土木学会論文集 No. 752／I-66, 169-178, 2004. 1

地震リスクを考慮した確率論的DCF法による資産価格とマネジメント

中村孝明[1]・星谷勝[2]・望月智也[3]

[1]正会員　博士（工学）　株式会社篠塚研究所（〒160-0023 東京都新宿区西新宿4-5-1 幸伸ビル新宿3F）
[2]正会員　Ph.D.　武蔵工業大学教授　工学部都市基盤工学科（〒158-8557 東京都世田谷区玉堤1-28-1）
[3]正会員　工修　株式会社イー・アール・エス（〒107-0052 東京都港区赤坂3-11-15 赤坂桔梗ビル3F）

DCF法に地震リスクを取り込む方法を提案し，地震リスクを考慮した資産の現在価値を示した．DCF法に適用する収益推計には，ランダムウォークによる確率過程を用いた．地震リスクについては，施設の供用期間に地震被害を2度以上は受けないことを仮定した推計モデルを提案し用いた．資産価格への地震リスクの影響度ならびに耐震補強の効果は，賃貸オフィスビルを対象とした数値解析により示した．そして，地震リスクマネジメントへの適用性について論じた．

Key Words : *discounted cash flow method, random walk model, discount rate, seismic risk management, life-cycle cost*

1．はじめに

経済のグローバル化が進み，国際的な取引や資本の移動が日常的に行われる中で，共通の理解や公平な取引が行われるよう会計基準の国際標準化が進んでいる．特に，キャッシュフロー計算書（上場企業を対象に2000年3月期より）の導入，ならびに資産の時価評価[1)]については，わが国の会計基準にも大きな変革をもたらしている．時価評価は，資産の価格を実勢価格として評価するもので，これまでのような帳簿上の価格では実情を反映していないことに起因している．評価手法としては，資産が生み出すキャッシュフローに着目し，これを一定の割引率で現在価値に割り戻す現在価値法が推奨されている．また，近年普及が著しい不動産の証券化実務においても，その鑑定評価に現在価値法が利用されている．一般にその方法は，DCF法（Discounted Cash Flow Method；割引現在価値法）[2),3)]と呼ばれている．DCF法は評価期間を設定した上で，将来のキャッシュフローを確定的に定めるのが通常である．ところが近年，不確実性を考慮した確率モデルを利用し，将来のキャッシュフローを推計する方法[4),5)]が注目されている．理由は，将来実現する収入は予想される収入から乖離する可能性があること，有形固定資産の場合，自然災害や事故・火災といった突然の災害による損失の可能性があることである．前者を変動リスク，後者を純粋リスクと呼ぶ．これらのリスクを考慮することにより，資産の価格は確率分布として求められることになり，より現実的かつ合理的な評価が可能になると考えられている[6),7)]．しかしながら，純粋リスクを確率変数としてDCF法に取り込む方法は現状では未整備であり，純粋リスクがどの程度資産価値を低下させるかは明らかにされていない．

一方，地震国であるわが国では，地震への備えは重要な課題であり，地震リスクを効率的に減らす対策を考えておかなければならない．そのための支援手法として，地震リスクを考慮した施設のライフサイクルコスト（LCC；Life-Cycle Cost）[8)~11)]を評価し，これを最小化する方法が提案されている．これは予定している支出のみに着目したLCCとは異なり，年間当りの地震損失期待値を含めた施設の供用期間の総支出であり，これを最小にすることで耐震対策の効率化が達成される．このとき地震損失期待値を含めた毎期の期待支出を供用期間にわたって総和することになるが，耐震投資の時期が異なったり，保険等の支出時期が多期にわたるような場合には，現在価値に割り引いた上でたし合わせなければならない．これは支出を含め将来の財の取引価値は，同じ額であっても取引時期によって異なることが理由である．

さて，前記したDCF法は収益に着目し資産価格を評価するのに対し，LCCは資産の期待支出を最小化することで効率的な資産管理を目指すものである．

これら2手法は，目的は異なるものの，資産のキャッシュフローに着目した収支評価モデルであることは共通している．ところが，前者は地震リスク等の純粋リスクを確率変数として取り入れておらず，後者は収益が考慮されていない．これら手法を統合することで，資産価格の評価ならびに耐震対策の効率化を可能にする合理的なモデルを提案することができると考える．

本論文は，DCF法を基本としたキャッシュフローに地震リスクを取り込む方法を提案する．そして，資産価格への地震リスクの影響度合いならびに地震リスクマネジメントへの適用性について検討する．

地震リスクについては，施設の供用期間の間に地震による被害を2度以上経験することは物理的にも，実感としても受け止めにくく，また地震被害を被った場合，補強などの対応策を実施するのが自然であるため，少なくとも同程度の地震に対しては再度被害を受けるような状況はないと考えるのが現実的である．このような現実的な対応を地震リスク評価に取り込むこととする．

2．DCF法と確率モデル

DCF法に使われる割引率は，将来時点で取引される財の利子率であり，身近なところでは預金の金利がこれに相当する．図-1は1年後の財の価値と現在の価値とが割引率で関係付けられることを示した概念図である．縦軸は1年後の財の価値，横軸は現在価値である．図中rは割引率である．1年後の財は，資産ならびにその資産から生まれる収入とから成るが，これに地震による損失が生じると考えている．キャッシュフローは資産からの収入と地震による損失である．現在から1年後の資産価値をv_1，1年後の収入c_1，地震損失s_1とすると，現在価値は以下のように求められる．

$$y = \frac{c_1 - s_1}{1+r} + \frac{v_1}{1+r} \tag{1}$$

式(1)は，yを所与とすることで同資産の利回りrを求めることができる．つまり割引率と利回りは利用性において異なるものの，基本的に同じである．

式(1)を多年度に拡張し，収入，地震損失を確率変数とするとn年間の収入ならびに地震リスクを考慮した現在の資産価値は次式により求めることができる．

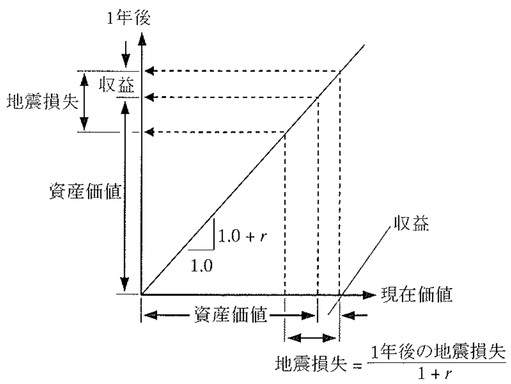


図-1　現在と1年後の財の価値の関係

$$Y^{(n)} = \sum_{i=1}^{n} (C_i + S_i) d_i + v_n d_n \tag{2}$$

ここに，$Y^{(n)}$は将来の収入に地震リスクを考慮した資産の割引現在価値，つまり資産価格の確率変数であり，添字(n)は評価期間nを意味する．C_iは収入から確定諸費用（管理費，公租公課，保険等）を差し引いたネット収益の確率変数，S_iは年間地震損失の確率変数であり，負として与える．v_nはn年後の資産価値であり，残存価値と呼ばれる．d_iは次式で示す割引係数（割引因子）である．なお残存価値は，本来確率変数として扱う必要があるが，本論文では便宜上確定的に扱う．

$$d_i = (1+r)^{-i} \tag{3}$$

式(2)が不確実性を考慮したDCF法の基本となる式である．資産価格$Y^{(n)}$は確率変数であることから，特定な値として示すことができず財務上不都合である．そこで，$Y^{(n)}$の超過確率関数を以下のように求める．

$$F_{Y^{(n)}}(y \mid r) = \int_{y}^{\infty} f_{Y^{(n)}}(\xi \mid r) d\xi \tag{4}$$

式(4)は，rを条件とした$Y^{(n)}$の超過確率関数であり，収入が変動するリスクならびに地震等による純粋リスクを含めた資産価値を求めることができる．概念図を図-2に示す．本論文ではこれをリスク・資産価格曲線と呼ぶ．

リスク・資産価格曲線は，所与である割引率rを条件とした資産固有のものであり，縦軸の確率は割引率と同意である利回りrが実現する確度や信頼度を示している．この利回りは，評価期間n年での平均的な利回りとなり，一般的には内部収益率[12)]と呼ぶ．同曲線は購入したい資産の価格，つまり妥当な投資額を評価するのに利用することができる．例えば，ある利回りrを0.9の確率で得たい場合には，投資額は100百万円以下であることが必要になる．式(2)に示すように，地震リスクを加えてリスク・資産価格曲線を求めれば，地震リスクによる資産価値の低下や耐震補強の効果を資産価値という視点から定量的に評価することができる．以下，詳細な定式化を示す．

式(2)に示すC_iとS_iは互いに独立であると仮定し，収益に関する部分と地震リスクの部分を以下のように分離する．

$$Y^{(n)} = Y_C^{(n)} + Y_S^{(n)} \tag{5}$$

ここに，右辺第1項はn年間のネット収益の現在価値，第2項はn年間の地震リスクの現在価値であり，それぞれは次式となる．

$$Y_C^{(n)} = \sum_{i=1}^{n} C_i d_i + v_n d_n \tag{6}$$

$$Y_S^{(n)} = \sum_{i=1}^{n} S_i d_i \tag{7}$$

なお，地震被害により収益は低下する可能性がある．このような収益と地震被害との相関性は，地震リスクに営業停止による損失を考慮することで対処することができる．

3．収益の推計

一般に，資産の収益率や収益の推計にはマルチンゲール過程[13),14)]が要求される．この理由は，t期の資産収益は$(t-1)$期に知りうる全ての情報によって蓋然的に既知であると考えることができるからである．マルチンゲールを式で表すと次のようになる．

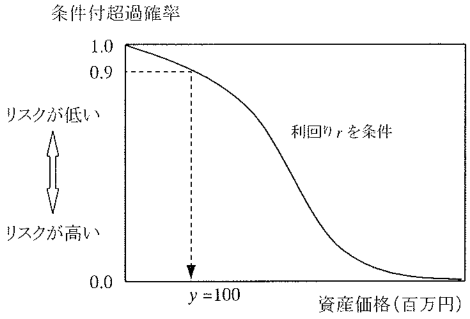


図-2 リスク・資産価格曲線の概念図

$$E(C_t \mid I_{t-1}) = C_{t-1} \tag{8}$$

ここに，I_{t-1}は$(t-1)$期に知りうる全ての情報である．このためC_{t-1}は既知であり，C_tの期待値はC_{t-1}と等しいと考える．

マルチンゲール過程の数学モデルとしてランダムウォーク[13),14)]があり，収入はランダムウォークに従うとするとt期の収益は次式のように表すことができる．

$$C_t = c_0 + \sum_{i=1}^{t} Z_i \quad Z_i \sim NID(\mu_Z, \sigma_Z^2) \tag{9}$$

ここに，c_0は初期値，$NID(\mu_Z, s_Z{}^2)$は平均μ_Z，標準偏差s_Zの独立の正規分布を表している．一般にμ_Zをドリフト成分，s_Zをボラティリティー(volatility)[12),14)]と呼ぶ．これにより，各期の収益は正規分布になる．なお，マルチンゲールを前提とした商業用賃貸不動産の精緻な資産価値評価モデルとして，刈屋[4)]の提案があるが，地震リスクを取り込むことを目的とする本論文としては，収益については単純にランダムウォークで記述できるものとする．また，ドリフト成分を与えることで，式(8)右辺にμ_Zが加算されることになり，厳密にはマルチンゲールを満足しない．この点については文献13),14)を参照されたい．

式(9)を式(6)に代入し，現在価値に割り戻すと次式のようになる．

$$Y_C^{(n)} = \sum_{i=1}^{n} c_0 d_i + \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{i} Z_j d_i + v_n d_n$$

$$= \sum_{i=1}^{n} c_0 d_i + \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=i}^{n} Z_i d_j + v_n d_n \qquad (10)$$

ここで，式(10)の右辺d_i, d_jの含まれる部分について次のように記述し簡便化する．

$$\sum_{j=k}^{n} d_j = d_{k \sim n} \qquad (11)$$

式(11)より，式(10)は次式のように書き換えられる．

$$Y_C^{(n)} = c_0 d_{1\sim n} + \sum_{i=1}^{n} Z_i d_{i\sim n} + v_n d_n \qquad (12)$$

したがって，$Y_C^{(n)}$の平均値$E(Y_C^{(n)})$ならびに分散$Var(Y_C^{(n)})$は以下のようになる．

$$E(Y_C^{(n)}) = c_0 d_{1\sim n} + \sum_{i=1}^{n} \mu_Z d_{i\sim n} + v_n d_n \qquad (13)$$

$$Var(Y_C^{(n)}) = \sum_{i=1}^{n} \sigma_Z^2 d_{i\sim n}^2 \qquad (14)$$

なお，現在価値に割り戻した価格は正規分布となることから，$Y_C^{(n)}$の確率分布は式(13),(14)により完全に記述することができる．

4．地震リスクの推計

(1) 年間当たりの地震リスク

式(7)中の地震リスクの現在価値$S_i d_i$を求めるためには，まず年間地震損失S_iの確率密度関数$f_S(s)$を求める必要がある．$f_S(s)$は施設の立地点の地震危険度ならびに施設の脆弱性から以下のように求められる．

$$f_S(s) = \sum_{all\, x_i} f_S(s \mid x_i) p(x_i) \qquad (15)$$

ここに，$f_S(s|x_i)$は施設の脆弱性を示し，地震動x_iの条件付損失確率密度関数[10),15),16)]，$p(x_i)$は立地点の地震危険度を示すもので，地震動x_iの年間当りの生起確率である．また，地震危険度として地震ハザード曲線を用いると，式(15)は以下のようになる．

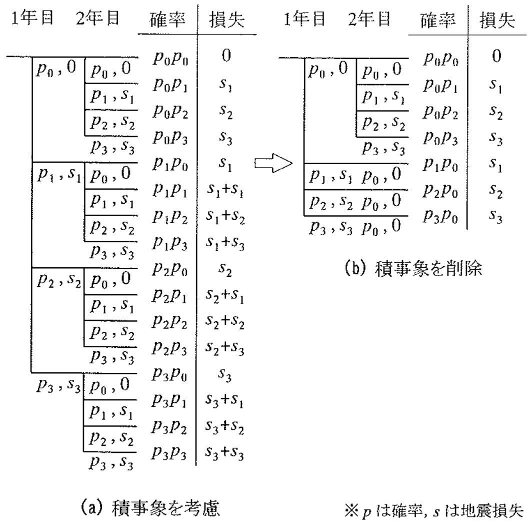


図-3 イベントツリーによる地震損失の確率分布の考え方

$$f_S(s) = \int_0^{\infty} f_S(s \mid x) h(x) dx \qquad (16)$$

ここに，$h_X(x)$は地震ハザード曲線$H_X(x)$から求められる導関数（$=-dH(x)/dx$）である．

(2) 地震リスクを考慮したLCCの考え方

LCCにおける地震リスクは，一般に，経年毎に年間当りの損失期待値を一定として累積していく．この考え方の前提には，地震の発生をポアソン過程と仮定した上で，以下のような和算をしていることになる．

$$S^{(n)} = \sum_{i=1}^{n} S_i \qquad S_i \sim iid(\mu_S, \sigma_S^2) \qquad (17)$$

ここに，$S^{(n)}$はn年間の損失，$iid(\mu_S, s_S^2)$は平均値μ_S, 標準偏差s_Sの任意の確率分布を表す．

$S^{(n)}$の期待値は以下のような年次に対する一次の増加関数となる．

$$E(S^{(n)}) = \sum_{i=1}^{n} E(S_i) = n\mu_S \qquad (18)$$

ところが，ポアソン過程では時間において事象は独立に発生することを仮定している都合上，供用期間

中に地震による損失を何度も経験するという実感とは乖離したものとなる．そこで以下3つを仮定する．

① 施設の供用期間中に被害地震が2度以上発生することは地盤の歪エネルギーの解放という観点から考えにくいこと
② 企業経営や資産運用において，明らかに損害あるいはダメージと認識される地震損失は，比較的大きい損失であること
③ 地震被害を被った場合，補強などの対策を実施するのが自然であり，少なくとも同程度の地震に対しては再度被害を受けるような状況にはならないこと

①は被害地震のような比較的規模の大きい地震に対しポアソン過程を仮定することは必ずしも妥当とは考えられないことが基本にある．②は例えば資産価値の1/1,000程度以下の損失は，損害として認識されることはないとの前提に基づくものである．③は災害からの学習によるもので，施設の脆弱性は改善されることになる．上記の仮定を前提に，n年間の地震損失確率密度関数$S^{(n)}$を求めることを考える．

$S^{(n)}$も含め一般的に，年間当りの地震損失の確率分布は，既往の分布モデルに当てはまらない任意の形状となることから，確率関数としてモデル化した上で，数値解析的な扱いをしなければならない．**図-3(a)**は地震損失確率関数の内,無被害を含め4つのシナリオを取り上げ，2年間に限りイベントツリーに展開したものである．独立を前提とすると分岐は16となる．図にはそれぞれの分岐確率ならびに損失額が示されている．①～③の仮定を用いると，**図-3(b)**に示すように積事象（評価期間で2回以上の損失）が削除され，分岐は7となる．供用期間をn年とすると，その間の地震損失確率関数$p_S(s_i)$は，以下のように一般化できる（付録参照）．

$$p_S(s_i) = np_0^{n-1}p_i \tag{19}$$

ここに，iは無被害を除く($i≠0$)確率変数の数，p_0は無被害の確率である．また本仮定では，積事象を削除するため確率の総和は1.0にならない．そこでn年間の無被害の確率$p_S(s_0=0.0)$については，積事象の確率を加えることとする．

以上の前提に基づくモデルを本論文では単一事象モデルと呼ぶことにする．式(19)からn年間の損失$S^{(n)}$の期待値は次式のようになる．

$$E(S^{(n)}) = np_0^{n-1}\sum_{all\, s_i} p_i s_i \tag{20}$$

表-1 イベントツリー解析の諸情報

被害誘因の要因	誘因事象	損失率	地震損傷度曲線のパラメタ x_m (cm/s²) 現状	補強	ζ
構造被害	軽微	0.05	345	449	0.40
	中破	0.10	830	1079	
	大破	0.30	1005	1508	
	倒壊	1.00	1140	1824	
電気設備被害	大破	0.12	520	936	0.45
衛生設備被害	大破	0.03	865	1038	0.45
空調設備被害	大破	0.11	525	945	0.45
防火設備被害	大破	0.01	790	948	0.45
地震火災	部分焼	0.10	2590	2590	0.71
	全焼	1.00	3695	3695	

・地震損傷度曲線は対数正規累積分布関数を仮定
・x_m, ζは中央値(工学的開放基盤面での最大加速度), 対数標準偏差

そして式(20)より，t年目の損失S_tの期待値は次式のようになる．

$$E(S_t) = E(S^{(t)}) - E(S^{(t+1)}) = p_0^{t-2}\sum_{all\, s_i} p_i s_i \{tp_0 - (t-1)\} \tag{21}$$

式(21)より，期待値は次式の条件において負となることが分かる．

$$t > \frac{1}{1-p_0} \tag{22}$$

式(22)が成立する状況は，評価期間が長期になり積事象すなわち2回以上の被害事象の発生確率が高くなる場合である．

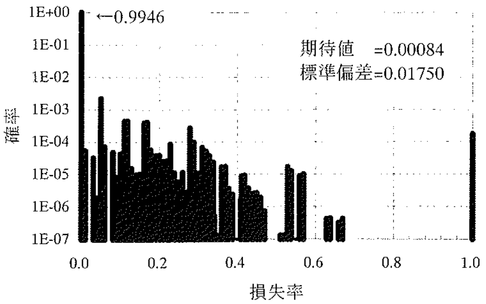
次に式(19)に割引を考慮する．この場合，式中の確率変数s_iに割引因子d_j (j=1～n)を乗じることで，次式のように書き換えられる（付録参照）．

$$p_S(s_i d_j) = p_0^{n-1}p_i \quad , j = 1 \sim n \tag{23}$$

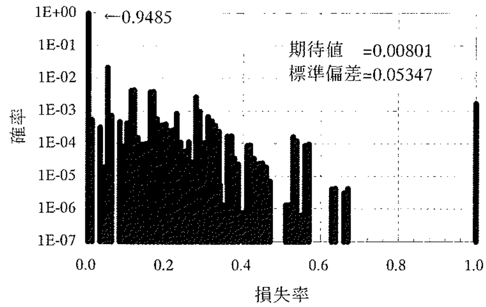
したがって，n年間の地震損失の割引現在価値の期待値は次式のようになる（付録参照）．

$$E(Y_S^{(n)}) = p_0^{n-1}\sum_{all\, s_i} p_i s_i d_{1\sim n} \tag{24}$$

以上より，地震リスクを考慮した資産価格は，式(12)で求められる割引現在価値と，式(23)で求められる現在価値に割り戻したn年間の地震損失の確率



(a) 今後1年間の確率関数



(b) 単一事象モデルによる今後10年間の確率関数

図-4 地震損失の確率関数

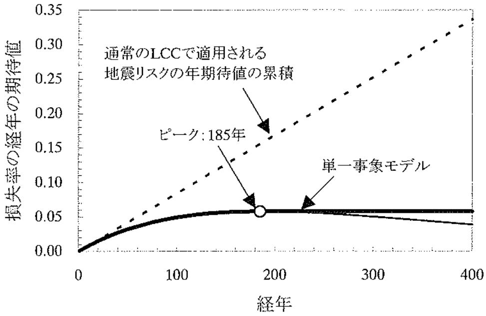


図-5 経年の期待値の比較(r=0%)

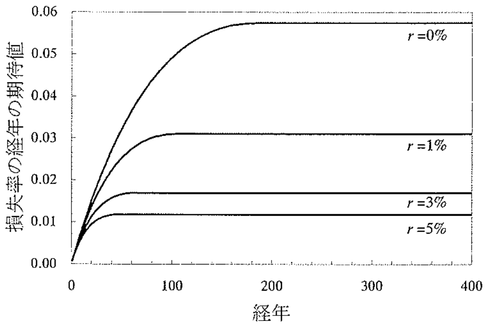


図-6 利回りと経年の期待値の比較

関数を式(5)に適用することで求められる．なお，地震損失の確率関数は既往の分布に当てはまらない任意の分布形をしていることから，式(5)の計算に当たっては数値積分を行う．

5．数値計算例

(1) 計算条件

適用性を検討するための対象資産は，文献17)を参照し東京に所在する11階建ての事務所ビルとする．なお，対象ビルは建設後10年（これを現在とする）が経ち，今後の供用期間として50年を想定する．

地震リスク算定に必要な損失の条件付確率分布は，文献17)と同様にイベントツリー解析を用いて算定する．イベントツリー解析に必要な諸情報[17)]は**表-1**に示すとおりとする．また地震ハザード曲線については建築物荷重指針[18)]を参照し次式で与える．

$$H_X(x) = \left\{100 \cdot (x/a_0)^{1/0.54}\right\}^{-1} \tag{25}$$

ここに，xは標準地盤の最大加速度（cm/s^2）で本計算ではこれを工学的開放基盤面での最大加速度とし，地盤増幅率は1.0とする．またa_0は基本最大加速度であり，その値はビルの所在地から200cm/s^{2}とする．

一方，対象資産の帳簿上の価格（以下簿価と略記）として3,992百万円（=土地価格1,588百万円+2,404百万円）を設定する．現状のネット収益をc_0=200百万円/年（初期値），収益のドリフト成分μ_Z=0.5百万円，ボラティリティーs_Z=1百万円を設定する．また，供用後の残存価値は便宜上現在の簿価の土地価格と等しいとし，v_n=1,588百万円を与える．

(2) 現状建物の地震リスクの算定

現在の地震損失確率関数とr=0%を条件に単一事象モデルにより算定した今後1年間と10年間の地震損失確率関数を**図-4**に示す．なお両図の横軸は，損失金額を簿価の建物価格で除した損失率であり，図に併記した期待値，標準偏差もこれに従い損失率で示している．また表記の都合上，縦軸の確率は10^{-7}以上を示している．

図-4より，今後10年間の地震損失確率関数は，今後1年間の地震損失確率関数に比べ，損失率0.0の確率が減少しそれ以外の確率が増加した分布となり，

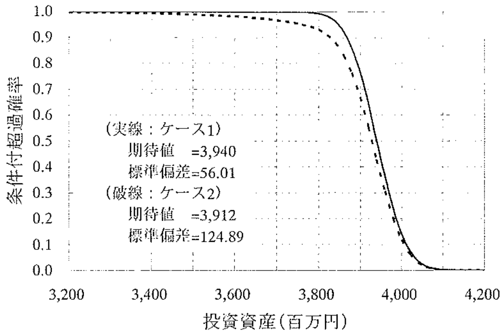


図-7 リスク・資産価格曲線の比較

表-2 任意の条件付超過確率に対する資産価格

条件付超過確率	資産価格（百万円） ケース1	ケース2	ケース3
0.99	3,808	3,465	3,610
0.98	3,824	3,613	3,666
0.97	3,834	3,684	3,688
0.96	3,842	3,731	3,702
0.95	3,847	3,762	3,711
0.90	3,868	3,827	3,741
0.70	3,910	3,893	3,787
0.50	3,940	3,929	3,815

・ケース1は地震リスクを考慮しない
・ケース2, 3は地震リスクを考慮（現状，補強）

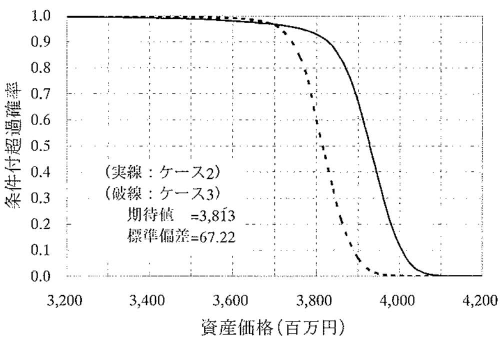


図-8 リスク・資産価格曲線（ケース2・ケース3の比較）

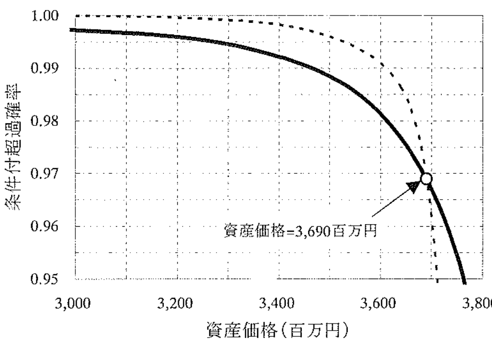


図-9 リスク・資産価格曲線（図-8の拡大図）

これに伴い期待値ならびに標準偏差も大きくなる．また，損失の発生は供用期間中に1度と仮定していることから，損失率の最大値は1.0を超えることはない．

次に，単一事象モデルの長期的な傾向を見るため，経年を400年とし，通常のLCCに適用される地震リスクの年期待値の累積（破線）と単一事象モデルによる経年の期待値（細実線）を**図-5**で比較する．双方の差は経年とともに大きくなり，単一事象モデルについては185年をピークに減少する結果を示している．同モデルの経年の期待値が減少するのは，2回以上の地震損失すなわち積事象を考慮していないことが理由である．減少に転じる期間は式(22)にて求められる．単一事象モデルは，地震リスクをより現実的に評価するモデルとして提案するものであるが，経年の期待値が減少することは現実性を失う．そこで，減少に転じる場合は，その時点の地震損失確率関数がそのまま永続すると考える．その場合の経年の期待値は**図-5**に示した太実線のようになる．この考え方に基づき，割引率を考慮した経年の期待値を**図-6**に示す．割引率はr=1%, 3%, 5%である．図には比較のためr=0%の場合も併記している．**図-6**より，当然ながらrが大きいほど経年の期待値は小さく，また減少に転じる時期も短くなる．

(3) 現状建物のリスク・資産価格曲線の算定

リスク・資産価格曲線の算定にあたり，文献19）におけるオフィスビルを対象とした割引率を参考にr=5%を設定し，リスク・資産価格曲線を算定したものを**図-7**に示す．図には，地震リスクを考慮しない場合（ケース1）と地震リスクを考慮した場合（ケース2）の曲線を示している．また，**図-7**と後述する耐震対策を施した場合のリスク・資産価格曲線から読み取った数値を**表-2**にまとめて示す．

図-7より，ケース2はケース1に比べ図の左側に現れ，また若干緩やかな曲線となっている．左側に現れたことは，収益から地震損失が支出として差引かれたことが理由であり，緩やかになったことは，地震損失のばらつきにより収益全体の不確定性が増加したことが理由である．支出としての平均的な減少分と不確定性の増加量は，図に併記した資産価格の期待値，標準偏差の差が目安となる．一方，条件

付超過確率に対応したケース1, 2の資産価格の差を比較すると，確率が高くなるに従いその差は大きくなる．これを表-2で確認すると，確率0.50では差が11百万円であったものが，確率0.99では343百万円と大きくなる．

以上より，リスク・資産価格曲線は資産価値を低下させる地震リスクの影響度を定量的に示すことができ，同時に地震リスクを考慮した資産価格の評価を可能にすることが分かる．ちなみに表-2の確率0.5より，ケース2は3,929百万円であり，簿価の3,992百万円より63百万円下がっていることが分かる．一方，縦軸の確率のとり方によって資産価格は多様となる．これは投資家や資産運用者のリスク受容度によって価格が変化することを意味する．しかしながら，実務上は価格を特定しなければ不都合であり，この点については広範な分野での議論に託したいと考える．

(4) 耐震対策と現状建物の比較

耐震補強を施した場合をケース3として図-8に，またその縦軸を拡大したものを図-9に示す．比較のため両図には，ケース2を併記している．耐震補強の費用は建物簿価の5%とし，1年目の収益から支出として差引く．

図-8より，ケース3はケース2に比べ図の左側に寄り，資産価格の期待値も3,912百万円から3,813百万円に減少している．これは，耐震補強費用が収益から差引かれたことが理由である．補強費用と地震リスクのみを考慮したLCCを算定（地震リスクは年期待値を累積）すると，耐震補強を施した場合のLCCは経年88年で現状のLCCよりも小さくなる．つまり，想定する供用期間50年では，耐震補強の効果は説明されないことになる．これらの結果から，耐震補強は無駄な出費であると判断されるが，リスク・資産価格曲線の3,690百万円以下ではこの傾向は逆転する（図-9参照）．これは補強対策により地震リスクが軽減されたことで，現状に比べ不確定性が減少したことによる効果である．資産価格の差を表-2で確認すると，確率0.50ではケース2の方が114百万円大きい値であるの対し，確率0.97ではケース3の方が4百万円，さらに確率0.99においてはケース3の方が145百万円大きい結果となっている．確実性を重視する資産管理運用を行うのであれば耐震補強の効果はあると判断される．なお，本例は限定された地域ならびに建物を対象としていること，地震損失に人命の価値や営業損失等を考慮していないこと，供用期間後の残存価値を土地価格としていること，などから結果は一般的な傾向を示すものではない．

キャッシュフローに着目した本モデルは，保険や積立て，ローンによる補強費用の捻出等，毎期定額が支出する対策についても容易に対処できる．また，耐震投資によるプラスの効果（収入や資産価格の増加）についても取り入れることができ，地震リスクマネジメントにおける意思決定の枠組みを広げることに貢献する．

6．まとめ

資産価値の評価を行う DCF 法に地震リスクを取り込む方法を提案した．地震リスクについては，施設の供用期間に被害地震を 2 度以上経験することは実感として受けとめ難いこと，被害を被った場合，補強などの対策を実施するのが自然であることを勘案し，少なくとも同程度の地震に対しては再度被害を受けるような状況はないと仮定した．そして東京に所在する事務所ビルを対象に，地震リスクの影響度をリスク・資産価格曲線により表現し，地震リスクを考慮した資産の時価評価ならびに耐震補強による効果を示すことで地震リスクマネジメントへの適用性について検討した．適用性の検討では以下の結論を得た．①リスク・資産価格曲線は，これまでのLCC では表現できなかった施設の役割や管理・運用者の資産運用スタイルやリスク受容度を反映することができる．②これにより，これまでの LCC では説明が難しい耐震補強についても説明できる可能性がある．

さて，公益を目的とした土木施設への耐震投資のあり方については，本例で示した私的財産を対象とした議論とは一線を画す必要がある．一方，土木施設であっても民活を取り入れることで効率的な管理が可能となる施設もある．このような施設の耐震対策については，採算性を考慮した合理的な判断の上に実施される必要がある．また，土木施設を多く抱えるライフライン企業や製造業，輸送業等においては，施設の時価評価については早急に整備しなければならない課題でもある．本論文で示した確率論的DCF法による資産価格評価ならびにマネジメントは，今後確実に進む資産の時価評価，ならびに耐震投資のあり方について，実質的な議論を可能にするものと期待している．

付録

付録図-1を用いて，本文中の式(19), (23), (24)を誘

導する．図は，n年間の地震損失確率関数の算出過程をイベントツリーで示したものであり，図中s_i, $p_i(i=1,\ 2)$は地震損失ならびにその生起確率，$d_j(j=1\sim n)$は現価率を表す．またp_0は各年の無被害の生起確率を表す．

A．式(19)の誘導

地震損失s_1, s_2について，積事象を省いたn年間の確率$p_S(s_1)$, $p_S(s_2)$は次式のようになる．

$$p_S(s_1) = {}_nC_1 p_0^{n-1} p_1 \qquad (付録\text{-}1)$$

$$p_S(s_2) = {}_nC_1 p_0^{n-1} p_2 \qquad (付録\text{-}2)$$

ここに，${}_nC_1$は2項係数である．

式(付録-1), (付録-2)より，無被害以外の地震損失をs_i,とすると，n年間の地震損失確率関数$p_S(s_i)$は以下のように一般化される．

$$p_S(s_i) = np_0^{n-1} p_i \qquad (付録\text{-}3)$$

以上より，本文中式(19)が誘導された．

B．式(23)の誘導

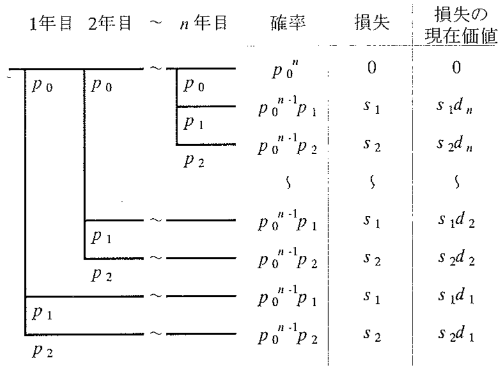
地震損失s_1について，これに割引を考慮した損失s_1d_j $(j=1\sim n)$のn年間の確率$p_S(s_1d_j)$は次式のようになる．

$$\begin{aligned} p_S(s_1d_1) &= p_0^{n-1} p_1 \\ p_S(s_1d_2) &= p_0^{n-1} p_1 \\ &\vdots \\ p_S(s_1d_n) &= p_0^{n-1} p_1 \end{aligned} \qquad (付録\text{-}4)$$

同様に地震損失s_2について，これに割引を考慮した損失s_2d_jのn年間の確率$p_S(s_2d_j)$は次式のようになる．

$$\begin{aligned} p_S(s_2d_1) &= p_0^{n-1} p_2 \\ p_S(s_2d_2) &= p_0^{n-1} p_2 \\ &\vdots \\ p_S(s_2d_n) &= p_0^{n-1} p_2 \end{aligned} \qquad (付録\text{-}5)$$

式(付録-4), (付録-5)より，無被害以外の地震損失の割引現在価値をs_id_jとすると，割引かれたn年間の地震損失確率関数$p_S(s_id_j)$は以下のように一般化される．



付録図－1 地震損失のn年間のイベントツリー

$$p_S(s_id_j) = p_0^{n-1} p_i \quad ,j = 1\sim n \qquad (付録\text{-}6)$$

以上より，本文中式(23)が誘導された．

C．式(24)の誘導

付録図-1より，割引かれたn年間の地震損失の期待値$E(Y_S^{(n)})$は次式で与えられる．

$$E(Y_S^{(n)}) = \sum_{all\, s_i} \sum_{j=1}^{n} p_S(s_id_j) s_i d_j \qquad (付録\text{-}7)$$

上式に式(付録-6)を代入すると次式のようになる．

$$E(Y_S^{(n)}) = p_0^{n-1} \sum_{all\, s_i} p_i s_i \sum_{j=1}^{n} d_j \qquad (付録\text{-}8)$$

さらに本文中の式(11)を代入すると，式(付録-8)は次式のようになる．

$$E(Y_S^{(n)}) = p_0^{n-1} \sum_{all\, s_i} p_i s_i d_{1\sim n} \qquad (付録\text{-}9)$$

以上より，本文中式(24)が誘導された．

参考文献

1) 西山茂: 企業分析シナリオ，東洋経済新報社，p.273, 2001.
2) 川口有一郎: 不動産金融工学, 清文社, p.423,2001.
3) 財団法人日本不動産研究所 投資不動産評価研究会編: 投資不動産の分析と評価, 東洋経済新報社, p.321, 2001.
4) 刈屋武昭: 不動産収益還元価値評価モデルと賃料キャ

ッシュフローのリスク分析法, 第1回日本不動産金融工学学会発表講演会pdf資料, http://www.kier.kyoto-u.ac.jp/fe/~kariya/articles/TK-article_jp046.html, 2000.
5) 川口有一郎: 不動産開発事業のためのダイナミックDCF法とリアルオプション評価モデル, 第2回日本不動産金融工学学会発表講演会pdf資料, http://keiken8.kier.kyotou.ac.jp/~fe/sympo_kawaguchi/index.html, 2001.
6) 財団法人日本不動産研究所: SAMを活用した不動産ポートフォリオ分析の試み, 不動産調査月報6/7月号,p.28, 2002.
7) 中村孝明: 不動産証券化のリスクマネジメント, 山海堂, p.237, 2001.
8) Chang, S. E. and Shinozuka, M.: Life-Cycle Cost Analysis with Natural Hazard Risk, *Journal of Infrastructure Syst.*, Vol.2, No.3, Sep., pp.118-126, 1996.
9) 塚田康夫, 木村雄一, 河村壮一: SRMによる免震建物のライフサイクルコスト評価, 第10回地震工学シンポジウム論文集, Vol.1, pp.241-246, 1998.
10) 星谷勝, 中村孝明: 構造物の地震リスクマネジメント, 山海堂, p.190, 2002.
11) 井関泰文, 増川淳二: ライフサイクル地震損失コストの考え方と事例, 第3回土木学会地震災害マネジメントセミナー資料集, pp.35-41, 2002.
12) 野村証券金融研究所: 金融工学辞典, 東洋経済新報社, p.423, 2001.
13) 箕谷千凰彦: ブラック・ショールズモデル, 東洋経済新報社, p.302, 2000.
14) 刈屋武昭, 小暮篤厚之: 金融工学入門, 東洋経済新報社, p.205, 2002.
15) 中村孝明: 地震リスクの定量化とマネジメントの実際, 地盤工学会, リスク工学の基礎理論と実務への応用に関する講習会資料, pp.21-30, 2002.
16) 兼森孝: リスク移転方法とリスクプライシング, 第3回土木学会地震災害マネジメントセミナー資料集,pp.27-34, 2002.
17) 望月智也, 中村孝明, 木村正彦, 星谷勝: 損失に対する主観金額を考慮した地震保険の最適化, 土木学会論文集, No.703/I-59, pp.203-210, 2002.
18) 社団法人日本建築学会: 建築物荷重指針・同解説, p.512, 1993.
19) 財団法人日本不動産研究所: 第6回不動産投資家調査結果, p.9, 2002.

(2003.3.19 受付)

ASSET PRICING ANALYSIS CONSIDERING SEISMIC RISK BY STOCHASTIC DISCOUNTED CASH FLOW METHOD

Takaaki NAKAMURA, Masaru HOSHIYA and Tomoya MOCHIZUKI

Civil engineering and architectural facilities can be characterized as an asset to produce income. In this study, a discounted cash flow method (DCF method) considering a seismic risk is proposed, and a methodology on how to evaluate a discounted present value of the asset pricing is presented with a conditional exceeding probability function of the asset pricing. In the DCF method, an estimation of income is based on a random walk model where as the seismic risk is associated with structural damages is based on a probabilistic model, in which losses by one earthquake event during service time are considered. Finally, the usefulness of the proposed method is demonstrated through a numerical example of a commercial building.