

損害額の変動を考慮した費用便益分析による災害リスクマネジメント

Disasters Risk Management by Using Cost-benefit Analysis on Consideration of Variance of Losses

岡崎 豪¹, 佐土原 聡², 矢代 晴実¹, 吉田 聡²

Takeshi OKAZAKI¹, Satoru SADOHARA², Harumi YASHIRO¹
and Satoshi YOSHIDA²

¹東京海上日動リスクコンサルティング株式会社 企業財産事業部

Property Risk Engineering Department, Tokio Marine & Nichido Risk Consulting Co., Ltd.

²横浜国立大学大学院 環境情報研究院

Graduate School of Environment and Information Sciences, Yokohama National University

Organizations that have introduced various risk management strategies often evaluate risk treatments for disasters by using cost-benefit analyses. However, cost-benefit analyses calculate benefits based on the expectation of losses inflicted by disasters and are not influenced by the fluctuation of losses. Therefore, we selected both expectation and Value at Risk as variables to develop a cost-benefit analysis in order to evaluate risk treatments. By such analyses, it is possible to determine the optimum policy condition of insurance and the optimum mitigation. In addition, we can evaluate the optimum risk treatment that combines insurance and mitigation.

Keywords: Cost-benefit Analysis, Risk Management, Mitigation, Insurance, Disaster

1. はじめに

近年、企業、自治体および非営利団体等の様々な組織は、自然災害リスク（以下、災害リスクと呼ぶ）への組織的、継続的な対処を目的として、危機管理、BCM（事業継続計画）、ERM（全社的リスクマネジメント）等のリスクマネジメントを導入してきている。そして、これらリスクマネジメントに必ず含まれるプロセスがリスク対策である。

リスク対策は、図1のように発生の頻度と損害額の関係から低減、回避、移転、保有の4つに分類することができる¹⁾。低減は発生の頻度や損害額を緩和する対策であり、回避は事業や業務の中止や撤退などの対策である。移転は保険会社などの第三者に資金的なリスクを移転する対策であり、保有は自己資金にて対応する対策である。また、低減は被害が発生する頻度を下げる防止策、損害額を軽減する緩和策に分けられる。

リスクマネジメントの構築においては、これらリスク対策の中から適切な対策を選択するだけでなく、必要に応じて複数の対策を組み合わせることが求められる。例えば、主体が企業である場合、自社で保有する施設への地震リスクに対して、緩和策には耐震補強があり、移転には国内の損害保険会社と契約する地震保険がある。そして、企業は、耐震補強と地震保険を組み合わせた最適なリスク対策を検討する必要がある。主体が政府である場合、政府が運営する地震保険や森林保険等の国営保険が対象となる。国営保険によって政府が引き受けた災害リスクに対して、緩和策には補助金の交付による耐震補

強等があり、移転には海外の保険会社と契約する再保険がある。すなわち、企業と同様、政府も緩和策と保険の組み合わせを検討する必要がある。

しかし、現状、緩和策と保険はそれぞれ独立して評価しており、緩和策と保険を組み合わせたリスク対策の評価手法が確立されていない。そのため、企業や政府が防災に投じている費用は最適でない可能性がある。企業や政府が個々のリスクに対して、適切なリスク対策を選択すれば、防災への費用も必要にして十分な金額となる。そして、個々の組織の災害への投資が適切な金額となれば、社会全体の災害への投資も適切な資本配分となることが期待できる。

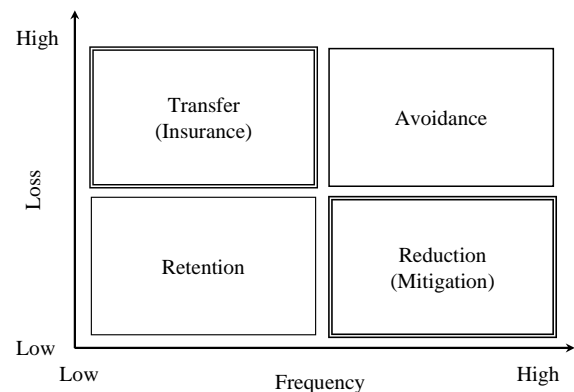


図1 頻度と損害額によるリスク対策の分類

2. 災害リスクの費用便益分析の考え方

本研究における最適なリスク対策は、費用に対する便益が最大となるリスク対策と定義する。そこで、費用便益分析に基づいてリスク対策の評価手法を検討した。費用便益分析は治水事業や道路建設などの公共事業の経済性を評価するために用いられてきた。近年、費用便益分析は組織のリスクマネジメントにも多数適用されてきており、投資に見合った効果の妥当性を評価するために活用されている。

緩和策による便益とは、災害による損害額の期待値の軽減額に相当する。例えば、日本の国土交通省²⁾の治水経済調査マニュアルでは、年間期待値を便益の指標とした費用便益分析から洪水防御施設の経済性を評価している。また、米国のFEMA³⁾のBenefit-Cost Analysisにおいても同様である。そして、評価の対象期間における現在価値化した総便益と総費用を算定した後、便益 B と費用 C の比である便益比(B/C)、便益 B と費用 C の差である純便益($B-C$)を評価する。便益比は費用の効率の指標であり、純便益は便益と費用の差を評価する指標である。図2に純便益と便益比の関係を示す。また、以下に便益比と純便益の評価式を示す。

$$B/C = \frac{\sum_{t=0}^T \frac{B_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=0}^T \frac{C_t}{(1+r)^t}} \quad [1]$$

$$B-C = \sum_{t=0}^T \frac{B_t}{(1+r)^t} - \sum_{t=0}^T \frac{C_t}{(1+r)^t} \quad [2]$$

ここで、 B_t は t 年目の便益の期待値、 C_t は t 年目の費用、 r は社会的割引率、 T は事業の継続年数を表す。

しかし、洪水、地震、台風等の災害リスクは、損害額は甚大となるが発生確率が低い特徴がある。そのため、期待値は大災害による損害額の寄与度が小さく、大災害以外による損害額の寄与度が大きくなる。緩和策は大災害時の損害額の軽減を目的とするため、期待値を緩和策の便益の指標としていることが問題となる。

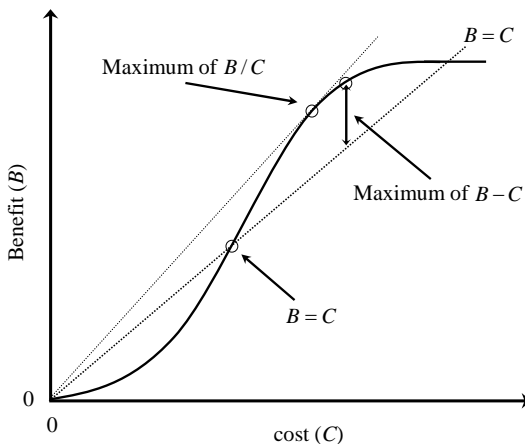


図2 便益比と純便益の関係

一方、最適な保険を費用便益分析から評価する研究は報告されていない。保険を費用便益分析から評価する場合、保険料と保険により得られる便益を比較することになる。しかし、保険による便益を期待値で評価する場合、付加保険料があるために便益は常に負の値となるためである。

以上の課題において、本研究では、災害リスクの特徴である損害額の変動に着目した。大規模災害が発生した

年の年間損害額は、大規模災害が発生していない年の数十倍～数百倍となるため、災害リスクの年間損害額の変動は非常に大きくなる。

保険は大規模災害による損害額の全部もしくは一部を保険会社に移転し、損害額の変動を小さくする効果がある。そのため、保険の便益においては、損害額の変動を考慮する必要がある。緩和策は大規模災害による損害額を軽減することにより、損害額の期待値のみならず変動を小さくする効果がある。そのため、緩和策の便益においても損害額の期待値だけでなく、損害額の変動を考慮する必要がある。以上から、保険と緩和策の便益を評価するためには、損害額の期待値だけでなく、損害額の変動を考慮することが重要となる。

次に損害額の変動を表す指標を選択する必要がある。変動を表す代表的な指標は標準偏差である。Kleindorfer and Kunreuther⁴⁾は保険会社が損害額の変動に備える費用は損害額の標準偏差から算出していると報告している。また、赤石沢ら⁵⁾は、地震保険への加入が企業財務に及ぼす影響を検討し、経常利益の期待値および標準偏差の差分に基づいた最適な保険の評価手法を考察した。これらの研究から、変動を表す有効な指標の1つとして、標準偏差があると言える。しかし、期待値と標準偏差を指標とする場合、本手法が適用できる災害が限定的となる。災害の損害額の中には、確率の母数何らかの理論分布に近似されない場合がある。そのため、任意の確率の母数に対して、適用が可能となる指標を選択することが望ましい。本研究では変動を表す指標に対して、金融工学の評価手法を参考とした。金融工学における変動を表す指標は、大きく3つに分類できる⁶⁾。1つ目がリスク感度度であり、基準となる経済指標や市場指標が1単位変動したときにポートフォリオの収益がどのくらい変動するかを評価した値である。2つ目がボラティリティであり、収益率分布の標準偏差もしくは分散を評価した値である。3つ目が下方リスクであり、将来の収益分布の下方部分だけに注目し、稀に発生する損害額を評価した値である。本研究では、3つ目の下方リスクの評価に着目した。下方リスクの典型的な指標はValue at Risk (VaR)である。VaRの定義は「将来の特定の期間内に、ある一定の確率の範囲内で起こりうる損害額の最大値」であり、図3にVaRの概念図を示す。VaRは任意の確率分布に適用できるのみならず、計算方法に多くのバリエーションがある利点がある。一方、VaRは確率分布の全体の情報が反映されない欠点がある。しかし、想定すべき大災害による損害額は確率分布のtailの部分に相当する。そのため、VaRは金融機関の金融資産へのリスク管理のみならず、損害保険会社の大災害へのリスク管理に活用されている。

以上から、保険と緩和策の便益を評価するため、期待値とVaRの2つの指標から便益を評価し、費用便益分析の評価式を導く手法を提案する(以下、本手法を μ -VaRモデルと呼ぶ)。本手法により、保険と緩和策のそれぞれの費用便益分析の評価式を導くことが可能となるだけでなく、保険と緩和策を組み合わせたりリスク対策の評価が可能となる。本手法は、被害軽減額の期待値とVaRから投資効果の評価しており、企業や政府はリスクプレミアムを考慮せずに、保険を含めた災害対策への投資効果を把握できるメリットがある。

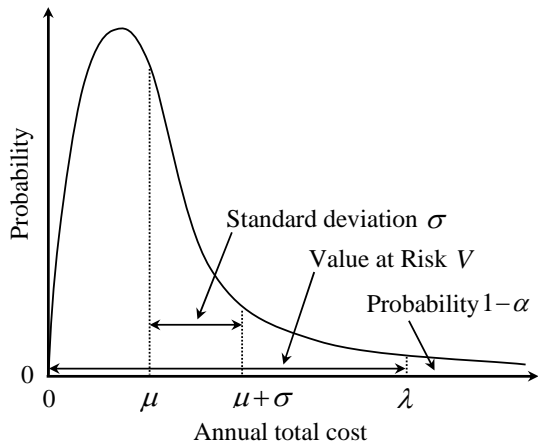


図3 Value at Risk (VaR)の概念図

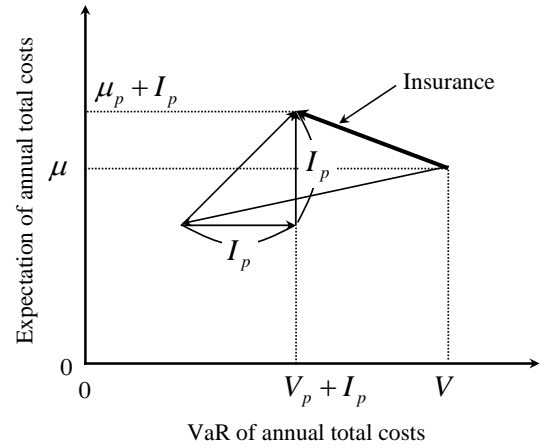


図4 保険による期待値とVaRの変化

3. 損害額の変動を考慮した費用便益分析

保険と緩和策のそれぞれに対する μ -VaR モデルに基づいた費用便益分析の評価式を示す。また、保険と緩和策を組み合わせたリスク対策の評価手法を示す。

(1) 保険の費用便益分析

保険が災害による年間損害額の期待値と VaR に及ぼす変化を図4に示す。災害による年間損害額の期待値 μ は式[3]で表せる。ここでの年間損害額の期待値とは、確率的な重み付けした年平均を意味する。 $\alpha \in (0,1)$ が与えられたとき、当該ポートフォリオに対する信頼水準 α の VaR V は、損害額 x が λ を超える確率が $1-\alpha$ 以下となる最小の λ の値であり、式[4]で表せる⁷⁾。

$$\mu = \sum_x x \cdot f(x) \quad [3]$$

$$V = \inf\{\lambda \in \mathcal{R} : f(x > \lambda) \leq 1-\alpha\} \quad [4]$$

x は災害による年間損害額、 $f(x)$ は年間損害額の確率分布である。保険の支払条件である支払限度額を l 、免責金額を d としたとき、保険の適用後における被保険者の年間損害額の期待値 μ_p と VaR V_p は式[5]、[6]で表される。また、ある値を超過する確率の分布である EP カーブ

(An exceedance probability curve) による保険の支払条件と期待値の関係を図5に示す。

$$\mu_p = \sum_x u_p(x, l, d) \cdot f(x) \quad [5]$$

$$V_p = \inf\{\lambda_p \in \mathcal{R} : f(u_p(x, l, d) > \lambda_p) \leq 1-\alpha\} \quad [6]$$

$$u_p(x, l, d) = \begin{cases} x-l & x \geq l+d \\ d & l+d > x \geq d \\ x & x < d \end{cases} \quad [7]$$

u_p は保険の適用後に被保険者が負担する年間損害額である。そして、保険により保険会社が負担する年間損害額の期待値 μ_c と VaR V_c を式[8]、[9]に示す。

$$\mu_c = \sum_x u_c(x, l, d) \cdot f(x) \quad [8]$$

$$V_c = \inf\{\lambda_c \in \mathcal{R} : f(u_c(x, l, d) > \lambda_c) \leq 1-\alpha\} \quad [9]$$

$$u_c(x, l, d) = \begin{cases} l & x \geq l+d \\ x-d & l+d > x \geq d \\ 0 & x < d \end{cases} \quad [10]$$

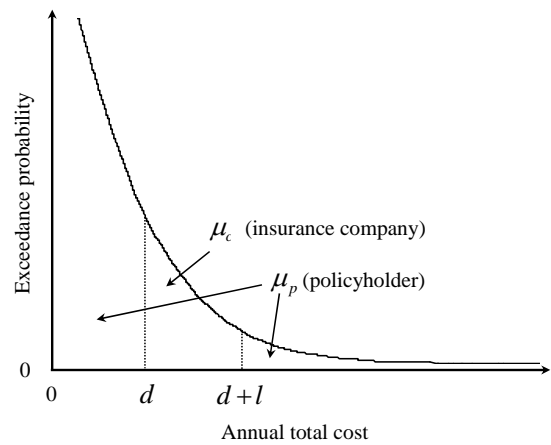


図5 EPカーブによる保険の支払条件と期待値の関係

ここで、 u_c は保険の適用後に保険会社が負担する年間損害額である。保険により年間損害額は被保険者と保険会社で分担することになるが、合計額は変化しないため、次の関係が成り立つ。

$$\mu = \mu_p + \mu_c \quad [11]$$

保険会社に移転した年間損害額の期待値 μ_c は保険の純保険料に相当する。そして、年間保険料 I_p は純保険料に安全割増 k を加味した式[12]により表される⁸⁾。安全割増に純保険料を乗じた金額は付加保険料と保険会社が損害額の変動に備えるための費用に相当する。

$$I_p = \mu_c \cdot (1+k) \quad [12]$$

保険による対策後の被保険者の年間総費用の期待値 $\hat{\mu}_p$ は、年間損害額の期待値 μ_p と年間保険料 I_p の合計により表される。

$$\hat{\mu}_p = \mu_p + I_p \quad [13]$$

ここで、年間総費用とは災害による年間損害額と年間対策費用の合計を意味する。年間総費用の VaR \hat{V}_p は、年間損害額の VaR V_p と年間保険料 I_p の合計により、次の式で表される。

$$\hat{V}_p = V_p + I_p \quad [14]$$

次に保険の費用便益分析の評価式を示す。費用便益分析の評価式には便益比と純便益の2つがあり、便益の指標には期待値と VaR の2つがあるため、4通りの費用便益分析の評価式が導ける。ただし、保険による便益を期

保険による補正後の期待値の便益比 $(\hat{B}/C)_r$ を次式に示す。

$$(\hat{B}/C)_r = \frac{\mu_p + I_p - \mu_r}{I_r} \quad [24]$$

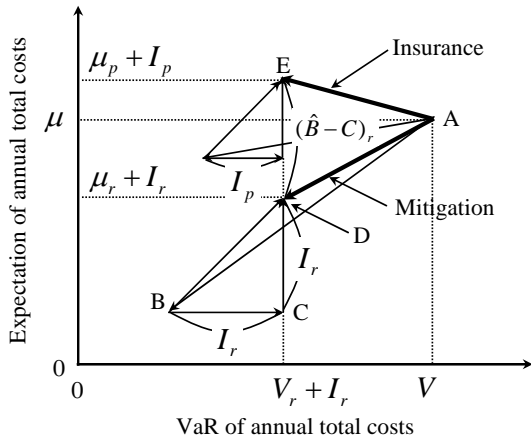


図7 緩和策による期待値と VaR の変化 (保険による VaR の補正後)

期待値の純便益においても保険による補正を反映させる。保険による補正後の期待値の純便益 $(\hat{B}-C)_r$ を次式に示す。

$$(\hat{B}-C)_r = (\mu_p + I_p - \mu_r) - I_r \quad [25]$$

$$= (\mu_p + I_p) - (\mu_r + I_r)$$

期待値の純便益 $(\hat{B}-C)_r$ は、図7の点Eと点Dの期待値の差に相当する。式[24]の期待値の便益比 $(\hat{B}/C)_r$ は費用の効率を評価する式であり、式[25]の期待値の純便益 $(\hat{B}-C)_r$ は便益と費用の差を評価する式である。以上から緩和策の費用便益分析は式[24]、[25]の2つの式となる。

(3) 保険と緩和策を組み合わせた対策の評価手法

緩和策は災害による個々の損害額を低減する効果があるが、保険にその効果はない。保険と緩和策の組み合わせにおいては、保険よりも緩和策を先に適用する必要がある。この緩和策と保険の優先順位の決め方は、式[25]の期待値の純便益 $(\hat{B}-C)_r$ から導ける。純便益 $(\hat{B}-C)_r$ における VaR の補正のために適用した保険は、VaR の便益比 $(B/C)_p$ が最大となるものである。すなわち、補正のために適用した保険は、費用便益分析に基づいた最適な保険を意味する。そのため、期待値の純便益 $(\hat{B}-C)_r$ は最適な保険を適用した後の期待値 $\mu_p + I_p$ と最適な緩和策を適用した後の期待値 $\mu_r + I_r$ の差に相当する。すなわち、期待値の純便益 $(\hat{B}-C)_r$ が正であれば、同じ VaR において最適な緩和策は最適な保険よりも期待値を低下させる効果が大きくなる。この場合、緩和策は保険よりも優先して適用する。そして、緩和策の適用後、組織の財務力に応じた許容限度の範囲内において、VaR の便益比 $(B/C)_p$ が最大となる保険を適用する。一方、期待値の純便益 $(\hat{B}-C)_r$ が負であれば、同じ VaR において最適な保険は最適な緩和策よりも期待値を低下させる効果が大きくなる。同時に期待値の純便益 $(\hat{B}-C)_r$ が負である場合、緩和策の適用後は適用前よりも期待値が増加することを意味するため、この緩和策は適用しない。そして、組織の財務力に応じた許容限度の範囲内において、VaR の便益比 $(B/C)_p$ が最大となる保険のみを適用する。こ

の期待値の純便益 $(\hat{B}-C)_r$ から保険と緩和策を比較し、適用の優先順位を決める考え方は常に成り立つ。

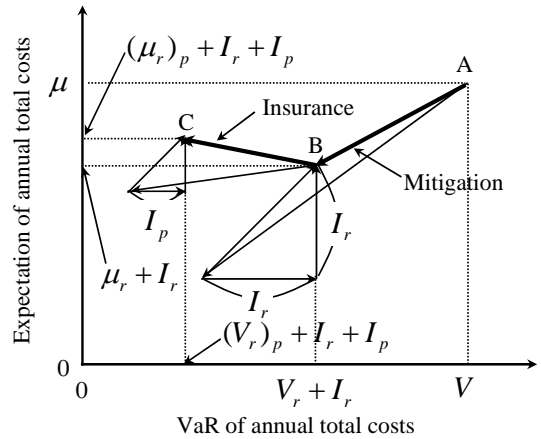


図8 緩和策の後に保険を適用したときの期待値と VaR の変化

4. ケーススタディ

我が国の災害に対して本手法を適用し、リスク対策を検討した例を示す。災害は台風による国有林の風害リスクとし、台風シミュレーションモデルにより確率論的に風害リスクを評価した。対象は政府であり、国営の森林保険を運営する立場とする。国営の森林保険により、法人や個人の森林の災害リスクはすべて政府に移転しているとすると、政府が海外の保険会社と契約する再保険と緩和策の組み合わせを検討するケースとする。

台風シミュレーションモデルの評価の手順を図9に示す。評価の手順に沿って、仮想的な台風の発生方法、風速の評価方法、植生データ、森林の損害額の評価手法、リスク対策の設定などを示す。

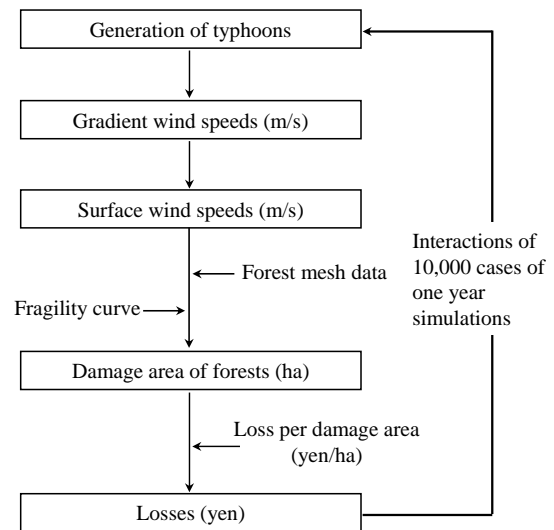


図9 台風シミュレーションモデルの評価の手順

(1) 台風シミュレーションモデルの概要と用途

台風シミュレーションモデルは、中心気圧などのパラ

メーターを確率分布として構築し、確率分布に乱数を適用することで仮想的な台風を数万通り発生させるモンテカルロシミュレーションである。台風を数万通り発生させることで観測期間を超えた再現期間の風速を求めることが可能となり、橋梁や高層建築物を設計する際の風荷重の評価、損害保険会社が巨大災害に備えるための準備金の評価、地球温暖化の影響を反映した極値風速による風災被害の評価⁹⁾などに活用されている。

(2) 仮想的な台風の発生方法

日本の太平洋沿岸に沿って境界線を設定する。そして、過去の約 60 年間に於いてその境界線を通過した台風の個数から、回帰分析により年間個数のポアソン分布を構築する。次に境界線を通過した台風の観測記録から台風の中心気圧、進行速度、進行角度、最大旋衡風速半径等の台風パラメーターの確率分布を構築する。そして、それらの確率分布に乱数を適用することにより、台風の年間個数とそれぞれの台風パラメーターを設定する。仮想台風の例を図 10 に示す。本研究では、1 年間のシミュレーションを 10,000 通り繰り返している。

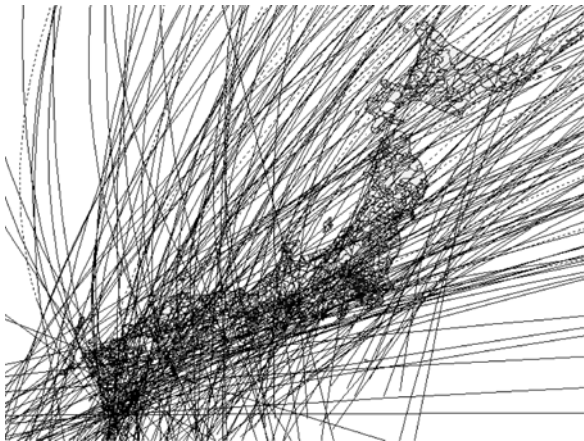


図 10 モンテカルロシミュレーションによる仮想台風のイメージ

(3) 風速の評価方法

多くの台風シミュレーションモデルは気圧分布から求めた傾度風速を介して地表風速を評価しており、本モデルでも同様の手法を選択している。Holland¹⁰⁾は発達した台風の気圧場はその等圧線が同心円状になり、中心からの距離の関数として表されると報告している。また、日本本土南方海域の中心気圧 985hPa 以下の台風の強風域内では、等圧線はほぼ同心円に分布するとみなせることが Fujii and Mitsuta¹¹⁾によって報告されており、本モデルでもこの気圧場の設定に基づいた傾度風速の式を適用した。

地表風速の評価方法は、岡崎・石原¹²⁾が提案した地表面粗度と地形の効果を反映した評価手法を適用した。同手法はナビエストークス方程式と連続の式を離散的に解く非線形風況予測モデル MASCOT^{13), 14)}を用いることで、日本全国の各地点における地表面粗度と地形の影響を反映した地表風速を評価することを可能としている。例として、2004 年の台風 18 号における地表風速の分布を図 11 に示す。地表風速は地表からの高さ 10m における 10 分間平均の風速である。また、地表風速は約 1km メッシュの解像度で評価している。

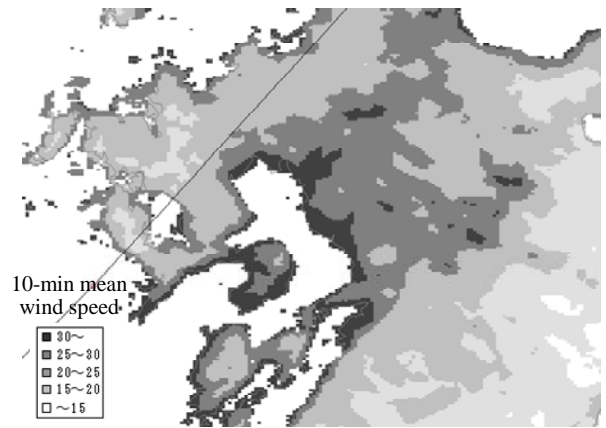


図 11 台風シミュレーションモデルによる 2004 年台風 18 号の最大風速の分布

(4) 植生データ

植生データは環境省自然環境局生物多様性センター¹⁵⁾が作成した植生調査 3 次メッシュデータを使用した。同データはランドサット TM または MSS の衛星画像をもとに作成されており、3 次メッシュのメッシュ幅は約 1km となる。そして、同データのうち、針葉樹人工林（スギ・ヒノキ・サワラ植林）を評価の対象とした。これら針葉樹人工林は、台風による被害が発生しやすい特徴がある。全国の針葉樹人工林のメッシュ数は 58,986 であり、植生分布を図 12 に示す。これら針葉樹人工林には国有林だけでなく、民有林も含まれるが、国営の森林保険により法人や個人の森林の災害リスクはすべて政府に移転しているとする。

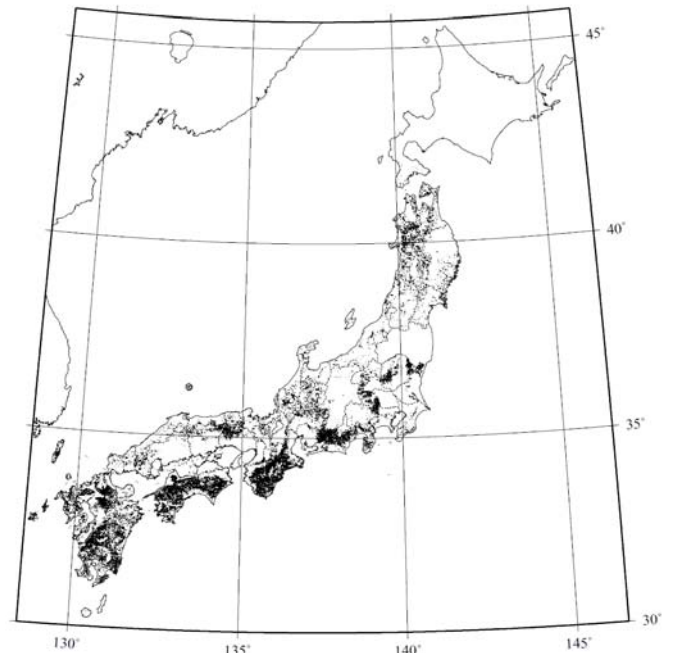


図 12 針葉樹人工林（スギ・ヒノキ・サワラ植林）の分布図¹⁵⁾

(5) 森林の損害額の評価方法

森林の損害額を評価するためには、地表風速に対する被災率の関係式が必要となる。被災率とはメッシュ毎の森林の面積（約 1km²）に対する風害が発生した面積の割

合を意味する。本研究では佐藤・阿部¹⁶⁾が2004年の台風18号による北海道の被災地調査から構築した最大風速と被災率の関係式を適用した。関係式はロジスティック回帰分析により求めた以下の式で表される。

$$p(v_i) = \begin{cases} \frac{1}{1+e^{-Z}} & v_i \geq v_0 \\ 0 & v_i < v_0 \end{cases} \quad [26]$$

$$Z = \beta_0 + \beta_1 \cdot v_i \quad [27]$$

ここで、 v_i は3次メッシュの各地点*i*における最大風速(m/s)、 $p(v_i)$ は被災率である。 v_0 は最大風速の閾値であり、2004年台風18号の再現解析を行い、北海道内の被災面積の計算値が実績値と一致する $v_0 = 11.9$ (m/s)とした。針葉樹人工林の係数は $\beta_0 = -5.53$ 、 $\beta_1 = 0.137$ となる。針葉樹人工林の関係式をカラマツ人工林、トドマツ人工林、天然林と比較した結果を図13に示す。

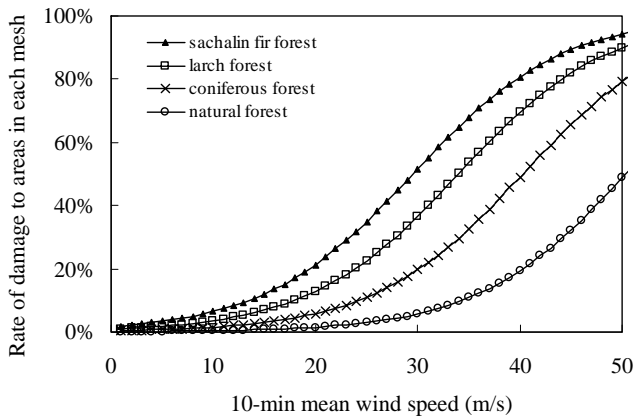


図13 最大風速に対する森林の被災率

被災率は面積の割合を意味するため、被災率からメッシュ毎の被災面積に変換する。そして、被災面積(ha)に1haあたりの損害額(円/ha)を乗じることで損害額(円)を評価する。

全国合計の年間損害額 L は次の式により表せる。

$$L = \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^n p(v_i) \cdot A \cdot h_1 \cdot h_2 \quad [28]$$

ここで、 N は年間に上陸する台風の個数、 n は全国のメッシュ数、 A は1メッシュあたりの面積(100ha)である。 h_1 は1haあたりの損害額0.322(百万円/ha)であり、北海道林務局¹⁷⁾が集計した2004年の台風18号の北海道における森林災害の実績を参考とした。 h_2 は木材価値の変換係数1.33である。2004年台風18号による北海道の被災ではエゾマツ・トドマツが多くを占めたことから、森林保険ハンドブック¹⁸⁾の保険価額の基準表を参考として、針葉樹人工林の木材価値に変換した。

(6) リスク対策の設定

森林の風害リスクに対して、再保険と緩和策を適用する。再保険の考え方と費用便益分析は保険と同じとなる(以下、再保険を保険と呼ぶ)。保険の支払条件は、支払限度額を1,000、2,000億円とした2通り、免責金額を600億円から1,600億円まで200億円刻みとした6通りと

し、計12通り(=2×6)を設定した。保険の支払条件は財務力に応じた許容限度から設定されるが、これら12通りの支払条件はすべて許容限度の範囲内であるとする。安全割増 k は0.5を適用した。

緩和策は間伐とした。間伐は森林の風害を緩和することが知られている。稲垣¹⁹⁾は風倒木が発生した植林の地盤の状況を調べたところ、間伐の行われていない植林は根系の発達が悪く、風倒木が発生しやすいと報告している。また、佐藤・阿部¹⁶⁾は2004年台風18号の被災地調査から平均的な間伐間隔を超えると込み合い度が徐々に高まり、風倒被害に遭いやすくなると報告している。以上から、緩和策は間伐とし、風害の被害確率を50%減少する効果があったとした。そして、全国の針葉樹人工林を対象として、間伐する面積の割合を5%から35%まで5%刻みとした7通りの緩和策を設定した。間伐する全国面積の割合に対する年間費用を表1に示す。全国の未間伐の割合は農林水産省の標本調査²⁰⁾の結果から30%と設定した。標本調査はいくつかの森林を無作為に選んでおり、地域的な割合は調査していないことから、全国で同じ割合を適用した。また間伐の年間費用は木材価値の向上による収入分を控除した6.4(千円/ha)と設定した。

表1 緩和策の設定(間伐する全国面積の割合に対する年間費用)

Case	Rate of thinning areas (%)	Annual cost (billion yen)
1	5	1.9
2	10	3.8
3	15	5.7
4	20	7.6
5	25	9.5
6	30	11.4
7	35	13.3

5. 結果

台風シミュレーションモデルにより針葉樹人工林の風害リスクを評価した結果を示す。そして、保険と緩和策のそれぞれの最適な設定、及び組み合わせた対策を費用便益分析により評価した結果を示す。

(1) 針葉樹人工林の風害リスクの評価結果

台風シミュレーションモデルにより針葉樹人工林の風害リスクを評価した結果、年間損害額の期待値は639億円、信頼水準99%のVaRは2,418億円となる。

様々な信頼水準 α によるVaRの結果を図14に示す。台風シミュレーションモデルでは、1年間のシミュレーションを10,000通り繰り返すことにより、10,000通りの年間損害額の結果を得ている。10,000通りの年間損害額において、例えば上位から超過確率1/100に相当する年間損害額が信頼水準99%のVaRであり、再現期間100年に相当する。

信頼水準90%のVaR(再現期間10年)の年間損害額は期待値の約2.2倍、信頼水準99%のVaR(再現期間100年)の年間損害額は期待値の約3.8倍、信頼水準99.9%のVaR(再現期間1,000年)の年間損害額は期待値の約5.1倍であり、再現期間が大きくなっても年間損害額は極端に大きくならない。例えば、建築物などの物的損害の場合、再現期間が大きくなるにつれて仮想台風が大都市圏などの

住宅密集地を襲うケースが多くなり、年間損害額は極端に大きくなる。針葉樹人工林は建築物ほど密集しておらず、全国に分散して植林されているため、年間損害額は極端に大きくならない結果になったと考えられる。

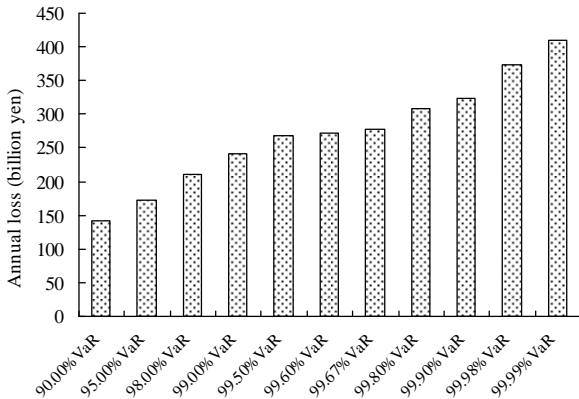


図14 針葉樹人工林の年間損害額のVaR

(2) 保険の費用便益分析の結果

4.(6)節で設定した12通りの支払条件の中から最適な保険を評価する。被保険者である政府の立場における式[15]のVaRの便益比 $(B/C)_p$ の結果を図15に示す。信頼性水準 α は99%である。同図から、支払条件が免責金額1,600億円、支払限度額1,000億円の場合に便益比 $(B/C)_p$ が最も大きくなることを確認した。また、免責金額が大きいほど便益比 $(B/C)_p$ は大きい結果となる。

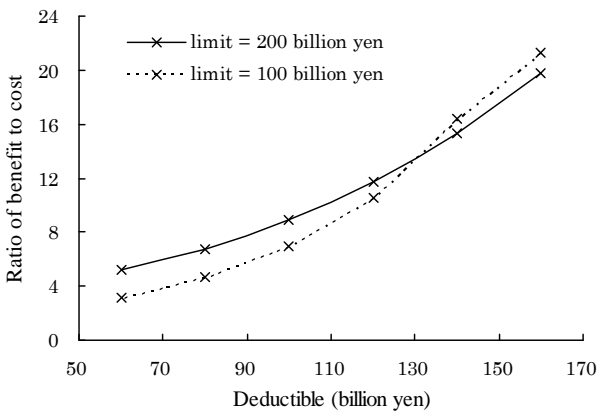


図15 保険によるVaRの便益比 $(B/C)_p$

12通りの支払条件の保険を付保したときの期待値とVaRの変化を図16に示す。点Aは保険を適用する前、点Bは図15から得られた支払限度額1,000億円、免責金額1,600億円の最適な保険を適用した後である。

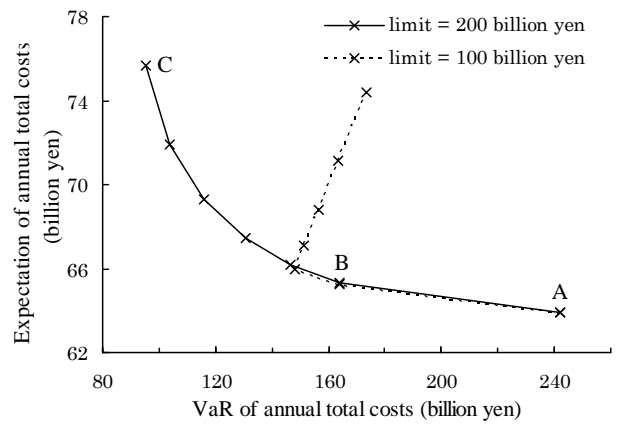


図16 保険による期待値とVaRの変化

(3) 緩和策の費用便益分析の結果

4.(6)節で設定した7通りの中から最適な緩和策を評価する。式[25]の期待値の純便益 $(\hat{B}-C)_r$ に適用した結果を図17に示す。信頼性水準 α は99%である。同図からCase 6の期待値の純便益 $(\hat{B}-C)_r$ が最も大きくなることが確認できる。Case 7はCase 6よりも年間費用は大きい、期待値の純便益 $(\hat{B}-C)_r$ はCase 6よりも小さくなる。この原因は全国の針葉樹人工林において、間伐が行われていない面積の割合は30%であり、30%以上の面積の範囲に間伐を施しても効果は30%の面積に限られるためである。

式[24]の期待値の便益比 $(\hat{B}/C)_r$ に適用した結果を図18に示す。同図からCase 1~6の期待値の便益比 $(\hat{B}/C)_r$ は差が殆どなく、値が1.0を超えていることから、Case 1~6が適切な選択肢となる。したがって、図17の期待値の純便益 $(\hat{B}-C)_r$ と図18の期待値の便益比 $(\hat{B}/C)_r$ の結果から、Case 6が最適な緩和策であると判断できる。

緩和策による期待値とVaRの変化を図19に示す。点Aが対策前であり、Case 1~7の緩和策の適用後が点 $B_1 \sim B_7$ となる。最もVaRが低い点が点 B_6 であるため、点 $B_1 \sim B_7$ のVaRを点 B_6 に合わせる必要がある。保険を適用し、点A、 $B_1 \sim B_5$ 、 B_7 のVaRを点 B_6 と同じとなるように補正した点が点 A' 、 $B'_1 \sim B'_5$ 、 B'_7 となる。この補正のために適用した保険の支払条件は5.(2)節の結果から支払限度額は1,000億円とし、免責金額は最小二乗法によって求めた。そして、点 A' 、 $B'_1 \sim B'_5$ 、 B_6 、 B'_7 を比較したとき、点 B_6 が最も低い期待値となり、Case 6が最適な緩和策と判断できる。

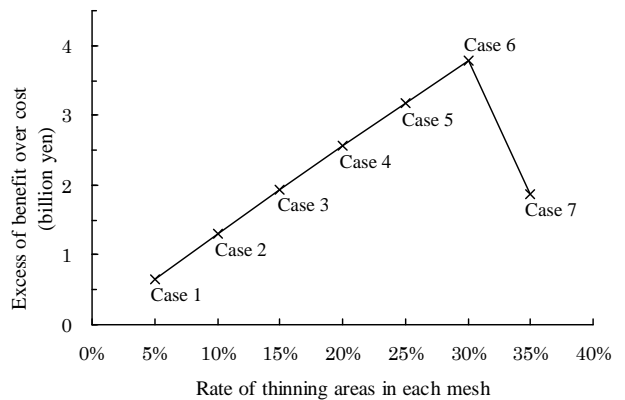


図17 緩和策による期待値の純便益 $(\hat{B}-C)_r$

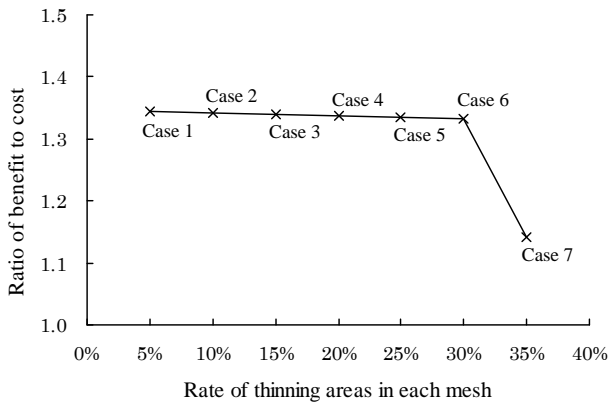


図18 緩和策による期待値の便益比(\hat{B}/C),

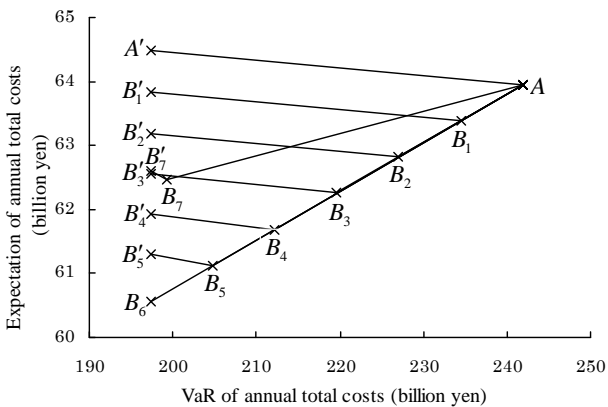


図19 緩和策による期待値とVaRの変化

(4) 保険と緩和策を組み合わせたリスク対策の結果

Case 1~7の緩和策に対して、5.(3)節の結果から Case 6が最適な対策となる。また、Case 6の期待値の純便益($\hat{B}-C$)が正であるため、同じ VaR において緩和策は保険よりも期待値を低下させる効果大きい。そのため、先に緩和策を適用し、次に保険を適用するリスク対策が適している。緩和策の後に適用する保険は 4.(6)節で設定した 12通りの支払条件の中から選定する。VaRの便益比(B/C)_pを評価した結果、保険の支払条件は 5.(2)節の結果と同様、免責金額が 1,600億円、支払限度額が 1,000億円となる。

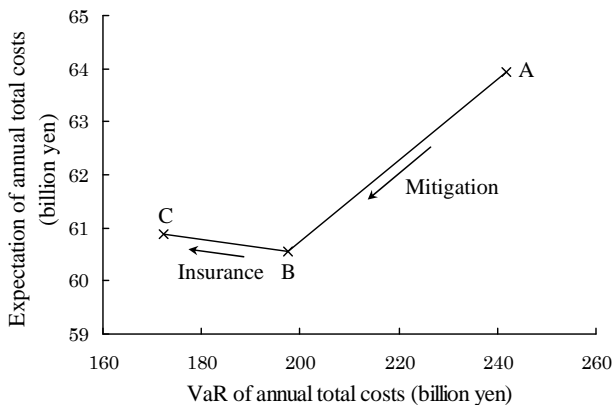


図20 保険と緩和策を組み合わせたリスク対策による期待値とVaRの変化

図20に緩和策と保険の組み合わせによる期待値とVaRの変化の結果を示す。信頼性水準 α は99%である。点Aが緩和策を適用する前、点Bが適用した後である。そして、点Cが点Bに保険を付保した後である。点Cが緩和策と保険を組み合わせた最適なリスク対策の適用後となる。点Cは点Aよりも期待値が2%減少し、VaRが29%減少する。緩和策の年間費用は113.7億円、保険の年間保険料は9.6億円となる。

6. 考察

適切なリスクマネジメントの構築を目的とし、期待値と VaR を指標とした費用便益分析の評価手法を提案した。そして、我が国の災害に対して本手法を適用し、リスク対策を検討した。その結果、費用便益分析に基づいて最適なリスク対策を評価できることを示した。

被保険者の立場における最適な保険の支払条件は式[15]の VaR の便益比(B/C)_pから評価できることを示した。この評価式から、被保険者の立場での最適な保険の支払条件が把握できる。また、図 16 の点 C は支払限度額 2,000 億円、免責金額 600 億円の保険を適用した後である。点 A から点 C に向かう線上では、VaR が減少する正の便益が得られるが、期待値が増加する負の便益も表れる。従来、この線上での最適な点が求められないことが課題であったが、VaR の便益比(B/C)_pにより最適な支払条件が評価できることを確認した。

一方、保険の提供側の費用便益分析も考える必要がある。被保険者の VaR の減少は、保険の提供側の VaR の増加につながる。そのため、保険の提供側としては支払条件を変更しても常に VaR の便益比(B/C)_pが一定となる年間保険料を設定する必要がある。年間保険料の式[12]を VaR の便益比(B/C)_pの式[15]に代入すると次式が得られる。

$$(B/C)_p = \frac{V - V_p}{I_p} = \frac{V - V_p}{\mu_c(1+k)} = C$$

$$\therefore k = \frac{V - V_p}{C \cdot \mu_c} - 1 \tag{29}$$

ここで、C は一定値とする。保険の提供側は、VaR の便益比(B/C)_pを一定値とするためには、式[29]を満たす安全割増 k を設定する必要がある。

最適な緩和策は式[24]の期待値の便益比(\hat{B}/C)_pと式[25]の期待値の純便益($\hat{B}-C$)_pから評価できることを示した。図 19 の結果から、緩和策が期待値と VaR に及ぼす効果、VaR を補正したときの期待値の結果を示した。VaR の補正による期待値の変化は大きく、適切な緩和策を評価するためには、変動の要素を考慮することが重要であることが分かる。

緩和策の費用便益分析においては、VaR を補正する必要があること示した。従来の緩和策の費用便益分析においては、保険の効果は含まれていない。しかし、緩和策の費用便益分析に保険の効果を含めることで、変動を表す VaR の補正を可能としている。すなわち、費用便益分析において、緩和策と保険は組み合わせて評価する必要がある。この評価手法は、緩和策と保険の最適な組み合わせによるリスク対策を検討するリスクマネジメントの方針と整合していると言える。

同じ緩和策においても従来と本手法の費用便益分析で

は、異なる結果となることがある。従来の費用便益分析を適用した際、緩和策によっては純便益が負となることがある。これは、緩和策による期待値の低減効果よりも費用が上回るときであり、図 19 における緩和策の適用後の期待値が点 A よりも大きくなる時に相当する。しかし、本手法では緩和策の適用後の期待値が点 A より大きくても点 A' 以下であれば、純便益は正となる。これは本手法が変動の要素を考慮して緩和策の効果を評価しているためである。このように費用便益分析の手法の違いにより、純便益が正負になることがある。純便益の結果は意思決定に影響を及ぼすため、従来の費用便益分析ではなく、本手法を適用することが有用である。

図 20 の結果から、保険と緩和策を組み合わせた最適なリスク対策の評価が可能であることを示した。従来の費用便益分析は期待値のみを指標としていたことから、大災害へのリスク対策の評価が十分ではなかった。本手法は期待値と VaR の指標により、大災害への適切なリスク対策を評価することを可能としている。政府としては、本研究の手法を適用することにより、保険と緩和策の対策費用の根拠を示せるだけでなく、過大な投資を抑制することが期待できる。

VaR_p が 0 となる保険を適用した場合、保険によりリスクをすべて保険会社に移転した場合の期待値が得られる。このときの期待値は異なる地域や災害のリスクの大小を比較することに適していると言える。異なる地域や災害を比較する場合、補正により VaR_p を同一にする必要がある。そして、保険の効果は常に VaR_p を下げる方向であるため、最も低い VaR_p に合わせることになる。そのため、 VaR_p を 0 とすることですべての災害を同じ VaR_p で比較することが可能となる。

7. 結論

本研究では、保険と緩和策を組み合わせたリスク対策を評価することを目的とし、 μ -VaR モデルに基づいた費用便益分析の評価式を提案した。そして、保険は VaR の便益比、緩和策は期待値の便益比と期待値の純便益から費用便益分析の評価式を導けることを示した。次に台風シミュレーションモデルにより針葉樹人工林の風害リスクを評価し、本手法を適用した。結果、保険と緩和策のそれぞれの最適な対策を評価することが可能となるだけでなく、保険と緩和策を組み合わせたリスク対策を評価することが可能となることを示した。

本研究では針葉樹人工林の風害リスクをケーススタディとしたが、本手法は様々な災害リスクに対して適用が可能である。また、保険と緩和策は組織が選択する最も一般的なリスク対策であるため、本手法はリスクマネジメントの様々な実務的な場面において適用が可能と考える。

今後の課題として、費用便益分析の適用期間がある。保険の契約期間は 1 年間で一般的である。そのため、本手法の費用便益分析の適用期間は 1 年間とした。しかし、災害リスクへの対策には長期の年数が必要となる場合が多い。そのため、複数年のリスク対策による便益を適切に考慮した費用便益分析の評価式の検討が必要である。

参考文献

1) Baranoff, E.: Risk Management and Insurance, Wiley, pp. 44-52, 2003

2) 国土交通省河川局：治水経済調査マニュアル(案), pp. 59-60, 2005
 3) Federal Emergency Management Agency: Guidelines for Benefit-Cost Analysis, p. 1, 2006
 4) Kleindorfer, P. and Kunreuther, H.: The Complementary Roles of Mitigation and Insurance in Managing Catastrophic Risks, Risk Analysis, Vol. 19 (4), pp. 727-738, 1999
 5) 赤石沢総光, 福島誠一郎, 安田登: 企業財務を考慮した地震保険によるリスク移転の評価に関する考察, 土木学会論文集, No. 763 / IV-63, pp. 95-106, 2004
 6) 山下智志: 市場リスクの計量化と VaR, 朝倉書店, p.18, 2000
 7) Alexander J. McNeil et al.: 定量的リスク管理 - 基礎概念と数理技法 -, 共立出版, p.45, 2008
 8) Grossi, P. and Kunreuther, H.: Catastrophe Modeling: A New Approach To Managing Risk, Springer, p. 175, 2005
 9) 岡崎豪, 矢代晴実: 地球温暖化の影響を反映した極値風速による風災被害評価, 日本建築学会 総合論文誌, No. 6, pp. 99-104, 2008
 10) Holland, G. J.: An Analytic Model of the Wind and Pressure Profiles in Hurricanes, Mon. Weather Rev., Vol. 108 (8), pp. 1212-1218, 1980
 11) Fujii, T. and Mitsuta, Y.: On the radial pressure profiles of typhoons, Ann. Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., No.38 B-1, pp. 101-116, 1995
 12) 岡崎豪, 石原孟, 矢代晴実, 渡部弘之: 地表面粗度と地形の効果を反映した台風シミュレーションモデルの開発, 第 19 回風工学シンポジウム, pp. 217-222, 2006
 13) 石原孟: 非線形風況予測モデル MASCOT の開発とその実用化, ながれ, 第 22 巻 第 5 号, pp. 387-396, 2003
 14) 石原孟, 日比一喜: 急峻な山を越える乱流場の数値予測, 日本風工学論文集, Vol. 25/No. 83, pp. 175-188, 2000
 15) 環境省自然環境局の生物多様性センター: 第 5 回基礎調査植生 3 次メッシュデータ, 2001
 16) 佐藤創, 阿部友幸: 2004 年台風 18 号による風倒木被害の要因 一道有林での解析事例一, 光珠内季報, No.143, pp.7-11, 2006
 17) 北海道水産林務部 林務局 森林整備課: 台風 18 号の森林被害の概況, 2004
 18) 社団法人森林保険協会: 森林保険ハンドブック, 社団法人森林保険協会, pp. 36-37, 1999
 19) 稲垣 秀輝: 植生の違いによる風倒木の発生と斜面崩壊, 応用地質, 第 40 巻/第 4 号, pp.196-206, 1999
 20) 農林水産省: 農林水産分野の地球温暖化防止策, 農林水産省地球温暖化対策総合戦略, 2008

(原稿受付 2010.9.3)

(登載決定 2011.2.28)