

地域レベニュー債を活用した下水汚泥エネルギー化技術導入に向けた定量的事業評価手法の開発

京都大学経営管理大学院 教授 小林潔司

概要：

近年、バイオマスの積極的活用が推進される中で、下水処理によって発生する下水汚泥をエネルギーに転換し再利用する技術が発達している。一方、下水道事業を担う地方自治体の財政は全国的に逼迫しており、新技術導入に向けた投資の実現は必ずしも容易ではない。下水汚泥エネルギー化技術導入に際して、レベニュー債や PFI (Private Finance Initiative) といった、返済原資を事業から生じるキャッシュフローに限定したスキームの有効性が指摘されている。本研究では、下水汚泥エネルギー化技術の導入にあたり、事業の成立可能性及び資金調達スキーム選択のための定量的な評価手法の開発を目的とする。

キーワード：下水道事業、資金調達、レベニューボンド、下水汚泥エネルギー化技術

1. はじめに

2010 年 12 月 17 日には「バイオマス活用推進基本計画」が閣議決定された。近年、下水処理によって発生する下水汚泥の再利用化が進む一方、下水汚泥中に含まれる有機物（バイオマス）のリサイクル率は、約 23%にとどまっている¹⁾。バイオマスの活用が求められる背景には、我が国が化石資源の乏しい国であるため、太陽、大地、海等の自然の恩恵によってもたらされる枯渇することのない資源を有効に活用することによって、エネルギーを確保できるという期待が存在する。

下水汚泥のエネルギー化技術導入の意義として、1) 下水汚泥のバイオマスとしての長期的かつ安定的な有効活用、2) エネルギー価値を利用した技術による経営改善、3) 温室効果ガスの削減を挙げている。下水汚泥エネルギー化技術は、上記のような社会経済的価値が存在するものの、下水汚泥エネルギー化技術の導入にあたっては、新たな投資が必要となる。下水道事業の運営主体は、地方自治体であるが、多くの地方自治体が財政的に逼迫している。地方財政の逼迫により、下水道事業のみならず、その他の公的サービス水準にも影響を与える。そのため、これらの地方自治体の財務担当者は、財政的な健全性を確保するために、新たな公的債務負担をできるだけ軽減したいと考えている。したがって、下水汚泥エネルギー化技術の導入に際して、地方政府財政に対する考慮が必要となる。税金が減少傾向にある中で、少なくとも、本技術の導入により、地方政府財政に追加的な

負担を要求することは避けなければならない。

大西等²⁾は、下水汚泥エネルギー化技術導入に際して、レベニュー債や PFI (Private Finance Initiative) といった、返済原資を事業から生じるキャッシュフローに限定した事業スキームが、地方自治体の長期的な財務的健全性及び事業の効率性の観点から有効であると指摘している。一方で、実際に技術導入を検討する際の具体的な方法論について、示しているわけではない。

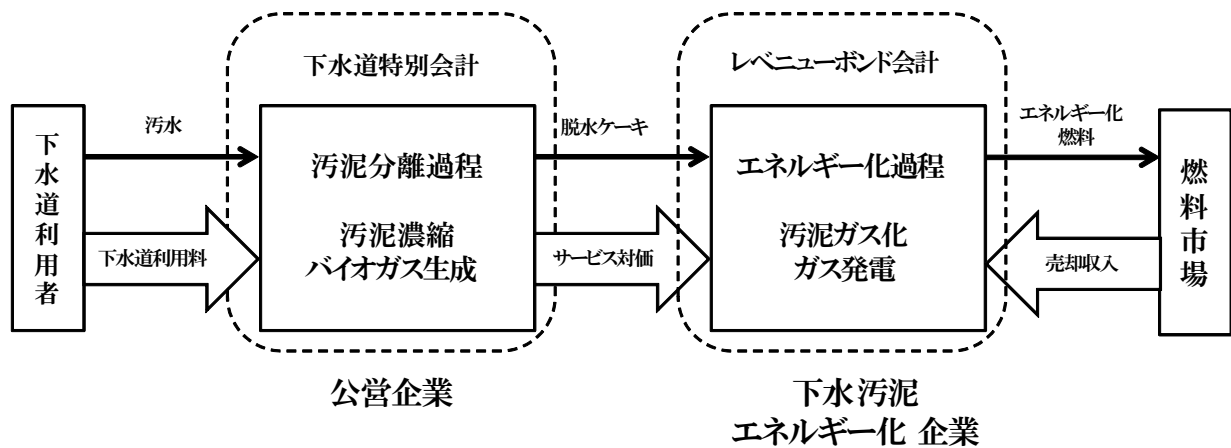
下水汚泥エネルギー化技術の導入のための検討方法については、国土交通省都市・地域整備局下水道部が発行している「下水汚泥エネルギー化技術ガイドライン(案)³⁾」においてすでに示されている。しかし、本ガイドラインでは、燃料化製品の売却リスクを考慮した事業評価が示されているわけではない。

本研究では、下水汚泥エネルギー化技術の導入にあたり、燃料化製品の売却リスクを明示的に考慮した事業の成立可能性及び資金調達スキーム選択のための定量的な評価手法の開発を目的とする。

2. 下水汚泥エネルギー化技術事業スキーム

(1) 下水汚泥エネルギー化技術の概要³⁾

下水汚泥エネルギー化技術には、1) 固形燃料化技術、2) バイオガス利用技術、3) ガス化技術の3つがある。固形燃料化技術は、下水汚泥を炭化あるいは乾燥させることにより、固形燃料を生み出す技術である。バイオガ

図-1 レベニュー債を活用した下水汚泥エネルギー化事業スキーム²⁾

ス利用技術は、嫌気性消化によって発生するバイオガスを利用し、発電、燃料電池、バイオガスを精製し、自動車燃料として利用する技術、都市ガスレベルまで精製してガス導管に直接注入する技術である。ガス化技術は、下水汚泥のガス化反応、改質反応により生成した可燃性ガスを汚泥の乾燥、ガス化に利用し、残りの可燃性ガスを発電に利用するガス化技術である。

固形燃料化技術のうち、炭化技術は、東京都の東部スラッジぶらんとにおいて下水汚泥を炭化して固形燃料を生産し、福島市いわき市の石炭火力発電所へ運び、燃料として石炭と混焼している事例がある。また、汚泥乾燥技術については、福岡県において油温減圧乾燥技術が導入されており、燃料化製品は長崎県の松浦火力発電所において石炭との混焼が行われている。このように、下水汚泥の固形燃料化技術によって生成された燃料化製品は、石炭の代替エネルギーとして用いられることが多い。

一方、バイオガス利用技術については、バイオガスを汚泥の焼却や消化槽の加温に使うケースが大部分であるが、長岡市や金沢市の事例のように、バイオガスを精製し、メタンガス濃度を約9割にまで高め、隣接する都市ガス工場に供給する場合もある。また、神戸市や上田市では、天然ガス自動車のバスの燃料として利用している事例や、神戸市における既設ガス管網への直接注入の事例もある。以上のように、バイオガス利用技術については、都市ガスの代替エネルギーとして用いられている。

(2) 事業スキーム²⁾

下水汚泥エネルギー化技術導入にあたり、事業スキームとして、大きく分けて1) 従来通りの地方債発行、2) レベニュー債発行、3) PFI 方式が考えられる。

レベニューボンドは、事業目的別歳入債券と訳されるように、ある特定の事業のみを目的として発行され、当該事業から発生する歳入のみを返済原資として発行される債券である。したがって、レベニューボンドで調達さ

れた資金は、目的とする事業以外の使途に投資されることはない。また、レベニューボンドの返済原資は、あくまでも特定の事業のみから生じるキャッシュフローであり、原則としてその他の事業からの繰入等はできない。レベニューボンドは主に米国で多く使われており、空港、港湾、道路、上下水道といったインフラの整備・管理・運営に適用されている。

地方債で調達された資金の投資先は、建設資金のように、おおまかには決められているものの、具体的にどの事業に投資するかまでは規定されない。さらに、地方債の返済原資は、地方自治体が得る収入（税および公営企業体の収入）が基本となる。すなわち、地方債は、地方自治体の財布全体が担保となっている。レベニューボンドを地方債と比較したとき、

- 調達された資金の投資先が明確に定義されている。
- 返済原資が当該事業から発生する歳入のみに限定されている。

という2点に特徴付けられる。この点は、企業金融におけるプロジェクトファイナンスとコーポレートファイナンスの違いと対応している。企業がある投資事業に必要な資金を調達する際、コーポレートファイナンスでは、企業全体の信用力を担保に借り入れる。したがって、当該事業が仮に十分な収益を上げることができない場合であっても、企業がその他の事業から十分な収益を上げていれば、借入金を返済することができる。一方、プロジェクトファイナンスでは、法的に企業本体から完全に独立した特別目的会社（Special Purpose Company; SPC）を設立する。資金は当該事業のみを目的として調達される。すなわち、投資対象事業から発生するキャッシュのみを担保として、資金を借り入れる。したがって、仮に当該事業が返済のために十分なキャッシュを生み出すことができないければ、債券はデフォルトすることになる。プロジェクトファイナンスでは、当該事業が失敗したと

しても、企業本体に対して債務返済請求を遡及することができない。この点は、レベニューボンドの購入者が、仮に対象事業から十分なキャッシュが発生しない場合であっても、地方自治体が債務保証しないという点で共通している。

PFI 事業とレベニューボンドを活用した事業では、投資家が負うファイナンス上のリスクという意味では、全く同一である。しかし、PFI 事業の事業主体が民間企業であるのに対して、レベニューボンドを活用した事業の事業主体は、公的組織である。この点は、事業経営者の努力インセンティブに影響を与えるかもしれない。すなわち、一般的に公的組織の被雇用者は、民間組織の被雇用者よりも、身分が保障されている。したがって、PFI 事業の場合に、返済ができない場合には、事業の経営者は、民間企業の人事の中で、公的組織よりも、より厳しいペナルティーを負うかもしれない。逆に、レベニューボンドの事業では、事業経営者は公的組織の被雇用者であるために、仮にボンドの債務不履行が生じたとしても、仕事を失う可能性が民間企業と比して小さいであろう。一方で、経営者が民間であるか、公共であるかは、事業運営上の公共利益の配慮に対して影響を与える。PFI 事業とレベニューボンドの事業との比較する際、より公共利益に対する配慮が必要な事業では、PFI 事業よりもレベニューボンドによる資金調達が望ましいと言える。

以上、下水污泥エネルギー化事業における各スキームは、図のように表すことができる。レベニュー債及び PFI 方式では、エネルギー化企業会計を設け、エネルギー化事業単独で採算を取ることが前提となっている。

(3) 事業評価の考え方

本研究では、下水污泥エネルギー化技術導入にあたり、まずは事業の実現可能性について検討を行うための評価モデルを提案する。事業の実現可能性の評価にあたっては、回収可能なキャッシュフローの最大値を求めることによって、実施可能性の可否が判断できる。すなわち、仮に、実現可能なキャッシュフローの最大値を用いた場合であっても、事業の採算性が確保できない場合には、案件の実現に向けて事業形成を行う価値がないと判断される。

すでに指摘したように、下水污泥エネルギー化事業の成否に影響を与える最も重要な要因の一つは、生成された燃料化製品の売却リスクである。下水污泥は、都市活動から発生するものであり、下水污泥の発生を事業主体が制御することができない。したがって、燃料化製品が売却できない、あるいは安価な値段でしか売却できない場合にも、生産量を減らすといった生産調整を行うことができない。このように、下水污泥エネルギー化事業は、無視できない燃料化製品の売却リスクに晒されている。したがって、本研究が提案する事業評価方法では、燃料

化製品の売却リスクによって生じるキャッシュフローリスクが債券の信用リスクに与える影響を明示的に定量化する。

信用リスクの評価方法は、大きく分けて構造モデル (structural approach) と、外生変数モデル (reduced-form approach) に大別できる⁴⁾。構造モデルは、企業の資産が目減りし、負債が上回った場合にデフォルト (債務不履行) が発生すると考える。一方、外生変数モデルでは、デフォルトや回収率を外生的に与え、市場で適切に信用リスクが評価されていることを前提に、信用リスクを推定する方法である。本研究では、下水污泥から生成した燃料化製品の売却リスクを明示的に考慮することを意図している。したがって、燃料化製品の売却リスクが、事業のキャッシュフローに与える影響することを明示的に考慮し、その結果生じる信用リスクを評価したい。したがって、本研究では、リスク評価を行うために、構造モデルを採用する。

次に、3つの事業スキーム (地方債、レベニュー債、PFI) の比較を行うための方法を提案する。上述したように、レベニュー債や PFI といったスキームがもたらす効果は、極めて定性的なものである。したがって、必ずしも定量化して検討する際に、レベニュー債及び PFI がもたらす効果について、統計的根拠に基づいているわけではない。この点については、今後の研究蓄積を待たざるを得ない。にもかかわらず、大胆な前提をおくことによって、おおよその検討材料を提供してくれる。

3. 事業評価モデル

(1) ポテンシャル・純キャッシュフロー

事業がファイナンスの観点から成立するためには、事業の純現在価値 (Net Present Value: NPV) が、正となる必要がある。本研究が対象とする下水污泥エネルギー化事業から発生するキャッシュフローは、1) 脱水污泥の処理に対する行政 (公営企業) からの対価と、2) エネルギー化した燃料の売却収入からなる。事業実現に向けて動き出すかどうかを判断するための実現可能性検討の段階では、事業が生み出す可能性がある最大のキャッシュフロー (以下、ポテンシャル・キャッシュフローと呼ぶ) を用いて検討する。

まず、脱水污泥の処理によって獲得できる最大の対価は、現在、公営企業が焼却廃棄処分のために費やしている費用に相当する。仮に、現行の埋立廃棄にかかる費用よりも高い対価をエネルギー化企業に支払う必要があれば、公営企業がエネルギー化企業に対して下水污泥処理を委託することはない。したがって、脱水污泥の処理によって獲得できる対価は、現行の埋立廃棄処分に要する費用と同等か、それよりも小さく設定されなければならない。

燃料化製品の性能は、その製品が生み出す熱量である。

仮に、同じ熱量を生み出すために、他の代替的な燃料を使用すれば、より小さい費用で済むのであれば、下水汚泥から生成した燃料化製品は使用されないと考える。したがって、燃料化製品の売却から獲得できる対価の最大可能額は、その燃料化製品から得られる熱量を生み出すのに、競合する代替的な燃料を使用した場合に要する費用である。

R_i を運営第 i 期 ($i = 1, \dots, T$) において獲得できるポテンシャル・キャッシュフローを表すものとする。なお、 $i = 0$ は建設期を表す。このとき、 R_i は以下のように定義することができる。

$$R_i = R_i^E + R_i^D \quad (1)$$

$$R_i^E = P_i^E \cdot Q \cdot W_i \quad (2)$$

$$R_i^D = P_i^D \cdot W_i + P_i^B \quad (3)$$

ただし、各変数は以下の表す。

R_i^E : 運営第 i 期における燃料化製品売却によるポテンシャル・キャッシュフロー

R_i^D : 運営第 i 期における脱水汚泥処分対価のポテンシャル・キャッシュフロー

P_i^E : 運営第 i 期における競合する代替的燃料の熱量 1GJ あたりの価格、

Q : 脱水汚泥 1 トンあたりから得られる熱量[GJ],

W_i : 運営第 i 期における脱水汚泥発生量[トン]

P_i^D : 運営第 i 期における脱水汚泥 1 トンあたりの焼却灰委託処分費

P_i^B : 焼却施設の年間維持管理費 (減価償却費含む)

事業にかかる費用は、設備建設のための費用 (イニシャルコスト) と事業運営のための費用 (ランニングコスト) に大別できる。運営第 i 期のランニングコストを C_i と表す。このとき、運営第 i 期のポテンシャル・純キャッシュフロー X_i は、

$$X_i = R_i - C_i \quad (4)$$

である。

(2) 信用リスク評価モデル

簡単のため、事業のイニシャルコスト I をすべて、債券発行 (レベニュー債) でまかなう場合を考える。いま、運営期間終了後 (運営第 T 期) に $I(1+r)^T$ だけ返済するレベニュー債を発行する。運営期間に発生した純キャッシュフローは、内部留保 (無リスク安全資産として運用) し、事業終了の運営第 T 期末に、事業期間中の全キャッシュフローが確定した時点で、返済が行われる。したがって、レベニュー債の債権者が獲得するペイオフは、

$$\pi = \max[A, K] \quad (5)$$

$$A = \sum_{i=1}^T X_i e^{r(T-i)} \quad (6)$$

と表すことができる。ただし、 r は無リスク利子率を表す。 A は、運営第 T 期末における累積純キャッシュフロー額を表している。ここで、任意の時刻 t ($\leq T$) における A に関する予想を $A(t)$ と表す。 $A(t)$ は、幾何ブラウン過程

$$\frac{dA(t)}{A(t)} = \mu dt - \sigma dw(t) \quad (7)$$

に従うと仮定する。ここで、 $A(t)$ は、初期時点 $t = 0$ から $t = T$ までの期間において存在する確率過程であり、 $t = T$ にその実現値が観測される。 μ は、予想できる時間的変化率を表すパラメーター、 σ はボラティリティを表すパラメーターである。

今、 $t = 0$ 時点における信用リスクを考慮したレベニュー債の価格を考える。ヨーロッパ・オプションの無裁定価格式 (Black-Scholes 式) から、 $t = 0$ 時点における債権者が獲得するペイオフの現在価値は、

$$E^*[pe^{-rT}] = I \cdot N(-\hat{d} + \sigma\sqrt{T}) - \bar{A} \cdot N(-\hat{d}) \quad (8)$$

$$\hat{d} = \frac{\log(\bar{A}/K) + rT}{\sigma\sqrt{T}} + \frac{\sigma\sqrt{T}}{2}$$

$$N(d) = \int_{-\infty}^d \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx$$

と与えられる。ただし、 $\bar{A} = A(0)$ である。

また、 $E^*[\cdot]$ はリスク中立確率のもとでの期待値操作を表す。したがって、割引債券価格は、

$$v = \bar{A} \cdot N(-\hat{d}) + I \cdot N(\hat{d} - \sigma\sqrt{T}) \quad (9)$$

と導くことができる。

(3) スキーム選択の効果

筆者等²⁾は、従来の地方債とレベニュー債や PFI 方式の本質的な違いは、債権者に対する行政の裁量的な債務保証が行われないというコミットメントの存在であると指摘した。債務保証をしないというコミットメントにより、下水汚泥エネルギー化事業の経営責任が明示的になり、その結果、経営者に対する努力インセンティブを付与できるという効果が期待される。

レベニュー債は、経営者に対する規律付けに対する正の効果が期待できる一方、債権者が負担する信用リスクは、地方債と比較して明らかに高い。その結果、レベニュー債の金利は、地方債よりも高くなるという負の効果も付随する。このようなコミットメントの効果を定量的

表-1 ケーススタディ技術的条件

項目	数値
脱水污泥処理能力	50t-脱水污泥/日
施設の耐用年数	20 年
計画脱水污泥処理量	40t-脱水污泥/日
稼働日数	330 日
年間脱水污泥処理量 (W)	13,200t-脱水污泥
固形燃料製造量	194kg/t-脱水污泥
固形燃料単位熱量	16.7MJ/kg-固形燃料
脱水污泥単位熱量 (Q)	3.24GJ/t-脱水污泥
固形燃料総熱量 (W・Q)	42,765GJ/年
石炭単位熱量	28GJ/t-石炭
代替的燃料の単位価格	10,000 円/t-石炭
石炭 1GJ 熱量あたりの価格 (P_i^F)	357 円/GJ-石炭
焼却灰委託処分費 (P_i^D)	8000 円/t-焼却灰
脱水污泥 1 トンあたり焼却灰発生量	0.037t-焼却灰/t-脱水污泥
焼却施設維持管理費 (P_i^B)	150.10 (百万円/年)

に示すことは容易ではない。したがって、本研究では、レベニュー債を用いたときと地方債を用いたときの金利差のみ定量的な評価を試みる。

4. ケーススタディ事例

(1) 条件設定

本研究では、固形燃料化技術を導入したケースを対象として事業性の評価を試みる。表-1 に示すような、技術及び市場に関する前提条件を設定する。一日あたり 50t-脱水污泥の消化污泥の処理能力を有し、平均 40t-脱水污泥、稼働日数を年間 330 日とし年間 13,200t-脱水污泥の消化污泥を処理する計画を考える。

下水污泥エネルギー化技術導入前の公営企業は、下水污泥を焼却処分した後に、焼却灰の埋立を委託している。

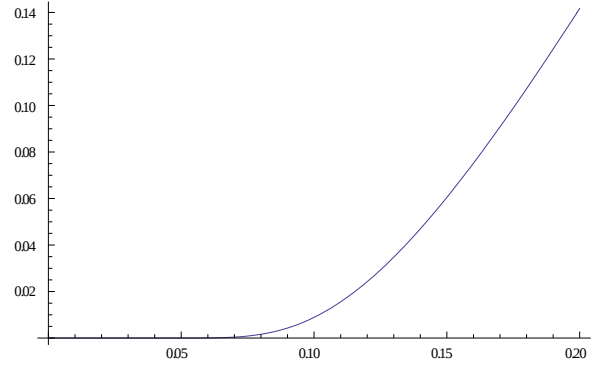
固形燃料化施設の固形燃料生産費用も含めた維持管理費は、下水污泥エネルギー化技術ガイドライン (案) にしたがって、 $C_i = 1.8697 \times 50 + 96.31 = 189.795$ (百万円/年) である。また、イニシャルコストは、

$I = 20.60$ (億円) と設定する。

一方、従来通り、焼却処分する場合に必要な費用は、同じく下水污泥エネルギー化技術ガイドライン (案) およびバイオリソッド利活用基本計画策定マニュアルの費用関数に基づいて、

$P_i^B = 204.32 + 197.81 = 402.13$ (百万円/年) と設定する。

第 0 期では、固形燃料の代替的燃料となる石炭の価格



横軸：ボラティリティ σ ，縦軸：信用スプレッド

図-2 ボラティリティと信用スプレッド

が運営全期間を通じて 10,000 円/トンであるとして、累積純キャッシュフロー額 $\bar{A}$ を想定する。このとき、任意の第 i 期において、 $R_i^F = 15.30$ (百万円/年)、 $R_i^D = 406.44$ (百万円/年) となる。したがって、

$$\bar{A} = \sum_{i=1}^{20} \frac{R_i^D + R_i^F - C_i}{(1+r)^i}$$

である。無リスク利子率は、2.0%すなわち $r = 0.020$ に設定する。また、満期におけるキャッシュフローに関する予想がしたがう幾何ブラウン過程のパラメーターは $\mu = 0$ とする。

(2) 計算結果

以上の前提条件の下で、以下の信用スプレッド $1 - v/I$ は、図-2 のように示すように、ボラティリティに依存する。上記ケースでは、 σ が 0.1 程度までの領域では、信用スプレッドは増加しないが、それ以外の領域では、ボラティリティの増加とともに、信用スプレッドが増加していることが分かる。ボラティリティが 0.1 のとき、0.89%であるのに対して、0.12 のとき 2.42%に上昇しており、ボラティリティが 0.1 を超えると、信用スプレッドが反応し始めることがわかる。

5. おわりに

本研究は、近年、地方自治体財政が逼迫する中で、真に必要な下水污泥エネルギー化技術の導入を検討するための事業評価手法を提案した。下水污泥エネルギー化事業では、生成した燃料化製品の売却リスクが、最も主要なリスク要因となる。本研究では、燃料化製品の売却リスクにともなうレベニュー債の信用リスクを考慮した債券価格の評価手法を提案した。レベニュー債の適用にあたっては、信用スプレッドにともなう割高な資金調達費用と、レベニュー債の規律付け機能の比較衡量を行い、資金調達スキームの最終的な意思決定が行われなければ

ならない。

本研究で提案した手法により、キャッシュフローのリスクを明示的に考慮したレベニュー債を活用した場合のコストを計算することが可能となる。しかし、結果の妥当性は、無論、適切なボラティリティの設定に依存する。また、キャッシュフローを幾何ブラウン運動として仮定しているが、この点についても、妥当性について検証する必要がある。

参考文献

- 1) 日本下水道協会 HP：各種統計
(<http://www.jswa.jp/data-room/data.html>) [アクセス日 2012 年 3 月 21 日]
- 2) 大西正光, 坂東弘, 小林潔司：下水汚泥エネルギー化技術導入のための代替的事業スキーム, 建設マネジメント問題に関する研究発表・討論会講演集, Vol. 30, I-4, 2012.
- 3) 国土交通省都市・地域整備局下水道部：下水汚泥エネルギー化技術ガイドライン (案), 2011.
- 4) 木島正明, 小守林克哉：信用リスク評価の数理モデル, 朝倉書店, 1999.
- 5) Black, F. and Scholes, M.: The pricing of options and corporate liabilities, Journal of Political Economy, Vol. 81, pp. 637-654, 1973.
- 6) Merton, R.C.: On the pricing of corporate debt: The risk structure of interest rates, Journal of Finance, Vol. 29, pp. 449-470, 1974.