手法では、必要とされる予測・評価の情報が作成し難いという課題もある。

理想的なインフラ投資は、資本市場で利用可能な他の投資との相関が低く、インフレリスクから隔離され、ある種の独占的な市場特性を示す、予測可能で長期的かつ安定したキャッシュフローを生み出すものとして求められている。インフラへの投資に共通する特性から、リスクとリターンを考慮した、投資判断のための情報を提供する役割を持つ評価モデルが求められている。近年、イ

ンフラ資産に対する経済的および社会的需要の変化や、公的資金と民間資金が共にこの投資市場に急激に参入していることから、インフラ投資についてより合理的な新しい評価手法の開発や既存手法の改善が求められているといえる。

本研究ではこうした背景を踏まえ、インフラ資産の特性を評価するために、確率微分方程式（SDE）で定義した動的なキャッシュフローモデルを用いた資産評価モデルを提案する。直接インフラ資産に共通する主要なリスクソースを特定し、それらをそのような資産の一般的なライフサイクルに関連付け、インフラ資産の基礎となるリスクについての時間的な変化など特徴を明らかにする。特に年基金や保険会社といった機関投資家の立場から、非上場インフラへの直接投資に焦点を当て、適切な評価モデルを提供することを目的とする。

以下 2. ではインフラ投資の時間軸に沿ったリスクの特徴を整理する。3. では確率微分方程式の枠組みにより、割引キャッシュフローアプローチによるインフラ資産の評価モデルを定式化する。4. ではインフラ資産に投資する企業の動的なバランスシートをモデル化し、株主価値を最大化する資産ポートフォリオの最適化モデルを説明する。最後に 5. ではモンテカルロ・シミュレーションによりモデルの特性を考察する。

2. インフラ投資のキャッシュフロー特性²⁾

インフラの投資の資産価値は、プロジェクトの時間軸に沿って推移する。ライフサイクル全体を見通すと、最初に設計および計画フェーズですべてのインフラ資産の技術的基盤を構築し、その後、投資家が運用フェーズでプラスのキャッシュフローを実現できるようにするために、資本集約的な建設フェーズが続く。このライフサイクルの終わりは、通常、プロジェクトの清算フェーズで表される。このフェーズでは、残りの運用期間が少なく、保守コストが高くなるため、キャッシュフローも減少し結果として資産価値が大幅に低下する。(図-1)

ライフサイクルのうち、初期段階のインフラ投資は一般にグリーンフィールド資産と見なされ、後の段階はブラウンフィールド資産と見なされる。この分離は、資産のリスクの種類やそのメカニズムが異なることに応じて区別するため、インフラ投資の最初リスクに敏感な分類と見なすことができる。

グリーンフィールドとは、プロジェクトが計画、開発、資金調達、または建設段階にある場合を言う。対照的に、ブラウンフィールドまたは二次プロジェクト/アセットはすでに動作しているか、既存の資産の再構築、改修、拡張が含まれる場合がある。言い換えると、これら二つのフィールドの主な違いは、インフラ資産自体の成熟度と利用可能な資産固有の各種のデータや経験・知識などの蓄積にあり、一般的に、グリーンフィールドプロジェクトの場合はこうした情報は大幅に少ない。これにより、投資家はコストと収益の両面で高い不確実性やリスクが生じる可能性がある。このため投資家は、グリーンフィールド投資のリスクは常にブラウンフィールド投資のリスクよりも高いと想定する傾向がある。ただし、特定のケースでは、選択したグリーンフィールド投資がブラウンフィールド投資と同様のリスクのレベルを持っている。

グリーンフィールドプロジェクトのコスト面のリスクは、主に計画、開発、承認と環境許可の受領、公衆の受け入れ、建設と運用に関連しており、特に、実証されていない新しいテクノロジーが使用されている場合、技術面での能力発揮の不確実性がある。また収益面では、需要と価格の不確実性が主要なリスクとなる。これらリスクは、施設が稼働した後、ブラウンフィールドでのみ完全に識別ができる。対照的に、ブラウンフィールドプロジェクトは、グリーンフィールド/開発フェーズをすでに通過している既存の運用資産に関連する。開発段階または環境問題、公衆の受け入れ、承認プロセス、試運転、技術、および初期需要に関連するすべてのリスクは、すでにグリーンフィールドの段階で対処されているため、より小さなリスクで投資判断を行える。

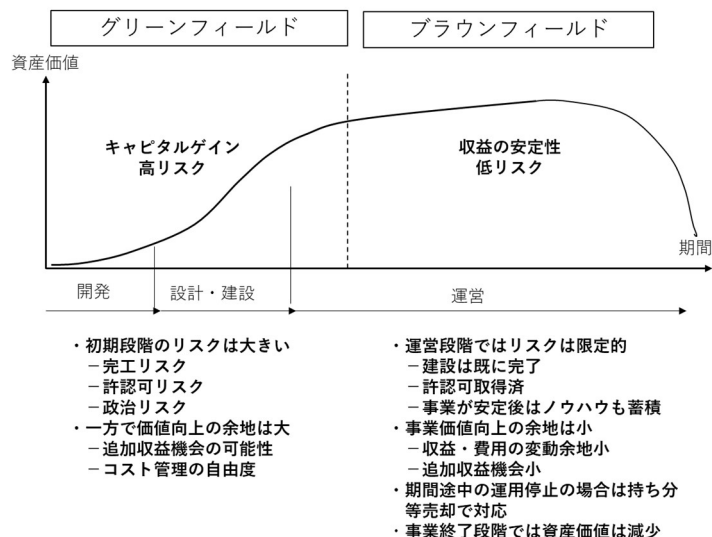


図-1 インフラプロジェクトの推移と資産価値

このように従来インフラ資産のライフサイクル区分では、ブラウンフィールド資産がグリーンフィールド資産よりもリスクが低いことを強調してきたため、機関投資家などリスク回避的な投資家の観点からは、ブラウンフィールド資産は適切な投資選択であり、この資産クラスは、インフラ資産の分野で機関投資家にとって現在最も価値のある投資機会を表すとされてきた。一方近年では、グリーンフィールドから一貫してプロジェクトに参加し、適切なリスク管理の下で、より大きなリターンを獲得するという投資家も増加している。

以上まとめると、ブラウンフィールド投資と比較してグリーンフィールド投資では関連するリスクはより高い。このため追加のリスクを取る準備ができていないキャピタルゲインまたは成長型投資家に適している。対照的に、長期契約のある良好な状態のブラウンフィールドの投資資産は、不動産または債券の商品と同様の方法で、配当または利払いの形で、安定したキャッシュフローを提供することになる。その結果、リスク回避型の利回り主導型投資家に特に適している。しかし、すべてのブラウンフィールド投資が低リスクで債券のような利益をもたらすと結論付けるのは誤りであり、次節で説明するように、適切なリスク評価を踏まえた資産価値の評価は不可欠である。

3. 確率微分方程式によるキャッシュフロー評価モデル³⁾

インフラ資産の投資評価で使用される評価モデルの一つとして割引キャッシュフローモデル(DCF)があげられる。このアプローチは、資産の将来のキャッシュフローの予測と、投資家のリターン要件を反映するリスク調整

済み割引係数の予測、の2要素で構成される。

インフラ資産の場合、個々の投資プロジェクトでは当然ながら各期のキャッシュフローが生み出されているものの、市場全体でのデータが入手が困難である。したがって、市場データを用いて投資パフォーマンスを予測することは極めて困難であるため、資産のリスクリターンの特性を踏まえ、キャッシュフローと割引係数が確率的な変動をする確率過程としてとらえることで、DCFモデルとしての利用が可能である。

1) モデルのフレームワーク

2. での議論を踏まえ、資産の将来のキャッシュフローの予測に関しては、インフラ資産の総キャッシュフローについて、グリーンフィールド：建設段階 (C)、ブラウンフィールド：運営段階 (CF^{op}) の2種類に区分し、個々の段階に分けて予測モデルを考える。この区分をもとに、資産の存続期間に沿ったリスクの変化をより詳細に反映し、資産のコストとキャッシュフローを成長要因 (トレンド)、および変動 (ボラティリティ) を確率的に変化させるモデルとして定式化し、各フェーズのリスクの特性を把握する

いま典型的なインフラ投資プロジェクトの例として、プロジェクト全期間を20年、うち調査・建設期間4年、運用16年間とし、プロジェクト投資案件を想定する。20年後、機関投資家はこの投資案件を終了する。キャッシュフローは各期末に発生すると仮定する。資産の存続期間にわたる対応する建設費とキャッシュフローの時間的推移のイメージを図-2に示す。

キャッシュフロー推移の各段階に対して、以下のようにその挙動を確率微分方程式で表す。

① 建設段階のキャッシュフロー

インフラ資産の建設期間は、資産の全体的なパフォーマンスに大きな影響を及ぼす。この間の建設費フローを以下の確率過程で表す。

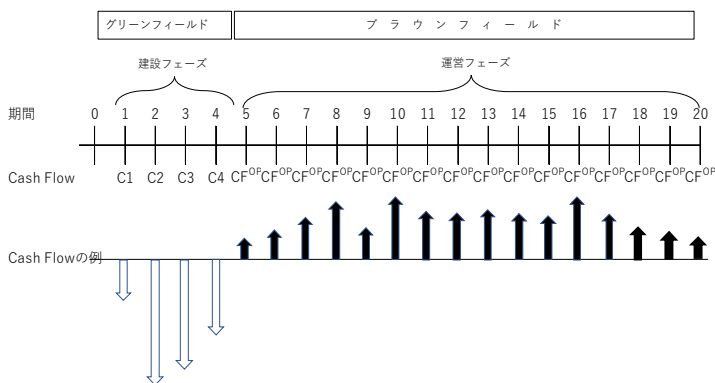


図-2 プロジェクトのキャッシュフロー推移

$$dC(t) = \mu_c C(t) dt + \sigma_c C(t) dw(t) \quad (1)$$

ここで、 $dC(t)$ は、微小時間における建設費の変化、時間 dt ,

μ_c コストのドリフト

$C(t)$ 建設コスト

σ_c 拡散係数

$dW(t)$ 標準ウィーナー過程

ドリフト項は、コストの長期的な動きを示す。またボラティリティ係数と標準のウィーナー過程からなる第2項は、ドリフトに対しランダムなノイズを及ぼす拡散項である。

この確率微分方程式は、以下の式 (2) で示す解析解と、式 (3) で離散化された形式を取り、モンテカルロシミュレーションで使用する。

$$C(t) = C(0) \cdot \exp\left(\left(\mu_c - \frac{\sigma_c^2}{2}\right)t + \sigma_c W_c(t)\right) \quad (2)$$

$$C(t) = C(t-1) \cdot \exp\left(\left(\mu_c - \frac{\sigma_c^2}{2}\right)\Delta t + \sigma_c \sqrt{\Delta t} Z(t)\right) \quad (3)$$

ここで、 Δt 時間増分

$W_c(t)$ 標準ウィーナー過程

$Z(t)$ 標準正規分布変数

② 運営段階のキャッシュフロー

運営段階にあるインフラのキャッシュフローは建設段階に比べると相対的に安定しており変動が少なく、非インフラ資産とのキャッシュフローとの相関が弱い。したがって、営業キャッシュフローは式 (4) および (5) で与えられるダイナミクスに従うとする。

$$dCF^{op}(t) = \mu_{op} CF^{op}(t) dt + \sigma_{op} CF^{op}(t) dW_{op}(t) \quad (4)$$

$$CF^{op}(t) = CF^{op}(t-1) \cdot \exp\left(\mu_{op} - \frac{\sigma_{op}^2}{2}\right)\Delta t + \sigma_{op} \sqrt{\Delta t} Z(t) \quad (5)$$

ここで、 $CF^{op}(t)$ 営業キャッシュフロー

μ^{op} キャッシュフローのドリフト

σ^{op} 拡散係数,

Δt 時間増分

$Z(t)$ 標準正規分布変数

③ 金利のモデル化

DCF 評価モデルの2番目の要素である割引係数については、金利の期間構造に関する仮定が必要である。ここでは金融経済学で一般的に利用される Cox, Ingersoll and Ross のモデル (CIR モデル) を採用する⁴⁾。

CIR モデルは、平均への回帰を考慮して、時間 t で非常に短い期間 $[t, t+dt)$ で利用可能なリスクのない短期金利を決定するモデルである。この短期金利に基づいて、投資プロジェクト全期間 T について、対応するスポットレートの全期間構造を決定することができる。

$$dr(t) = [k\theta - (k + \lambda\sigma_r)r(t)dt + \sigma_r\sqrt{r(t)}dW_r(t) \quad (6)$$

ここで、 $dr(t)$ 短期金利の変化

k 長期平均値 θ への調整速度

λ リスク一定の市場価格

σ_r 金利変化の拡散係数

$r(t)$ 短期金利

$dW_r(t)$ ウィーナー過程

この金利に関する確率過程は、次式を使用してシミュレーションで用いるための離散化ができる。

$$r(t) = r(t-1) + k(\theta - r(t-1))\Delta t + \sigma_r\sqrt{\Delta t \cdot r(t-1)}Z(t) \quad (7)$$

ここで、 Δt 離散時間増分

$Z(t)$ 標準正規分布変数

この金利環境では、時間 T (満期) で 1 単位の金額を支払うデフォルトのないゼロクーポン債について、時間 t での価格 $P(t, T)$ は以下の解で表される。

$$P(t, T) = A(t, T) \cdot \exp(-B(t, T)r(t)) \quad (8)$$

ここで

$$A(t, T) = \left[\frac{2h \cdot \exp[(k+h)(T-t) \cdot 0.5]}{2h + (k+h) \cdot (\exp[(T-t)h] - 1)} \right]^{\frac{2k\theta}{\sigma_r^2}} \quad (9)$$

$$B(t, T) = \frac{2(\exp[(T-t)h] - 1)}{2h + (k+h) \cdot (\exp[(T-t)h] - 1)} \quad (10)$$

$$h = \sqrt{k^2 + 2\sigma_r^2} \quad (11)$$

2) キャッシュフローの現在価値

インフラ資産のキャッシュフローの現在価値を求めるため、次のモデルを考える。

いま満期 T のデフォルトのないゼロクーポン債と、そのキャッシュフロー値に相当する金額を額面で表すと、時点 t での値は、関数 $P(t, T)$ で表すことができる。これを用いて、時間 T で一定額が支払われるインフラ投資資産のキャッシュフローの時間 t での現在価値は、時間 T でのキャッシュフロー CF と、CIR モデルで得られた満期 T で 1 単位を支払うゼロクーポン債の現在価値 $P(t, T)$

を掛け合わせることで求められる。投資家は、インフラ資産から得られる各時点の将来のキャッシュフローの現在価値を以下の式で評価する。

$$PV(t) = - \sum_{T=1}^4 C(t) \cdot P(t, T) + \sum_{T=5}^{20} CF^{op}(T) \cdot P(t, T) \quad (12)$$

ただし

$$C(T) = \begin{cases} C(T) & T > t \\ 0 & T \leq t \end{cases}$$

$$CF^{op}(T) = \begin{cases} CF^{op}(T) & T > t \\ 0 & T \leq t \end{cases}$$

ここで、 $PV(t)$ キャッシュフローの現在価値

$C(T)$ 建設費

$CF^{op}(T)$ 営業キャッシュフロー

$P(t, T)$ 時間 T に 1 単位の通貨を支払うデフォルトのないゼロクーポン債の現在価値

それぞれの将来時間 t での現在価値の決定に適用可能な建設段階のコスト ($C(t)$) または運営段階のキャッシュフロー ($CF^{op}(t)$) は、それらの満期 T が現在の時点 t よりも大きい場合にのみ考慮される。この式では、時間 t におけるインフラ資産の現在価値は、評価時点 t における将来および残りのキャッシュフローを考慮して決定される。

4. 動的バランスシートによるポートフォリオ評価

インフラ資産を投資対象とする年金基金や保険会社など機関投資家の企業 (組織) を考え、この企業の投資ポートフォリオの資本配分、リスク、パフォーマンスを評価するために、動的バランスシートを作成する。会社はその資金を、インフラ投資 (PV) のほか、資本市場で利用可能なリスクのある資産である株式 (S) と、資産価値が変動しない資産である債券 ($Bond$) の 2 つの資産に投資していると仮定する (図-3)。この会社は、目的関数としての純株主価値を最大化する。この条件の下で最適なポートフォリオのウェイトの選択を行い、インフラ資産の投資の影響を把握するためのモデルを構築する。

① 株式資産の変動モデル化⁵⁾

リスクフリーレートを超える利回りを実現する可能性のあるリターンを会社に提供するために、会社はリスクのある資産に投資することができる。この資産の挙動は

株式 S(t)	負債 L(t)
債券 Bond(t)	
インフラ投資 PV(t)	株主資本 E(t)

図-3 企業のバランスシート

は、式 (13) および式 (14) で与えられると想定する。

$$dS(t) = \mu_S S(t) dt + \sigma_S(t) dW_S(t) \quad (13)$$

$$S(t) = S(t-1) \cdot \exp\left(\mu_S - \frac{\sigma_S^2}{2}\right) \Delta t + \sigma_S \sqrt{\Delta t} Z(t) \quad (14)$$

ここで、 $dS(t)$ 株式資産の微小変化

μ_S ドリフト

σ_S 拡散係数

$S(t)$ 株価

$dW_S(t)$ 標準ウィーナー過程

Δt 離散時間増分

$Z(t)$ 標準正規分布変数

②債券のモデル化

リスクフリー資産である債券は、CIR モデルによって表現する。期間 t で、時間 $t+\Delta t$ で満期を迎えるデフォルトのないゼロクーポン債に資金を投資する。バランスシートは毎年決定されるため、金利 $r(t)$ は、満期が1年の無リスク金利 $r(t, 1)$ に等しくなる。

$$dBond(t) = Bond(t) r(t) dt \quad (15)$$

$$Bond(t) = Bond(t-1) \cdot \exp(r(t-1, 1) \Delta t) \quad (16)$$

ここで、 $dBond(t)$ 投資債権の価値の微小変化

$r(t)$ CIRモデルによる短期金利

$Bond(t)$ 債券の投資価値

Δt 離散時間増分

$r(t, 1)$ 1年満期のリスクフリーレート

③負債のモデル化

動的なバランスシートの負債側にある、会社の負債の市場価値を算定する必要がある。負債は、式 (17)、お

よびその離散化式 (18) を使用する。

$$dL(t) = \mu_L L(t) dt + \sigma_L L(t) dW_L(t) \quad (17)$$

$$L(t) = L(t-1) \cdot \exp\left(\mu_L - \frac{\sigma_L^2}{2}\right) \Delta t + \sigma_L \sqrt{\Delta t} Z(t) \quad (18)$$

ここで、 $dL(t)$ 負債の微小変化

μ_L ドリフト

σ_L 拡散係数

$L(t)$ 会社の負債総額

$dW_L(t)$ 標準ウィーナー過程

Δt 離散時間増分

$Z(t)$ 標準正規分布変数

2) 最適な資産配分のための仮定

機関投資家の企業ポートフォリオの全体パフォーマンス、インフラ資産の各期リターンポートフォリオ全体への寄与、および他のバランスシート項目との相互依存性を明らかにするため、この会社は純株主価値を最大化することを目的として、以下の仮定を置く。

いま、時間 $t = 0$ でのインフラ事業開始時に、会社は初期資金を3つの資産クラスに投資するとする。

- ・リスクのある株式 (S) ,
- ・リスクのない債券 (B),
- ・非流動的なインフラ資産 (I)

それぞれの対応するポートフォリオの重みを w_S, w_B, w_I とする。

会社は、どの時点においてもインフラ資産へのウェイトバランスを変更できないと想定する。つまり、一旦、プロジェクトへの投資を決めたら、時間ゼロでの開始後、インフラ資産からの資金の引き出しや追加投資はできない。これは、投資家に対し、インフラ資産の特定のポートフォリオ制約を課することを目的とする。インフラ資産は典型的に非流動的である。つまり、撤退オプションまたは当該インフラ資産の株式を売却できる二次的な流通市場が欠如していることから、満期まで保有せざるを得ない、とい条件を表す。しかしこの条件は、会社の資産と負債の管理アプローチの観点から、インフラ資産が収益性を維持し、そのサービス提供能力が継続する限りにおいて、他の資産と比較して必ずしも不利ではない。むしろ適切なリスクとリターンを有する資産として位置付け、非流動性資産のメリットを積極的に確保するという考え方である。

インフラ投資に関する建設費と個々のキャッシュフローは、各年の終わりに実現し、次の期間 $t+1$ にわたってプラスのキャッシュフローは株式・債券に投資される資金に割り当てられる。建設費は会社から資本を引き出すことで充当される。これは次期に株式や債券など他の資産への投資に割り当て可能で余裕資金を減らすという点

から、財政上マイナスの影響を生じさせ、バランスシート上の資産全体のパフォーマンスおよび投資家の支払能力の低下として現れる。一方運営段階のキャッシュフローはプラスになるようにモデル化されているため、それらの値は、次期には株式・債券への投資割合を高める。

時間 t での会社のバランスシート資産合計の価値は、定義により保有するすべての資産の合計に等しくなる。この値は、株式資産 $S(t)$ 、債券 $B(t)$ 、株式ないし債券への投資に利用できるインフラ資産からのキャッシュフロー $CF(t)$ で構成される。建設期間では建設費 $C(t)$ により、時間 t での総資産の価値、および時間 t でのインフラ資産の将来および残りのキャッシュフローの現在価値が減少する。したがって、次の期間の株式や債券の新規投資に割り当て可能な資金は、インフラ資産の現在価値を差し引いたうえでの資産側の合計値になる。また会社は、各年の終わりに最適化ルールに従いポートフォリオの割合を即座に変更し、新たな資産割合で次の期間に対応するリターンを得る。以上の条件のもとで、インフラ資産を満期まで保有する会社のポートフォリオは、次式で計算される。

$$A(t) = S(t) + Bond(t) - C(t) + CF(t) + PV(t) \quad (19)$$

$$A^{alloc}(t) = A(t) - PV(t) = Bond^{adj}(t) + S^{adj}(t) \quad (20)$$

ここで

$$Bond^{adj}(t) = w_B \cdot A^{alloc}(t) \quad (21)$$

$$S^{adj}(t) = w_S \cdot A^{alloc}(t) \quad (22)$$

さらに、式 (14) および (16) を使用して、次のように時間 $t+1$ でのバランスシート資産側のポートフォリオの各資産額を計算する。

$$Bond(t+1) = Bond^{adj}(t) \cdot \exp(r(t,1)\Delta t) \quad (23)$$

$$S(t+1) = S^{adj}(t)$$

$$\cdot \exp\left(\left(\mu_S - \frac{\sigma_S^2}{2}\right)\Delta t + \sigma_S\sqrt{\Delta t}Z(t+1)\right) \quad (24)$$

$$A(t+1) = S(t+1) + Bond(t+1) - C(t+1) + CF(t+1) + PV(t+1) \quad (25)$$

ここで、 $A(t)$ 総資産価値

$S(t)$ 株式の価値

$Bond(t)$ 債券の価値

$CF(t)$ 時間 $t = T$ (満期) キャッシュフロー

$C(t)$ $t \leq 4$ (建設期間) の場合われるコスト

$PV(t)$ インフラ資産の将来の現在価値

$A^{alloc}(t)$ 次期に投資可能なキャッシュフロー

$Bond^{adj}(t)$, $S^{adj}(t)$ 株式および債券への投資額

Δt 離散時間増分 (1年)

$r(t,1)$ 無リスク短期金利 (1年もの)

w_S , w_B 株式資産と債券資産への投資ウェイト。

インフラ資産の建設支出または運営キャッシュフローを実現した直後の各年末には、会社は次期の株式および債券資産の最適なポートフォリオの重みを決定する。例として保険会社の投資ポートフォリオを考えた場合、重み w_S および w_B は、ソルベンシーII によって与えられた資本健全性に関する規制上の制約を考慮して選択される。これは、1年間の期間で0.5%未満の最大許容破産確率で定義されている。この条件のもとで1年先の投資配分を最適化し、株式と債券に適切なポートフォリオの重みを設定する。したがって、時間 $t = 1$ から $T = 19$ まで、会社は次の関数に従いポートフォリオを構成する。

$$NSHV(t) = \max_{w_S, w_B} \{ \exp(-r(t,1)) \cdot E^P [\max(A(t+1) - L(t+1); 0) - [A(t) - L(t)]] \} \quad (26)$$

ここで

$$w_S + w_B = 1 \quad (27)$$

$$w_B \in [\max(w_B^{unadi} - \delta, w_B^{min}); \min(w_B^{unadi} + \delta, 1)] \quad (28)$$

$$P\{A(t+1) < L(t+1)\} \leq 1 - \alpha \quad (29)$$

ここで、 $NSHV(t)$ 正味株主価値

w_S , w_B 株式、債券の重み

$r(t,1)$ CIR モデルによる年間リスクフリーレート、

$A(t)$ 総資産の価値

$L(t)$ 負債の価値

δ 株式と債券の重みの最大許容量

w_B^{min} 債券の投資ウェイトの最低値

P 確率関数

α ソルベンシーII の必要信頼区間 (99.5%)

$A(t) - L(t)$ 自己資本の価値 (=E(t))

式 (26) は、予算と非流動性の両方の制約と見なすことができる。これにより、割り当て可能な資金が次の期間に株式や債券に完全に投資されることが保証する。

式 (27) により、会社は、株式と債券それぞれの資産ポートフォリオのウェイトを、未調整の値に応じて、各期間で最大 $\delta = 20\%$ だけ変更できるとする。

また債券の最小割合 (w_B^{min}) を置くとともに、割り当て可能な資金に関する重みは、リスク回避的な投資アプローチを反映するため $w_B \in [0.70; 1]$, $w_S \in [0; 0.30]$ と仮定する。最後の制約式 (29) は、ソルベンシーII によって導入された、資産の健全性要件を説明している。会社の破産は、時刻 $t+1$ での負債と比較して、総資産が小さい場合、つまり $A(t+1) < L(t+1)$ の場合として表されるため、会社が1年間ですべてのケースの99.5% (信頼水準99.5%) で健全であること保証する。

資産の健全性を示す自己資本要件 (SCR : Solvency Capital Requirement) は、99.5%の信頼水準での自己資金の変化のVaRとして定義され、式 (30) が成り立つ最

表-1 シミュレーションのパラメータ

パラメータ		テストケース値	パラメータ		テストケース値
建設段階	μ_c	0.04	短期金利	σ_r	0.039
	σ_c	0.10		k	0.1036
運営段階	μ_{OP}	0.06	投資資産のウェイト	$W_B(0)$	0.7
	σ_{OP}	0.07		$W_S(0)$	0.2
株式	μ_s	0.08		$W_I(0)$	0.8
	σ_s	0.21	負債	$W_L(0)$	0.8
負債	μ_L	0.01	株式・債券ウェイト最大値	δ	0.2
	σ_L	0.05	債券投資ウェイト(最低値)	W_B^{min}	0.7
短期金利	$r(0)$	0.01	株式投資ウェイト(最大値)	W_S^{max}	0.7

小額 x として決定できる

$$SCR(t)^{VaR} = \arg \min_x \{ P(A(t) - L(t) - \exp(-r(t, 1)) \cdot [A(t+1) - L(t+1)] > x) \leq 1 - \alpha \} \quad (30)$$

ここで、 $SCR(t)^{VaR}$ VaR アプローチに基づく健全性に基づく資本要件

- P 確率関数,
- A(t) 総資産価値,
- L(t) 負債価値,
- r(t, 1) CIR モデルによるリスクフリーレート.
- α 信頼区間 (99.5%)

確率関数内の式は、損失を示す変数として定義され、SCRを超える1年間の損失の確率が0.5%以下であることを示す。

5. 数値シミュレーションと考察

3.4. で定式化したインフラ資産のキャッシュフローモデルの特徴を見るため、EXCEL シート上に離散化モデルを作成して、5000パスのモンテカルロシミュレーションにより、インフラ資産の価値の変化を経時的にシミュレートした⁶⁾。モデルは感度分析の目的で、ベースケースシナリオに使用したパラメータを表-1に示す。

図-4は時間経過に伴うPVの推移を表す。建設期間

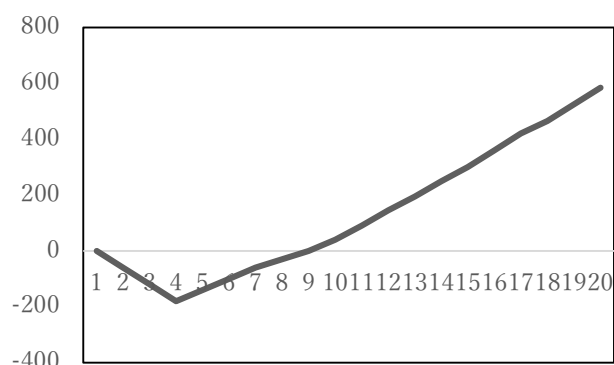


図-4 PVの変化

中は常にキャッシュフローはマイナスとなり、時点4で最大値となる。その後、運営段階ではプラスの収入を得ることで、時点9で建設段階のマイナスを全て回収している。この時点は投資プロジェクトの損益分岐点ともいえる。また、こうした投資のパターンをJカーブと呼ぶ。

図-5は機関投資家の企業のバランスシートにおける、投資資産（インフラ投資、株式、債券投資）のウェイトを時点経過に伴い示したものである。建設段階の終盤ではキャッシュフローがマイナスになることから、企業の総投資資金が不足し、リスクフリー債券投資のウェイトが高まる。その後時間の経過とともに、インフラ投資からのキャッシュフローが増大し、この資金を用いて株式への投資ウェイトを高めていく。最終段階では、インフラ投資のウェイトは極めて小さくなり、株式・債券で100%となる。この時点で機関投資家は、インフラ投資プロジェクトへの資金支出を終了することを意味する。このように簡単な数値シミュレーションを行ったが、本モデルでは、インフラ投資のリスク・リターン特性を踏まえたキャッシュフローの推移と資産価値の予測、さらにポートフォリオ構成の最適化のために有効な情報を作成することが出来る。

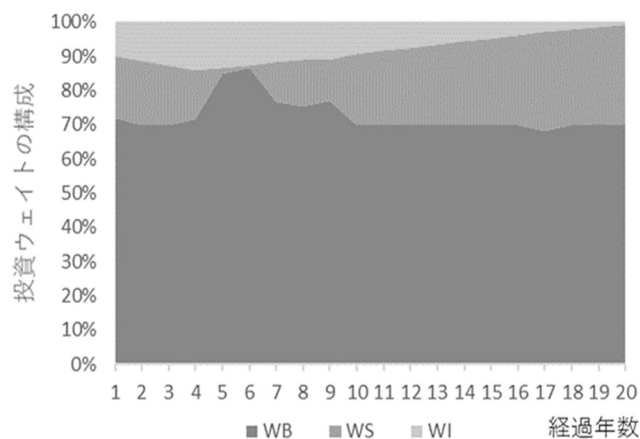


図-5 投資資産（インフラ、株式、債券）の構成

6. おわりに

現在わが国のインフラ投資は、国・自治体を始めとする公的部門やインフラ関連企業による整備・運営の時代から、PPP 官民協同による施設整備・管理の進展など、新たな仕組み・方策が台頭しつつある。一方で投資資金の提供者についても、国・自治体の税収やインフラ関連企業による直接資金調達が主体の時代から、機関投資家などがインフラ資産を経済的・社会的にも意義がありかつ有利な投資対象として認識し、投資資金を提供する機会も増加している。例として現在、機関投資家の投資対象として、太陽光・洋上風力発電などエネルギー分野や空港・道路コンセッションなど交通分野など、具体的な投資案件の増大をみている。その際、インフラ資産の投資価値は、調査/設計/建設段階からインフラサービスを提供する運営段階に至る、長いライフサイクルの間にその価値が変動するという特性を踏まえ、リスクとリターンを適切に把握・定量化し、投資家から見て自らの投資判断を有効に機能させる投資評価ツールの整備と浸透が不可欠となっている。この意味でインフラの資産価値を動的に把握し評価する本稿のモデルは、入手可能な情報が限られているインフラ投資市場において、リスク・リターン特性を明示的に考慮した評価手法として、既往のDCF モデルの機能を拡張し補完するという役割を持ち、今後の実務面での利用が期待される。

しかしながら、このモデルの利用に際しては、インフラ資産に関する投資市場に関するデータの欠如が、試算結果の一般化やその解釈に限界が存在する。年金基金や保険会社など機関投資家のポートフォリオ内では、既に株式や債券など金融資産に関しては、ベンチマークとなる膨大な市場データが存在するため、これを用いた動的評価モデルがいくつも開発・実用化されているが、インフラ資産投資については、データ面でも評価モデルの利用には解決すべき課題も多い。インフラ資産がどのようなパフォーマンスを生み出しているのか、機関投資家はどのような観点・ルールで投資対象を選定しそのパフォーマンスを評価しているのか、今後はこうした点について、より多くのデータによるさらなる検証を行い、モデルの改良が必要である。

参考文献

- 1) B,Weber et al: Infrastructure as an Asset, Wiley, 2017.
- 2) R,j,Sawant; Infrastructure Investing, Wiley 2010.
- 3) F,Regele : Infrastructure Investments , Regulatory Treatment and Optimal Capital Allocation Under Solvency II, Springer,2018.
- 4) J.C.Cox, J.E. Ingersoll and S. A. Ross: A theory of the term structure of interest rates, Econometrica, 1985.
- 5) 菅原周一, 資産運用の理論と実践, 応用ファイナンス講座 3, 朝倉書店, 2007.
- 6) 大野薫, モンテカルロ法によるリアル・オプション分析, きんざい, 2012.