

緩和策の地域的な優先順位を反映した費用便益分析

Cost-benefit Analysis in Consideration of Setting Prioritization of Areas in Mitigation

岡崎 豪¹, 佐土原 聡², 矢代 晴実¹, 吉田 聡²Takeshi OKAZAKI¹, Satoru SADOHARA², Harumi YASHIRO¹
and Satoshi YOSHIDA²¹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

To evaluate the optimum risk treatment for one year, Okazaki et al. had proposed a method that used cost-benefit analysis with the consideration of variance of losses. However, the term of mitigation often spans multiple years. Therefore, in this study, we proposed a method for evaluating the optimum mitigation for multiple years. In addition, to apply the suitable mitigation for multiple years, it is important to consider the prioritization of areas of mitigation. Prioritizing areas with the maximum potential for losses can lead to decreased expectation of losses during the period when mitigation is applied. Through the validation, we confirmed the method's efficacy in not only shortening the period for which mitigation is applied but also reducing the expectation of the annual total cost during the period.

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

1. はじめに

自然災害リスク（以下、災害リスクと呼ぶ）に対するリスクマネジメントの構築においては、投資対効果の観点に基づいた最適なリスク対策を選択する必要がある。この問題に対して、岡崎ら¹⁾は自然災害による損害額の変動に着目し、期待値とVaR (Value at Risk) を指標とした費用便益分析の評価式（以下、 μ -VaR モデルと呼ぶ）を提案した。この評価式により、複数の選択肢の中から最適な保険と緩和策を選択することが可能となる。これは単年度のリスク対策の評価手法を示したことになる。しかし、保険は契約期間が1年間であることが一般的であるが、緩和策は長期の取り組みが必要となることがある。そのため、複数年度にわたる緩和策の評価手法が課題として残されていた。

複数年度にわたる緩和策に費用便益分析を適用する場合、異なる年度に発生した便益・費用を積算することになる。そのため、社会的割引率により、将来の便益・費用を現在価値 (present values) に変換する必要がある²⁾。本研究の費用便益分析においてもこの現在価値変換を適用する。また、この現在価値変換に加えて、本研究では緩和策の優先順位に着目した。緩和策の優先順位とは、複数の地域に緩和策を適用する際の地域的な順列を意味する。従来の費用便益分析は、ある一つの地域における緩和策の投資対効果を評価するために使用されることが一般的であり、複数の地域を包含したポートフォリオへの適用は想定していない。緩和策をポートフォリオに適用する場合、緩和策を適用する地域的な優先順位を検討

する必要がある。例えば、政府や行政組織が広範囲の地域に緩和策を適用する場合、一般に期間は長期に及ぶ。期間が長期の場合、緩和策を実施している期間中にも災害による大小の損害が発生する。そのため、大きな損害が発生する可能性のある地域へ優先的に緩和策を適用することで、期間中の損害額の期待値を低減させることが可能となる。

図1に緩和策の優先順位の例を示す。緩和策は1年目にA地域、2年目にB地域、3年目にC地域の順番で適用したとする。そして、1年目の年末にA地域で災害が発生し、2年目の年末にC地域で災害が発生した場合、A地域の被害は緩和策により低減されているが、C地域の被害は低減されていない。そのため、A地域→C地域→B地域の順番で緩和策を適用していれば、損害額が低減されたことになる。すなわち、優先順位の適切な設定は、全期間における損害額の総額を低減させる効果がある。このように複数年度にわたる緩和策の費用便益分析においては、優先順位による便益を考慮する必要がある。従来の費用便益分析には地域的な優先順位による効果が考慮されておらず、緩和策の便益は過小もしくは過大に評価されていた可能性がある。

地域的な優先順位は、緩和策の費用を増やすことなく、損害額を低減できることが特徴である。また、国土が大きい国家であるほど、対策を実施する期間は長期となり、損害額の低減の効果が大きくなることが期待できる。近年の世界の自然災害による損害額は甚大であり、2008年の年間損害額はUS\$200bnに達している³⁾。そのため、地域的な優先順位を適切に設定することによる金額的な軽

減額も非常に大きな額となる。

以上から、本研究では複数年度にわたる緩和策の費用便益分析の評価式、及び緩和策の最適な優先順位の設定手法を提案する。本手法を使用する主体は政府となり、河川堤防の改修、ダム建設、防潮堤の整備、森林の間伐、建物の耐震補強への補助金の交付などの様々な事業を実施する際の事業計画における活用が期待できる。

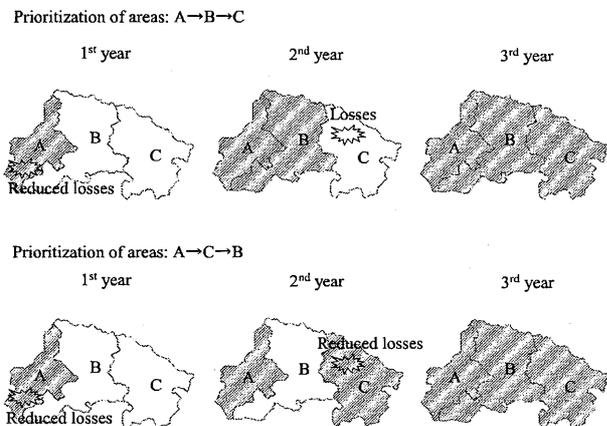


図1 緩和策の地域的な優先順位の例

2. 複数年度にわたる緩和策の費用便益分析

以下、従来と本研究での複数年度にわたる緩和策の費用便益分析の考え方の違いを示す。また、緩和策の優先順位の設定手法を示す。

(1) 従来の費用便益分析

費用便益分析は投じた費用と対策による便益を比較する手法である。広義の便益とは社会的余剰を意味し、効用関数により貨幣表示された消費者余剰と生産者余剰から計測される。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と定義する。そして、評価の対象期間における現在価値変換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。以下に便益比と純便益の評価式を示す。

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

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

ここで、 $C(t)$ は t 年目に投じる費用、 α は社会的割引率、 T は事業の継続年数を表す。 $B(t)$ は t 年目に得られる便益の期待値であり、従来の費用便益分析では次の式で表せる。

$$B(t) = \mu_r(t-1) - \mu_r(t) \quad [3]$$

ここで、 $\mu_r(t)$ は緩和策を適用した後の t 年目における災害による損害額の年間期待値を表す。ただし、 $t=0$ のときの $\mu_r(0)$ は緩和策を適用する前における年間期待値を表す。

(2) 本研究の費用便益分析

複数年度にわたる緩和策に適用する本研究の費用便益

分析の評価式を示す。従来の費用便益分析と同様、本研究の費用便益分析も現在価値変換を適用するため、便益比と純便益の評価式は[1]と[2]となる。しかし、式[3]の便益の評価式が異なる。岡崎ら¹⁾は、 $\mu-VaR$ モデルに基づいた費用便益分析の評価式を提案した。 $\mu-VaR$ モデルは損害額の変動に着目し、期待値と変動の変化から便益を評価する手法である。 $\mu-VaR$ モデルにおける変動を表す指標は、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⁴⁾。1つ目がリスク感応度であり、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。Kleindorfer and Kunreuther⁵⁾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⁶⁾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。

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。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」である。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、変動の指標にVaRを選択し、 $\mu-VaR$ モデルを構築した。

災害による年間損害額の期待値 μ は式[4]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[5]で表せる⁷⁾。

$$\mu = \sum_x x \cdot f(x) \quad [4]$$

$$V = \inf\{\lambda \in \mathbb{R} : f(x > \lambda) \leq 1 - \alpha\} \quad [5]$$

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。信頼水準 α は主体が大きな被害を蒙る発生確率などから災害に応じて適切に設定する。

緩和策による年間損害額の減少率を $m(x)$ とした場合、緩和策の適用後における年間損害額の期待値 μ_r とVaR V_r は式[6]、[7]で表される。

$$\mu_r = \sum_x m(x) \cdot x \cdot f(x) \quad [6]$$

$$V_r = \inf\{\lambda_r \in \mathbb{R} : f(m(x) \cdot x > \lambda_r) \leq 1 - \alpha\} \quad [7]$$

期待値の便益比 $(B/C)_r$ は以下の式により表すことができる。 I_r は緩和策の年間費用である。

$$(B/C)_r = \frac{\mu - \mu_r}{I_r} \quad [8]$$

しかし、緩和策は年間損害額の期待値と VaR の両方を変化させている。そのため、緩和策の適用前後の VaR が同じとなるように補正し、補正後の期待値の差から便益比の式を導く必要がある。ここで、VaR の補正には保険を適用した。μ-VaR モデルは、期待値と VaR によりリスクをモデル化している。保険と緩和策は期待値と VaR によって対策による効果が評価できることから、災害の種類や目的などに限定されずに保険と緩和策の定量的な比較が可能となる。そこで、仮想的な保険を緩和策の便益比の式に適用し、VaR を同じとしたときの期待値を比較した。

保険による補正後の期待値の便益比 (\hat{B}/C), を次式に示す。

$$(\hat{B}/C)_r = \frac{\mu_p + I_p - \mu_r}{I_r} \quad [9]$$

ここで、 μ_p は保険による補正後の年間損害額の期待値、 I_p は年間保険料を表わす。

式[9]から μ-VaR モデルに基づいた費用便益分析の評価式において、 t 年目の便益は次式で表せる。

$$\hat{B}(t) = \mu_p(t-1) + I_p(t-1) - \mu_r(t) \quad [10]$$

ここで、 $\mu_p(t-1)$ は保険により補正した後の $t-1$ 年目の年間期待値であり、 $I_p(t-1)$ は補正のために適用した $t-1$ 年目の保険の年間保険料を表す。

図2に VaR の補正の概念図を示す。点Pは緩和策を適用した後の $t-1$ 年目、点Rは緩和策を適用した後の t 年目を表す。また、 $\hat{\mu}(t)$ は t 年目の年間総費用の期待値、 $\hat{V}_r(t)$ は t 年目の年間総費用の VaR を表す。年間総費用とは、災害による年間損害額と緩和策による年間対策費用の合計を意味する。そして、保険により $t-1$ 年目の VaR $\hat{V}_r(t-1)$ が、 t 年目の VaR $\hat{V}_r(t)$ と一致するように補正する。このときの補正前が点P、補正後が点Qに相当する。そして、点Qと点Rの期待値の差が μ-VaR モデルの純便益に相当する。また、点Pと点Rの期待値の差が従来の費用便益分析の純便益に相当する。

(3) 緩和策の優先順位の設定手法

緩和策の優先順位の設定手法を示す。本研究における緩和策の最適な優先順位とは、投じた費用に対する便益が最大となる優先順位と定義する。そのため、式[10]に基づいた便益比もしくは純便益を地域毎に計算し、それらの値が大きい地域から順番に緩和策を適用する設定とする。この設定に基づいて、各地域における緩和策を適用する年度が決まる。

図3に優先順位を設定する例を示す。対象とする地域が A~E の5つである場合、A~E の地域の純便益をそれぞれ計算する(Step 1)。そして、純便益の大きさにより優先順位を設定する(Step 2)。最後に、すべての地域を対象とした全期間における費用及び便益を計算する(Step 3)。これらの計算により、地域的な優先順位による効果を考慮した複数年度にわたる緩和策の費用便益分析の評価が可能となる。

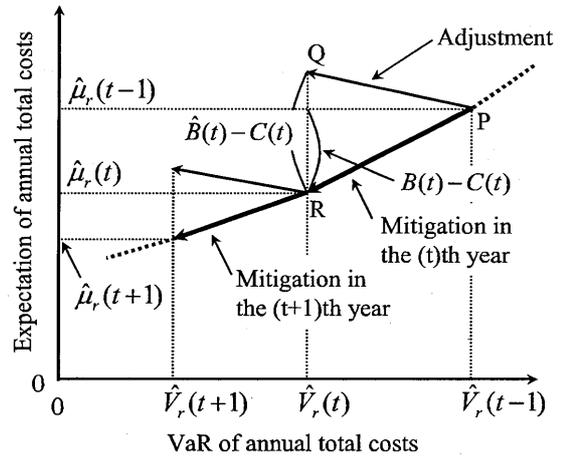


図2 μ-VaR モデルにおける VaR の補正

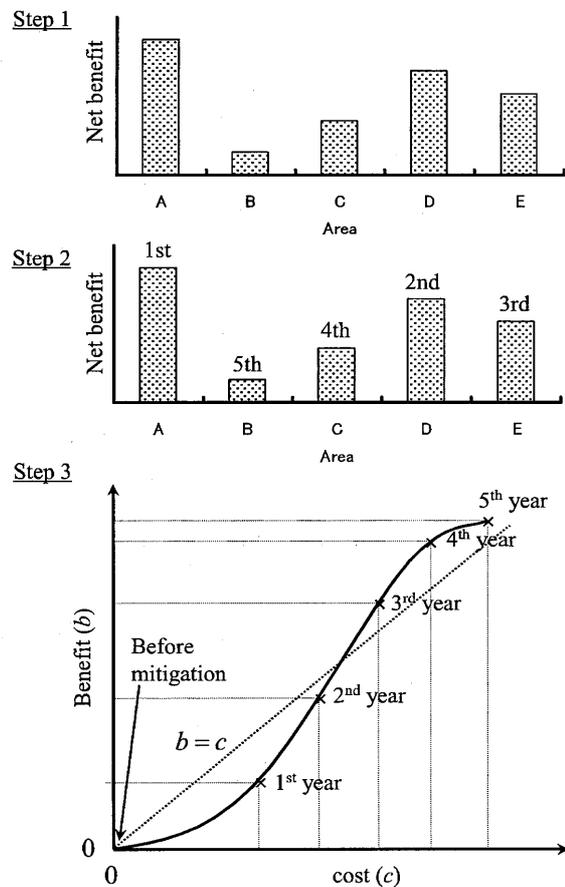


図3 優先順位の設定手順の例

3. ケーススタディ

日本の森林の風害リスクを対象として、複数年度にわたる緩和策の費用便益分析の評価式、及び緩和策の優先順位による損害額低減の効果を検証した。風害リスクは台風シミュレーションにより確率論的に評価した。以下の節では、検証における設定を示す。優先順位の設定以外は岡崎ら¹⁾の研究と同様とした。

(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し、過去の台風の観測記録からそれぞれの境界線における台風の中心気圧、進行速度、進行角度、最大旋衡風速半径等の確率分布を作成する。そして、確率分布に乱数を適用することで仮想的な台風を発生させる。仮想台風の例を図4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。本土への台風の上陸個数は年間平均で約2.1個であり、10,000通りのシミュレーションにより計21,544個の台風が発生している。

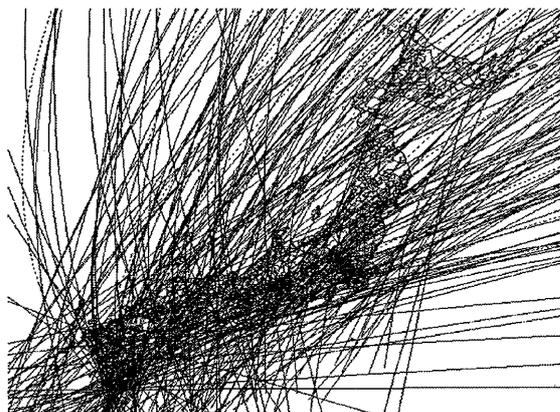


図4 モンテカルロシミュレーションによる仮想台風のイメージ

(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。Holland⁹⁾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 Mitsuta¹⁰⁾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、岡崎ら¹¹⁾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^{12), 13)}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。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。

(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¹⁴⁾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。また、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、本研究ではすべてを国有林として扱った。全国の針葉樹人工林の位置を1kmメッシュで表示した結果を図5に示す。

(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。

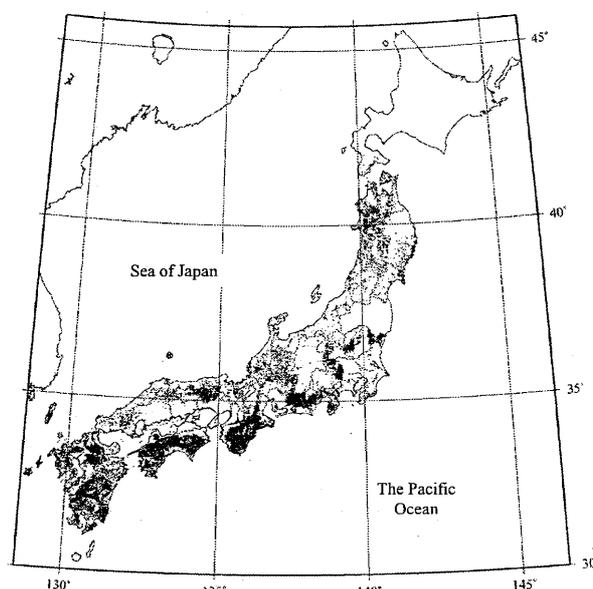


図5 針葉樹人工林の分布¹⁴⁾

本研究では佐藤・阿部¹⁵⁾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。関係式は北海道の被災地調査から構築し、全国の他の地域に適用している。しかし、国内における同じ種類の樹木に大きな違いがないため、北海道のスギ・ヒノキなどの針葉樹人工林の被災率は他の地域への適用が可能とした。関係式はロジスティック回帰分析により求めた式[11], [12]で表される。

$$p(v_i) = \begin{cases} \frac{1}{1+e^{-Z}} & v_i \geq v_0 \\ 0 & v_i < v_0 \end{cases} \quad [11]$$

$$Z = \beta_0 + \beta_1 \cdot v_i \quad [12]$$

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。

ただし、2004 年台風 18 号は北海道の大部分の地域が最大風速 20m/s 未満であったため、最大風速 20m/s 以上は外挿により評価している。そのため、シミュレーションで発生させる最大風速 20m/s 未満への適用に問題はないが、最大風速 20m/s 以上への適用においては不確実性が大きくなる。

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。

$$L = \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^n p(v_i) \cdot A \cdot h_1 \cdot h_2 \quad [13]$$

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 100 (ha) 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¹⁶⁾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 は材木価値の変換係数 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¹⁷⁾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) 緩和策の設定

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¹⁸⁾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¹⁹⁾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% 減少する効果があると設定した。間伐の年対策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。全国の未間伐の割合は農林水産省の標本調査¹⁹⁾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調べる方法であり、地域的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。緩和策は未間伐となっている森林のみに適用する。また、社会的割引率 α は治水経済調査マニュアル²⁰⁾を参考として 4% と設定した。

(7) 優先順位の設定

優先順位による効果の比較のため、優先順位を設定せずに全国同時に緩和策を適用する場合、ハザードマップから優先順位を設定する場合、純便益により優先順位を設定する場合の 3 通りの設定方法を適用した。以下、それぞれの設定手法を示す。なお、地域の区分は針葉樹人工林と同様の 1km メッシュとした。

a) 優先順位を設定しない場合

優先順位を設定しない場合、対象とする全地域に同時に緩和策を適用することになる。ここでは、全国の針葉樹人工林への緩和策を同時に開始し、20 年後にすべての地域で同時に終了する設定とした。

b) ハザードマップに基づいた優先順位の設定

ハザードマップは住民が災害の危険度を把握するため、また避難経路や避難場所を確認するために世界各国で作成されている。日本においては、洪水ハザードマップ、

確率論的地震動予測地図 (Probabilistic Seismic Hazard Map)、火山噴火ハザードマップなどが政府や自治体から公表されている。これらハザードマップは災害実績図をもとに、地形解析やシミュレーションあるいは専門家の判断によって危険範囲を予測し図示したものである。災害の危険度が高い地域では、甚大な被害が発生する可能性がある。それらの地域においては、便益よりも災害の危険度を重視して優先順位を設定することが求められる。すなわち、災害の危険度から緩和策の優先順位を設定する考え方は 1 つの合理的な判断となる。また、従来のリスク対策は、過去に大きな被害が発生した地域や人口が集中している地域への適用が優先されてきた傾向がある。以上から、ハザードマップにより優先順位を設定した。

ハザードマップから優先順位を設定するための変数を示す。確率変数 X の確率分布 $P(X)$ において、 x_p を実数とすると x_p 以下の確率である累積分布関数 (cumulative distribution function) $F(x_p)$ は次の式で表せる。

$$F(x_p) = P(X \leq x_p) \quad [14]$$

X が x_p 以上となる確率、すなわち、事象が生起する時間間隔の平均値が $1/T$ であるとき、 T を再現期間 (Return period) と呼ぶ。この場合、再現期間と累積分布関数の間には以下の関係式が成立する。

$$T = \frac{1}{W(x_p)} = \frac{1}{1 - F(x_p)} \quad [15]$$

ここで、 $W(x_p)$ は超過確率である。再現期間を任意の値に固定した場合、各地点の x_p が求まる。既存のハザードマップで表示される情報は様々であるが、 x_p を災害の危険度とし、ハザードマップで表示することが多い。そのため、災害の危険度 x_p を優先順位の設定のための変数とする。災害の危険度 x_p は、再現期間 100 年の最大風速の大きさとした。すなわち、再現期間 100 年の最大風速が大きい地域から順番に緩和策を適用する設定とする。緩和策の対象は全国の針葉樹人工林であり、20 年間で終了する設定とした。

c) 純便益に基づいた優先順位の設定

2.(3)節の手法に基づいて優先順位を設定した。すなわち、純便益を地域毎に計算し、それらの値が大きい地域から順番に緩和策を適用する設定とする。また、緩和策は純便益が負となる地域に適用せず、純便益が正となる地域のみに適用する。

4. 結果

台風シミュレーションモデルにより森林の風害リスクを評価した結果を示す。また、森林の風害リスクを対象としたハザードマップ、純便益のマップを示す。そして、優先順位の効果を検証した結果を示す。

(1) 森林の風害リスクの評価

台風シミュレーションモデルにより予想される針葉樹人工林の風害による全国合計の年間損害額の期待値は 639 億円、VaR は 2,396 億円の結果となる。VaR の信頼水準 α は 99% である。また、1km メッシュ毎に年間損害額の期待値と VaR を評価した結果を図 6 に示す。

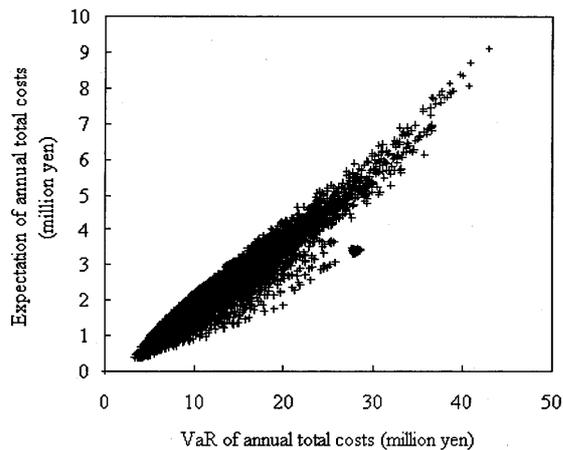


図6 1kmメッシュ毎の損害額の期待値とVaRの結果

期待値とVaRの相関係数は0.98であり、強い正の相関関係である。また、期待値が大きい場合よりも期待値が小さい場合の方がVaRのばらつきが大きいことが分かる。この結果は台風が頻繁に襲来する地域の損害額の変動は大きい、台風が稀に襲来する地域の損害額の変動は小さいことを意味する。

(2) 再現期間100年の最大風速の分布図

ハザードマップとして、再現期間100年の最大風速 x_p の分布を1kmメッシュで表示した結果を図7に示す。ただし、最大風速は針葉樹人工林のメッシュ位置のみを表示している。結果、緯度が低く、太平洋に面した地域において最大風速が大きく、日本海に面した地域の最大風速は相対的に小さいことが分かる。上陸した後の台風は海面からの潜熱が得られなくなるため、徐々に減衰するためである。ただし、九州地方に上陸した台風が日本海を通過し、東北地方に再上陸するケースが稀にある。この場合、勢力が弱まらずに東北地方に接近・上陸するため、東北地方において強い風速が発生する。

純便益の分布を1kmメッシュで表示した結果を図8に示す。純便益は最大風速と同様、針葉樹人工林のメッシュ位置のみを表示している。純便益は九州地方、四国地方、近畿地方では大部分が正であるが、関東地方や東北地方では大部分が負となる。台風が頻繁に襲来する九州地方や四国地方は損害額の期待値が大きいため、緩和策による便益も大きくなり、便益が費用を上回ることで純便益が正となる。逆に、台風が稀にしか襲来しない東北地方は損害額の期待値が小さいため、緩和策による便益も小さくなり、便益が費用を下回ることで純便益が負となる。

(3) 年間総費用の期待値とVaRの変化

優先順位を設定しない場合、ハザードマップにより優先順位を設定した場合、純便益により優先順位を設定した場合の3通りの年間総費用の経年変化を比較した。図9に全国合計の年間総費用の経年変化の結果を示す。縦軸は年間総費用の期待値であり、横軸は年間総費用のVaRである。また、VaRの信頼水準 α は99%である。なお、この年間総費用は現在価値変換していない。点Aが緩和策の適用前であり、点Bが20年後である。優先順位を設定しない場合、針葉樹人工林の全地域に同時に緩和策を適用していくことになる。この場合、緩和策の適

用前から20年後までの年間総費用の期待値とVaRは比例関係で小さくなることが分かる。ハザードマップにより優先順位を設定した場合、優先順位を設定しない場合よりもすべての年において期待値とVaRは小さくなることが分かる。また、期待値は15年目で最も小さくなり、その後は徐々に大きくなる。

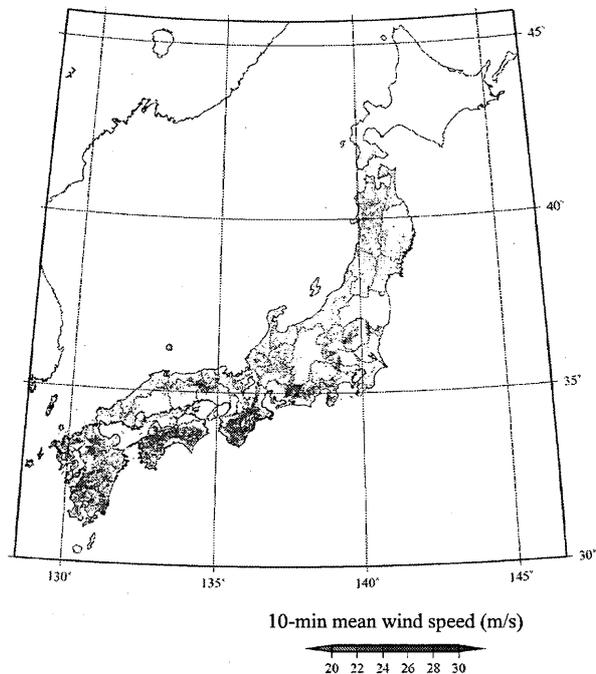


図7 針葉樹人工林のメッシュ位置における再現期間100年の最大風速 x_p の分布 (ハザードマップ)

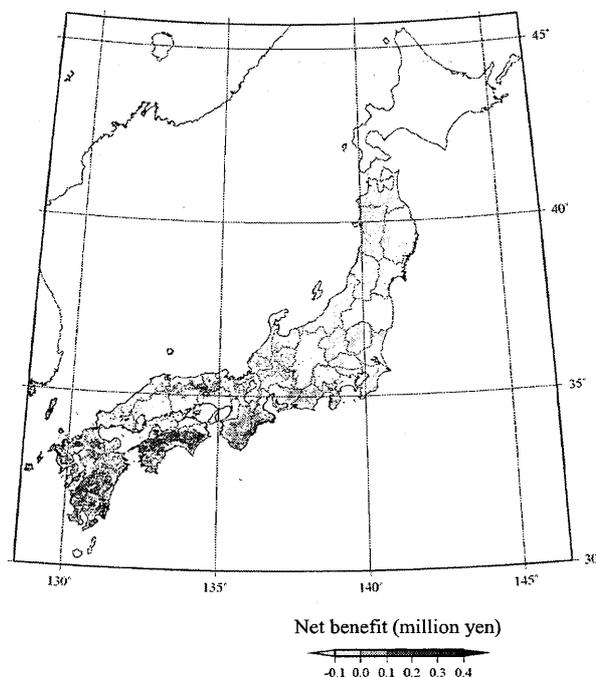


図8 針葉樹人工林のメッシュ位置における緩和策による純便益の分布

この理由は、15年目以降に緩和策を適用する地域は損害額の期待値が小さいため、緩和策による便益も小さくなり、便益が費用を下回るためである。しかし、VaRは18年目まで小さくなる。

純便益により優先順位を設定した場合、優先順位を設定しない場合やハザードマップにより優先順位を設定した場合よりもすべての年において年間総費用の期待値とVaRは小さくなる。また、緩和策を実施する地域は純便益が正の地域のみと設定しているため、ハザードマップによる優先順位の設定よりも6年早い14年目で対策は終わる。期待値は12年目で最も小さくなり、12~14年目において僅かに増加する。

図9における3通りの年間総費用の経年変化は、VaRがそれぞれの年において異なるため、期待値を同じ基準で比較することができない。そのため、それぞれの年のVaRを同一にする補正が必要となる。VaRの補正には保険を適用し、純便益により優先順位を設定した場合のVaRと同じとなるように優先順位を設定しない場合、及びハザードマップにより優先順位を設定した場合のVaR

を補正した。適用した保険の支払条件は支払限度額を1,000億円とし、免責金額は最小二乗法によって求めた。VaRを補正した後の年間総費用の経年変化を図10に示す。また、このときの期待値を棒グラフで比較した結果を図11~13に示す。純便益により優先順位を設定した場合は14年目で対策が終わるため、15年目以降は14年目と同じ期待値となる。以上、純便益により優先順位を設定したときの期待値がすべての年において最も小さくなることを確認できる。

(4) 費用便益分析の結果

社会的割引率を適用し、現在価値変換した便益と費用をの結果を図14に示す。便益と費用はそれぞれ1年目から20年目までの累積した金額を表す。また、全期間の純便益と便益比の結果を表1に示す。これら結果から、純便益により優先順位を設定した場合、全期間の便益比及び純便益は最も大きくなることを確認した。

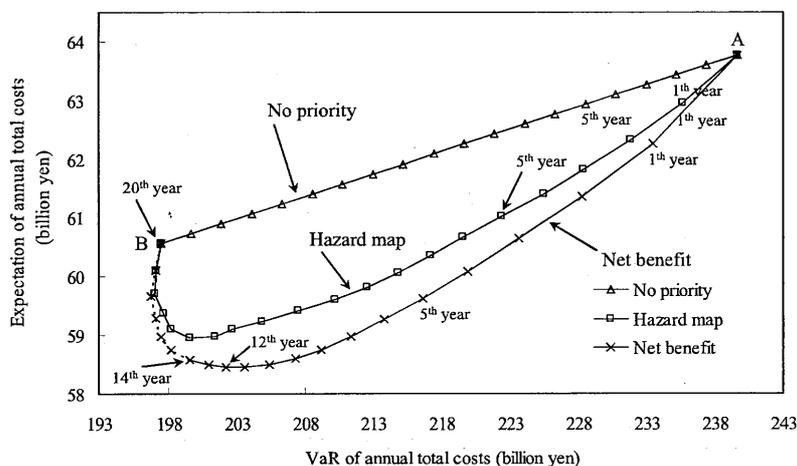


図9 全国合計の年間総費用の経年変化

(No priority: 優先順位を設定せずに全国同時に緩和策を適用した場合, Hazard map: ハザードマップにより優先順位を設定した場合, Net benefit: 純便益により優先順位を設定した場合)

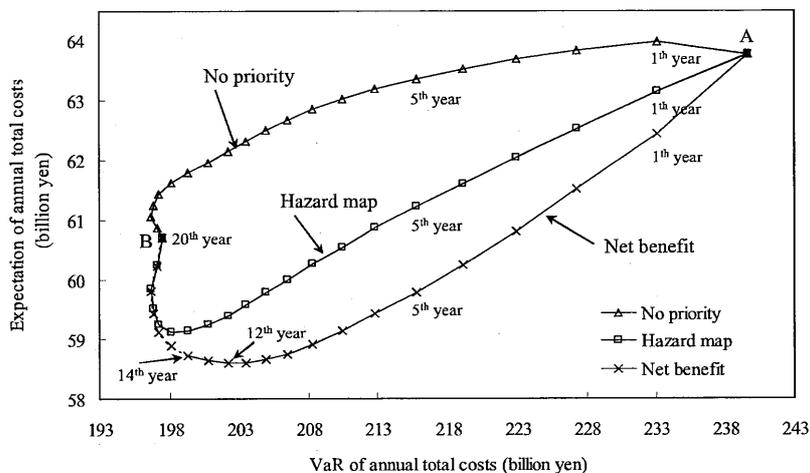


図10 全国合計の年間総費用の経年変化

(各年のVaRを純便益により優先順位を設定した場合と同じ値に補正した後)

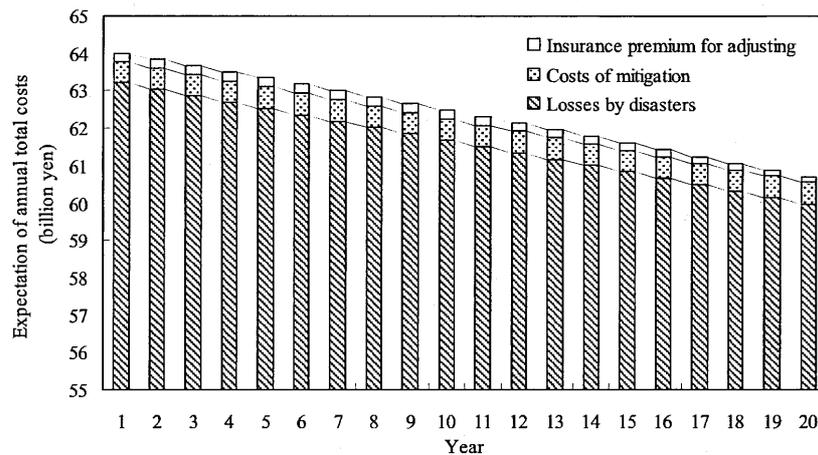


図 1.1 優先順位を設定せずに全国同時に緩和策を適用した場合の年間総費用の経年変化 (各年のVaRを同じ値に補正した後の期待値の比較)

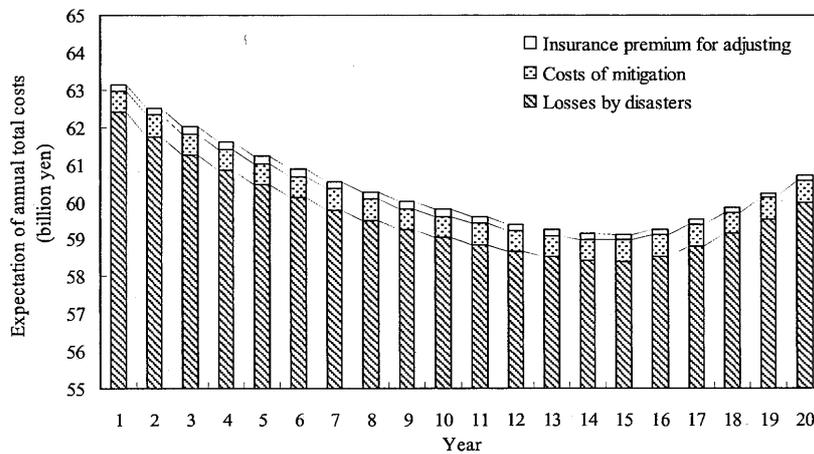


図 1.2 ハザードマップにより優先順位を設定した場合の年間総費用の経年変化 (各年のVaRを同じ値に補正した後の期待値の比較)

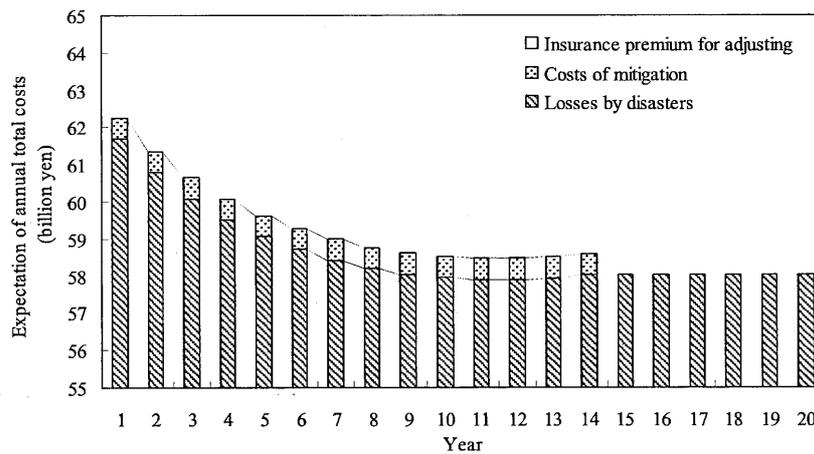


図 1.3 純便益により優先順位を設定した場合の年間総費用の経年変化 (各年のVaRを同じ値に補正した後の期待値の比較)

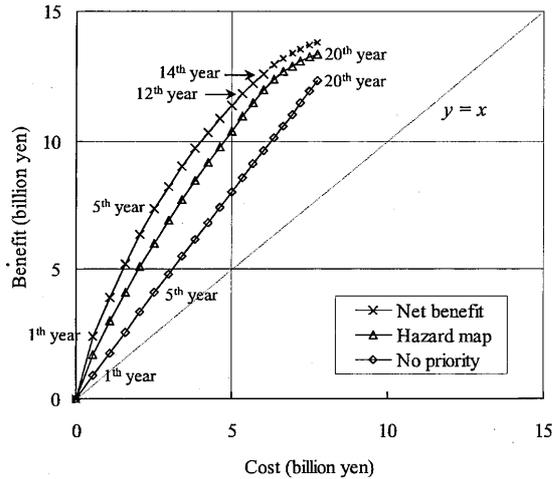


図 14 全地域を対象とした便益と費用の経年変化

表 1 全期間の便益比と純便益 (単位: 百万円)

	No priority	Hazard map	Net benefit
B/C	1.59	1.73	2.10
B-C	4,589	5,630	6,606

5. 考察

森林の風害リスクを対象として、ハザードマップ、純便益のマップを作成した。そして、図 9 において、3 通りの優先順位の設定による年間総費用の期待値と VaR の経年変化を示した。結果、すべての年において、純便益により優先順位を設定した場合の期待値と VaR が最も低くなった。これは、緩和策による期待値の減少額と純便益の間の相関が強いためと考えられる。純便益は VaR を補正した後の期待値の減少額から評価しており (式[4])、純便益の計算における期待値の減少額の寄与度が大きいために相関が強くなっている。

図 10 において、3 通りの経年変化の比較のため、仮想的な保険により VaR を補正した。そして、補正においては、純便益により優先順位を設定した場合の VaR を基準とした。ここで、保険による VaR の補正は図 10 で適用した手法の他に 2 通りがある。1 つは VaR が最も小さくなる 20 年目を基準とする手法であり、すべての年の VaR が 20 年目と同じになるように保険により VaR を補正する。もう 1 つは $VaR = 0$ を基準とする手法であり、すべての年の VaR が 0 となるように保険により VaR を補正する。このように保険による VaR の補正には計 3 通りの手法があり、いずれの手法でも期待値の比較が可能である。ここでは、期待値のみならず VaR の経年変化を把握するため、VaR の変化が最も小さくなる手法を選択した。

純便益による優先順位の設定は、緩和策を終了する年度の合理的な判断が可能となる。ケーススタディでは、純便益が負となる地域には緩和策を適用せず、純便益が正となる地域への適用を終えた段階で緩和策を終了する年度とした。これは地域毎の投資対効果から緩和策を終了する年度を決める手法である。一方、ポートフォリオの観点から緩和策を終了する年度を判断する手法がある。

ポートフォリオの年間総費用の増減に着目し、ポートフォリオの年間総費用の期待値が最小となる年度から判断することが可能である。ただし、年間総費用の各年度の VaR が異なるため、各年度の VaR を補正し、同じ VaR にしたときの期待値を比較する。ケーススタディでは、緩和策を終了する年度は前者の手法が 14 年目、後者の手法が 12 年目となる。しかし、14 年目と 12 年目の期待値の差異は 0.2% であり、大きな違いは生じていない。これら 2 つの手法は、意思決定における説明責任の観点から、主体者に適した手法を選択することになる。

本研究は、投資理論の 1 つであるポートフォリオ理論を参考としている。ポートフォリオ理論は、リスクを期待値からの変動と定義し、期待値と標準偏差によりリスクをモデル化している。そして、図 10 における年間総費用の経年変化のカーブはポートフォリオ理論の有効フロンティアに類似する。有効フロンティアは収益率を固定した時に分散が最小となる分布であり、最適なポートフォリオとなる期待値と標準偏差を表す。図 10 における純便益により優先順位を設定した場合の経年変化のカーブは、各年度で最も適切に緩和策を適用したときの期待値と VaR の値を表すことから、この経年変化のカーブは災害リスクにおける有効フロンティアと位置付けられる。

6. 結論

複数年度にわたる緩和策を費用便益分析に基づいて評価する場合、便益と費用を現在価値変換するだけでなく、地域的な優先順位を考慮する必要がある。そこで、本研究では μ -VaR モデルに基づいた複数年度にわたる緩和策の費用便益分析の評価式、及び緩和策の最適な優先順位の設定手法を提案した。

次に森林の風害リスクに対して本手法を適用し、優先順位による効果を検証した。結果、純便益による優先順位の設定は、優先順位を設定しない場合やハザードマップにより優先順位を設定する場合よりも年間総費用の期待値と VaR が小さくなることを確認した。また、緩和策を終了する年度の合理的な判断が可能となることを示した。

本手法は地震や洪水等の他の自然災害への応用が可能である。ただし、他の災害に適用する際には信頼水準 α を適切に設定する必要がある。例えば、地震は台風よりも発生確率が低い傾向であるため、地震を対象とする場合、信頼水準 α は台風の場合よりも大きくする必要がある。

今後の課題として、災害の危険度の変化に対応した評価手法が挙げられる。本研究の優先順位の設定においては、各地域における災害の危険度は最後まで変化しないと仮定した。しかし、地球温暖化などにより災害の各地域の危険度は変化する可能性がある。そのため、今後、災害の危険度の変化に対応した優先順位の設定手法を検討する必要がある。他の課題として、間伐は風害の被害確率を 50% 減少する効果があると設定した。また全国の未間伐の割合は 30% と設定した。これらの設定は確定的に取り扱い、結果を導いた。今後、これらの設定値の変化や変動が結果に及ぼす影響を確認する必要がある。

また、本手法は費用便益分析により評価するため、緩和策による効果が定量的に見積れる必要がある。緩和策の中には定量的な評価が難しい場合があり、そのような

場合の評価手法や不確実性の扱いが課題である。

参考文献

- 1) 岡崎豪, 佐土原聡, 矢代晴実, 吉田聡: 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, 地域安全学会論文集, No.14, pp.1-10, 2011
- 2) Boadman A.E. et al.: 費用・便益分析—公共プロジェクトの評価手法の理論と実践, ピアソンエデュケーション, 2004
- 3) Munich Re Group: Topics Geo Natural catastrophes 2008 Analyses, assessments, positions, p.35, 2009
- 4) 山下智志: 市場リスクの計量化と VaR, 朝倉書店, p.18, 2000
- 5) 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
- 6) 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
- 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) 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
- 9) Holland, G. J.: An Analytic Model of the Wind and Pressure Profiles in Hurricanes, Mon. Weather Rev., Vol. 108 (8), pp. 1212-1218, 1980
- 10) 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
- 11) 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
- 12) 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
- 13) 石原孟, 口比一喜: 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
- 14) 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
- 15) 佐藤創, 阿部友幸: 2004年台風18号による風倒木被害の要因—道有林での解析事例—, 光珠内季報, No.143, pp.7-11, 2006
- 16) 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
- 17) 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
- 18) 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
- 19) 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
- 20) 国土交通省河川局: 治水経済調査マニュアル(案), pp.59-60, 2005

(原稿受付 2011.6.5)
(登載決定 2011.7.23)