ISSN 1346-7301
国総研研究報告 第55号
平 成 2 7 年 2 月

国土技術政策総合研究所
研究報告

RESEARCH REPORT of National Institute for Land and Infrastructure Management

No.55 February 2015

公共施設運営権設定下の地震リスクマネジメントに関する研究
～空港を例として～

中島 由貴・中村 孝明・望月 智也

A Study on Seismic Risk Management of Social Capital Operated as Concession
-Example of Airport-

Yoshitaka NAKASHIMA , Takaaki NAKAMURA , Tomoya MOCHIZUKI

国土交通省 国土技術政策総合研究所

National Institute for Land and Infrastructure Management
Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Japan

国土技術政策総合研究所研究報告
第 55 号　　2015 年 2 月
(YSK-R-48)

公共施設運営権設定下の地震リスクマネジメントに関する研究
～空港を例として～

中島 由貴*，中村 孝明，望月 智也*****

要　旨

公債残高が GDP の 2 倍規模に累増するなか，公共施設について建設ではなく運営（維持管理を含む）を対象とした民間資金の活用に期待が高まっている．平成 23 年 6 月には，PFI 法が改正され，公共施設運営権の設定が可能となった．平成 25 年 11 月には民活空港運営法が制定され，空港分野でも公共施設運営権の設定による民間資金の活用の手続きが進んでいる．この手続きのなかで，保険料や耐震性向上など公共施設の地震対策の費用を運営権者の収益で賄うことが予定された．このことは，公共施設運営権の設定による民間資金を活用する場合，公共施設の地震リスクマネジメントが運営権者の財務に組込まれることを示している．

本研究では，公共施設運営権が設定されている架空の空港を例として，複数のシナリオ地震（マルチイベントモデル）を導入して，構造信頼性理論に基づく確率論的地震リスク評価手法を体系化した．その上で，　空港運営者の財務への影響の評価方法を提案し，代表的な地震リスクの対策について保険の設計方法及び効果の評価方法を提案した．

キーワード：空港，マルチイベントモデル，地震リスク，財務影響分析，保険，コンセッション

＊空港研究部　空港新技術研究官
＊＊株式会社 篠塚研究所，東京都市大学 大学院工学研究科　客員教授
＊＊＊株式会社 篠塚研究所

〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1　国土交通省　国土技術政策総合研究所
電話：046-844-5031　Fax：046-844-5080　E-mail: nakashima-y2im@ysk.nilim.go.jp

Research Report of NILIM
No.55 February 2015
(YSK-R-48)

A Study on Seismic Risk Management of Social Capital Operated as Concession

-Example of Airport-

Yoshitaka NAKASHIMA*
Takaaki NAKAMURA**
Tomoya MOCHIZUKI***

Synopsis

Use of private fund focusing on not development of social capital but also the operation and maintenance has been highly expected recently because outstanding public bond have reached two times amount of GDP. In June 2011 PFI Law was amended and social capital could have been operated as concession. In November 2013 Airport Concession Law was enacted and subsequently, in the field of airport, procedure using private fund based on the law has been proceeding. In this procedure it is expected that such a cost of seismic countermeasure as insurance and earthquake-resistant measures will be paid with revenue of concessionaire. It also means that in the case of using private fund based on concession a seismic risk management is required as financial management of concessionaire.

On this study we took fictitious airport for example which is operated as concession, introduced multi-event model and systemized the method for probabilistic seismic risk assessment based on structural reliability theory. Then we proposed the method for airport financial impact analysis of earthquake and the design method of insurance and the effectiveness.

Key Words : airport, multi-event model, seismic risk, financial impact analysis, insurance, concession

＊Research Coordinator for advanced Airport Technology, Airport Department
＊＊SHINOZUKA RESEARCH INSTITUTE, Tokyo City University Graduate school of engineering visiting professor
＊＊＊SHINOZUKA RESEARCH INSTITUTE

3-1-1 Nagase, Yokosuka City, Kanagawa 239-0826 Japan
Tel: 046-844-5031 Fax: 046-844-5080 E-mail: nakashima-y2im@ysk.nilim.go.jp

目　　次

1. はじめに..... 1
2. 地震リスク評価の体系化と検討の流れ..... 1
3. 地震リスク評価に関する各種要素技術..... 2
3.1　地震ハザード解析..... 2
3.2　地震リスクの定量化手法の概要..... 3
3.3　イベントツリーによるリスクの定量化手法..... 4
3.4　損傷確率とフラジリティカーブの評価..... 5
3.5　地震損失関数..... 6
3.6　統計解析による複合偏差..... 7
3.7　地震動指標と地盤増幅..... 7
3.8　イベントリスクカーブとリスクカーブ..... 7
3.9　財務影響分析及びストレスの視覚化..... 8
3.10　地震保険の設定..... 9
4. 評価事例..... 12
4.1　標本空港の設定..... 12
4.2　標本空港のフラジリティ情報の設定..... 12
4.3　財物損失額の評価（イベントツリーモデル）..... 14
4.4　事業停止期間の評価（システムモデル）..... 14
4.5　標本となる財務諸表の設定..... 14
4.6　その他の条件設定..... 15
4.7　評価結果..... 15
5. 結　語..... 24
謝辞..... 25
参考文献..... 26
付録..... 28
付録A　用語の定義..... 28
付録B　マルチイベントモデルでの地震源の設定について..... 30
付録C　仙台空港特定運営事業等実施方針で示された維持管理の範囲..... 31
付録D　空港運営の形態と耐震対策の受け皿..... 32
付録E　業績指標（自己資本比率，当座比率，流動比率）の算出式..... 33
付録F　運営権者の所有物に関する保険の設定方法..... 34

1. はじめに

財政法 4 条公債（建設国債）は，特例公債（赤字国債）と異なり，資産（社会資本）形成のため将来世代の負担を求めるものである．しかし，公債残高が GDP の 2 倍規模に累増するなか，建設国債であっても債務であるので，これを原資とする公共事業関係費について，プール制の特別会計から透明性が高い一般会計化が図られた（空港整備勘定は，経過勘定として自動車安全特別会計に統合）．また，建設国債であっても民間資金（政府保証の付保がない）であっても調達する場である一般金融市場は同じであることから，改正 PFI 法（民間資金等の活用による公共施設等の整備等の促進に関する法律の一部を改正する法律，平成 23 年 6 月）が制定されるなど，公共施設運営権の設定などによる民間資金の活用に期待が高まっている．

空港分野は，以前より公共事業（空港建設）の代行者である会社管理空港の設置や空港別収支の公表など，一般金融市場からの資金調達や区分経理の面から先進的であった，一部において政府補給金に至ったこともあり，民間資金の活用は建設（新規投資）ではなく維持管理（更新投資）に移行しつつある．これまでも維持管理の延長にある耐震性向上等のハード対策の費用が建設国債で調達されてきたことから，公共事業関係費の原資としての民間資金の活用に地震リスクマネジメントを組込む必要がある．

民活空港運営法（民間の能力を活用した国管理空港等の運営等に関する法律，平成 25 年 7 月）などの制定を契機に，運営権設定に伴う民間資金の活用が進展し，地震リスクの分担についても具体化しつつある．仙台空港特定運営事業実施方針（平成 26 年 4 月，以下，「実施方針」という.）にあっては，維持管理（更新投資）の範囲に，滑走路等の局部的破損等の原状回復・耐震性向上が含まれることが明示された．また，仙台空港特定運営事業等公共施設等運営権実施契約書（案）（平成 26 年 6 月，以下，「実施契約書案」という.）にあっては，国所有施設を対象に保険（うち地震特約 10 億円）の加入を求めた．このように滑走路等の国所有施設について，耐震性向上などの維持管理，原状回復のための保険の加入など，運営権者の空港収益からこれらを賄うこととされ，地震リスクマネジメントが運営権者の財務に組込まれつつある．

以上の背景のもと，著者らは，国土技術政策総合研究所資料 No.718(2013)にて，東北地方太平洋沖地震における仙台空港の被災・復旧過程と災害初期段階の代替空港（陸上自衛隊霞目駐屯地及び海上自衛隊艦船）の役割を整理した．また，国土技術政策総合研究所資料 No.756(2013)にて，イベントツリー解析など，構造信頼性理論の手法を部分的に用いて，地震リスク（損失の確率分布，期待値及び 90%非超過値など）の視覚化・定量化方法を提案し，さらには，国土技術政策総合研究所資料 No.783(2014)にて，単一のシナリオ地震が生起した場合，会社管理空港形態の空港運営者の財務影響分析の方法の提案を行っている．

しかしながら，著者らの既往の研究では，関係者が実在空港で再現できるよう，複数のシナリオ地震の考慮並びに構造信頼性理論に基づく体系的な地震リスクの定量評価方法は未提案であった．また，関係者の立場によって地震リスクの捉え方が異なるが，国と運営権者の人格を明確に区分し評価指標を算出するまでは行っていなかった．さらに，運営権設定に伴う運営権者の財務に，国所有施設の維持管理や原状回復が直接的に依存することが示されたが，運営権者の地震リスクに財務への影響とその対策について，未検討であった．

そこで本研究では，複数のシナリオ地震（マルチイベントモデル）を想定して，構造信頼性理論に基づく確率論的地震リスク評価手法を体系化するとともに，空港運営権者の財務への影響の評価方法，代表的な対策としての保険の設計とその効果について検討を行うこととした．特に保険の設計においては，各人格が受け持つ地震リスクを定量化し，人格別の地震リスクを明示することとした．

2. 地震リスク評価の体系化と検討の流れ

本研究は①地震リスク評価，②財務影響分析，③保険の設計の大きく 3 つに分けられる．本章ではそれぞれの関連と方法論について体系的に整備する．①～③までの流れを示すと**図-1** のようになる．**図-1** より地震リスク評価では，まず評価対象施設の情報収集から始める．主な収集情報は，位置情報，空港施設を構成する各種構造物の所有者ならびに設計図書，地盤に関する資料，さらに空港機能に関する情報も必要である．次に地震ハザード解析を行い，リスクを評価するためのモデルを構築する．モデル構築では，設計図書だけでは把握しきれない情報を耐震性に関する目視調査により収集し，地震時の被害要因や損傷レベルを抽出する．そして，収集情報や抽出結果に基づき，イベントツリーやシステムモデルなどのリスク評価モデルを構築する．なお，イベントツリーは主に財物損失額を，システムモデルは事業停止期

間をそれぞれ評価する（事業停止期間は復旧期間評価の積み上げにより算出される）．

構築したリスク評価モデルには，損傷確率や被害による影響（損失額や復旧期間など）が必要になる．損傷確率は設計図書などから評価したフラジリティカーブを使い与える．損失額や復旧期間については被害事例やヒアリングなどにより設定する．

損傷確率や被害による影響が与えられれば，リスク評価モデルに従い計算を行うことで，地震損失関数や復旧曲線などのリスク指標が算出される．地震損失関数は地震動強さに応じた損失額（あるいは復旧費を再調達価格で除した損失率）を示した関数で，この関数とマルチイベントモデルを対応させることでリスクカーブが求められる．一方，復旧曲線は地震発生後からの経過時間に対応した施設の性能の回復率を表した曲線である．何時までにどのレベルまで復旧するかが視覚化でき，近年はBCP（事業継続計画）の策定にも用いられている．

財務影響分析では，評価対象年度の財務諸表（損益計算書，貸借対照表，キャッシュフロー計算書）を作成する．次に，損失額として定量化した地震リスクを各財務諸表に計上し，シナリオ地震による損失が当該期末の財務に与える影響を業績指標（流動比率，当座比率，自己資本比率など）として定量化する．業績指標を算出することにより，各シナリオ地震が財務へ与える負荷（ストレス）が明らかとなる．

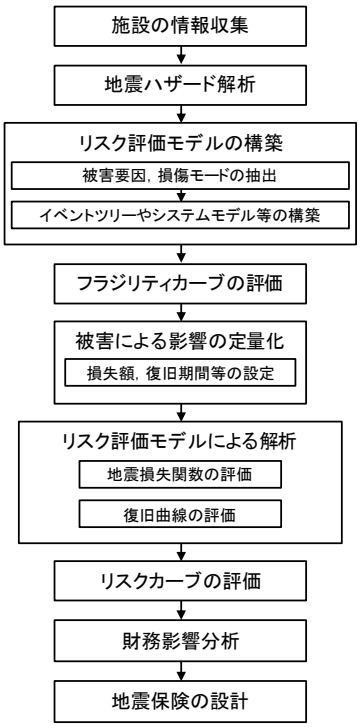


図-1　本研究の検討項目と評価の流れ

保険の設計では，各シナリオ地震に応じて算出された業績指標の大きさと経営困難と見做せる判断基準を勘案して保険金の支払限度（Limit）と免責（Deductible）を設定する．そして，保険金が支払われたと仮定し，再度財務影響分析を実施し，付保の妥当性と効果を確認する．

次章では地震リスク評価に関する要素技術について詳説する．

3. 地震リスク評価に関する各種要素技術

3.1　地震ハザード解析

地震ハザード（Seismic Hazard：地震危険度）とは，ある対象とする地点で，将来発生する可能性のある地震動強さと，それが発生する頻度（確率）を表したものである．したがって，地震ハザードの評価では，地震の発生時期，場所及び規模を予測するとともに，地震が発生した場合に対象地点で生じる可能性のある地震動強さを評価することになる．

地震ハザードに関する情報としては，2005 年に地震動予測地図(2005)が公表され，現在，防災科学技術研究所の Web サイト（地震ハザードステーション(J-SHIS)）にて，日本全国の各地点で地震ハザード曲線（**図-2**）が取得できるようになっている．公開されている地震ハザード曲線は，Cornell(1968)の方法に従ったものが一般的であり，対象地点における地震動指標（加速度，速度など）の最大値の確率分布となっている．この場合，個々のシナリオ地震が地震危険度に与える影響の把握や，点在する複数の施設に対する地震被害の同時性を反映させることは難しい．

そこで，本研究ではマルチイベントモデルによるイベントハザード曲線を採用する．上記 Cornell 流の地震ハザード曲線は各イベントでマグニチュード，震源（震央）距離及び地震動のバラツキを考慮して積分した地震動の超過確率関数に相当するが，マルチイベントモデルは各諸値のバラツキは考慮せず，シナリオ地震の発生確率を累積して求めた超過確率関数であり，その形状はステップ状となる．そして各ステップが各シナリオ地震に対応する（**図-3**）．

マルチイベントモデルに必要なシナリオ地震は，①活断層地震，②海溝付近の地震，③背景地震（活断層として現れない陸域（一部海域も含まれる）で発生する地殻内地震）の 3 種とする．ここで，活断層地震のデータ諸元は，地震調査研究推進本部(2012)を参照する．海溝付近の地震のデータ諸元は，宇賀田(2001)を参照し，過

去に発生した地震に基づき震源域を設定し，かつ，活動期の概念も考慮する．背景地震は，地震の活動度が一定と見做せる地震域を設定した上で，同域内で発生した過去の地震の平均的な震源深さを断層中心とし，地震規模に応じた断層長さを有する走向ランダムな鉛直断層を想定する（数値計算上は，0.1 度間隔に震源を設け，域内各点で地震危険度が等価となるよう距離を補正している）．なお，本研究では地震動指標は工学的基盤における最大加速度（PBA：Peak engineering Bedrock Accele-ration）とし，距離減衰式は安中ら(1997)の提案式を用いる（**付録 B**）．

地震リスク評価でマルチイベントモデルを用いる利点は，個別のシナリオ地震とリスクが明確に対応付けされること，広域に散在する施設の地震リスク評価，いわゆるポートフォリオ地震リスク評価が可能になること，などが挙げられる．

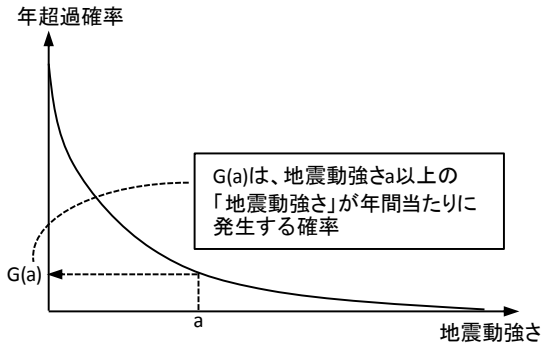


図-2　地震ハザード曲線

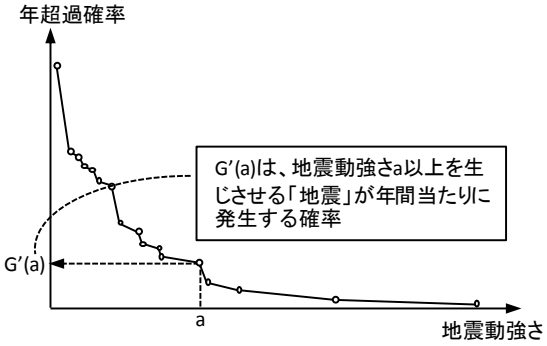


図-3　イベントハザード曲線

3.2　地震リスクの定量化手法の概要

地震リスク定量化の方法は大きく 2 つに分けられる．一つは保険業界で地震保険料率の算出に用いられている方法，もう一方は原子力施設を対象とした安全性評価技術に基づく方法である．前者は災害対策を扱うアメリカ合衆国連邦緊急事態管理庁（FEMA：Federal Emergency Management Agency of the United States）が ATC-13(1985)として取りまとめたものである．この方法は，実被害のデータを統計的に分析して**図-4** に示すような曲線を建物などの種々の構造物に対してデータベース化し，これを用いて損失額，すなわち地震リスクを求める方法である．**図-4** の横軸は，地震動強さ（最大加速度，最大速度など），縦軸は損失額を再調達価格で除した損失率になる．一般的に，**図-4** は被害関数（Damage Function）と呼ばれ，被害関数が整備されていれば，地震動強さを評価するだけで損失が求められるため簡便な手法である．

しかしながら，この方法は分類された各種構造物の平均的な損失額は求められるが，構造物個別の固有性を考慮した損失額を求めることはできない．また，被害データを用いるため，被害が伴うような大地震を経験したことのない構造物や分類されていない（データベース化されていない）特殊構造物などの損失額は求められない欠点がある．

一方，後者の原子力施設を対象とした安全性評価技術は，構造信頼性理論に基づく確率論的リスク評価技術を背景に，特に学術分野において整備されたものである．その中に，建物や各種構造物の耐震耐力を数値解析的に求め，これに実験や被害データ，各種材料のばらつきなどを考慮して被害の発生確率を求める方法がある．この方法で使われている関数をフラジリティカーブ（Fragility Curve）と呼ぶ．フラジリティカーブの例を**図-5** に示す．フラジリティカーブより，個別構造物の軽微，中破，大破，倒壊など，被害レベル毎の発生確率を求めることができる．

被害関数とフラジリティカーブは類似の形状をしているが，フラジリティカーブは縦軸が損失率ではなく，発生確率になっている．したがって，フラジリティカーブから得られる発生確率に各被害レベルの損失額を乗じることで，損失の期待値などを地震リスクとして求めることができる．

空港の地震リスク評価は，構造信頼性理論に基づき評価したフラジリティカーブを用いたリスク評価手法を用いる．理由は，統計的な手法と異なり，評価プロセスや技術的バックグラウンドが明確であり，評価結果が検証できること，航空法施行規則（改正：平成 20 年 6 月国土交通省令第 54 号）第 79 条，陸上空港の基準対象施設の性能の照査に必要な事項等を定める告示（平成 20 年 6 月国土交通大臣告示第 800 号）において，性能設計が導入され，地震リスク評価と設計との整合が取れる

こと，などがある．さらに構造物固有のリスクが把握でき，耐震的弱点や対策優先順位など，ハード対策，金融対策の区別なく総合的なマネジメントが可能となる利点もある．

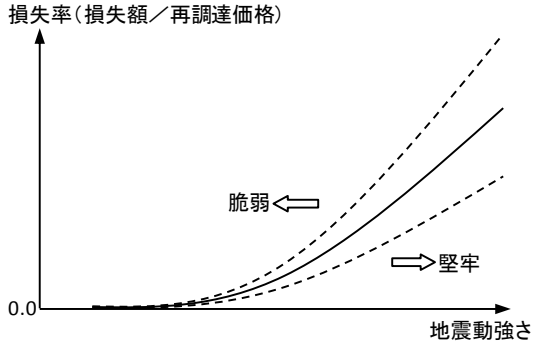


図-4　被害関数の例

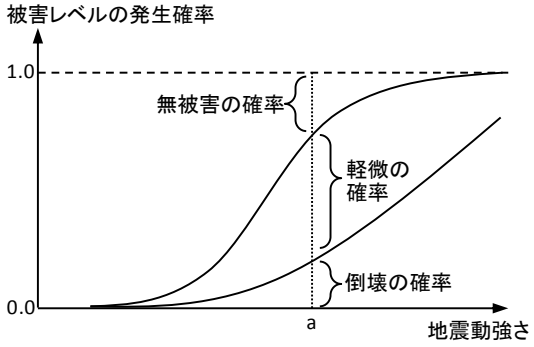


図-5　フラジリティカーブの例

3.3　イベントツリーによるリスクの定量化手法

地震による被害は，液状化，津波，建物の倒壊，天井の落下，各種設備の損壊など様々な被害を想定することができる．また被害においても，軽微，中破，大破，倒壊など，様々な被害レベルが考えられる．このように様々な被害や被害のレベルを考え併せると，想定すべき被害形態は膨大なものになる．地震リスク評価では，全ての被害形態を網羅的に分類してリスクを算出する方法としてイベントツリー（Event Tree）を採用する．

図-6 にイベントツリーを例示する．イベントツリーはまず**図-6** の左上にある被害要因を設定するが，設定では地盤や危険物など施設周辺の状況，施設を構成する構造物の現況（劣化具合など）を踏まえた耐震性，施設管理者の意見などを参照する．

図-6 の例では，津波浸水被害，建屋の震動被害，設備の震動被害の 3 つを取り上げている．各被害要因の分岐数は，津波は 2，建屋は 3，設備は 2 であるため，これらの組合せを全て考慮すると，被害形態は 12（=2×3×2）通りとなる．ただし，津波により浸水した場合と建屋が倒壊した場合は設備も含めて全損になるため，被害の物理的な従属関係を考えると，実際は 6 通りになる．

6 通りの被害形態は，樹形図の経路に表された被害要因の組合せで示され，例えば上から 4 番目は建屋が軽微な被害を受け，さらに設備が損傷した状態を表している．被害形態が明示されると，復旧費用，すなわち財物損失額などが分かる．

図-7 は，**図-6** と同じイベントツリーを基に，各被害形態の発生確率を算出したものである．発生確率の算出では，まず，被害要因が起きる確率をフラジリティカーブにより求め，これをイベントツリーの各分岐に割り当てる．

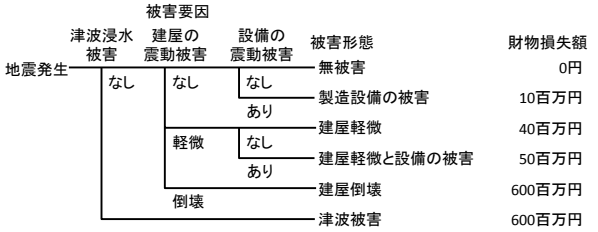


図-6　イベントツリー解析の例
（被害形態と財物損失額）

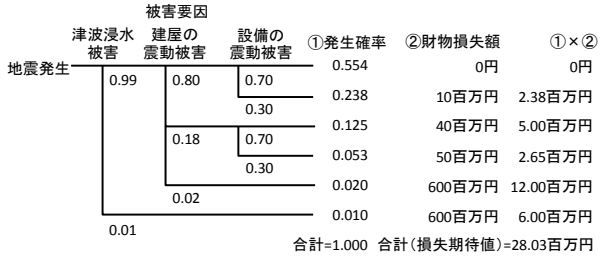


図-7　イベントツリー解析の例
（被害形態の発生確率と損失期待値）

図-7 では，津波浸水被害は 0.01 の確率で生起し，建屋の震動被害は，軽微が 0.18 の確率，倒壊が 0.02 の確率で生起する．さらに設備の震動被害は 0.3 の確率で生起するとしている．被害形態の発生確率は分岐に与えた確率をツリーの上流（左側）から下流に向けて掛け合わせていくことで算出される．例えば上から 4 番目の状態の発生確率は 0.053（=0.99×0.18×0.3）となる．イベントツリーにより求められた発生確率は各被害形態の財物損失額の発生確率となるため，それらの関係から**図-8** に示す確率関数（棒グラフ）を求めることができる．さらに確率密度関数として近似した曲線も評価できる．**図-8** は地震リスクの実体を表現したものであるが，何らかの意思決定・判断をするためには，同図の確率分布

から地震リスクの代表値を求めると分かり易い．例えば，期待値や最頻値，あるいは非超過確率に対応した損失額などが代表値として挙げられる（**図-8** には期待値と90%非超過確率に対応した各数値を付記している）．

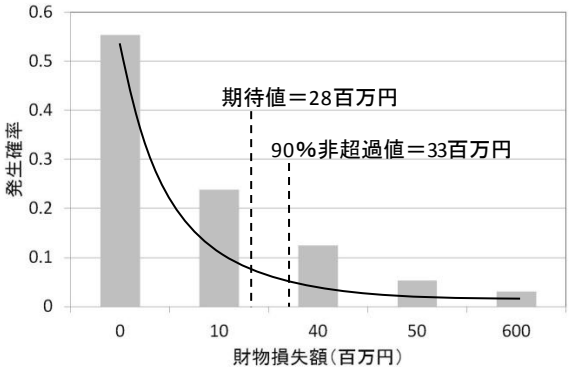


図-8　財物損失に関する確率関数

3.4　損傷確率とフラジリティカーブの評価

(1)構造信頼性理論と損傷確率

構造物の設計では，構造物が持つ耐力は外力を上回る必要があり，これが構造物の安全を確保する設計の基本的な考え方である．一方，構造信頼性理論では，耐力と外力はばらつきを伴った確率変数と考える（**図-9**）．

いま，耐力を確率変数 C ，外力（作用地震動）を確率変数 R とおくと，構造物が安全であるための条件式（性能関数）は以下のようになる．

$$R \le C \tag{1}$$

構造信頼性理論では，(1)式で示させる性能関数，すなわち R が C 以下である確率を求めることになる．

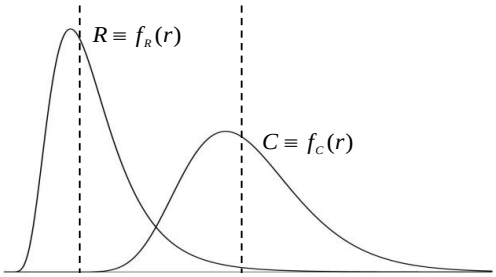


図-9　耐力と応答の関係

R が C 以下である確率を求めるために，確率変数 C, R の確率分布を考える．C, R は共に正であるから，対数正規分布を仮定すると，C, R はそれぞれ $LN(\lambda_R, \zeta_R)$, $LN(\lambda_C, \zeta_C)$ に従う確率変数と表すことができる．なお，λ_R, λ_C, ζ_R, ζ_C は，C と R の対数の平均値と対数の標準偏差である．

ここで，(1)式を以下のように変形する．

$$C / R = Z \ge 1.0 \tag{2}$$

このとき確率変数 Z の確率密度関数は，C, R が対数正規分布であることから以下のように表される．

$$f_Z(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\varsigma_Z z} \exp\left\{ -\frac{1}{2}\left(\frac{\ln z - \lambda_Z}{\varsigma_Z} \right)^2 \right\} \tag{3}$$

ここに，

$$\lambda_Z = \lambda_C - \lambda_R \tag{4}$$

$$\varsigma_Z^2 = \varsigma_C^2 + \varsigma_R^2 \tag{5}$$

である．なお，ζ_Z は耐力と応答の対数標準偏差の二乗和平方根をとったもので，複合偏差である．Z が 1.0 以上，すなわち構造物が地震時に安全である確率は以下のよう求められる．

$$p_s = \int_{1.0}^{\infty} f_Z(z)\, dz \tag{6}$$

一方，安全ではない状態を損傷と定義すると，損傷確率 p_f は安全の余事象の確率として以下のように求められる．

$$p_f = \int_{0}^{1.0} f_Z(z) dz \tag{7}$$

信頼性設計では，(7)式から算出される損傷確率が許容できる値以下であることを規範として，構造物の安全性のレベルを確保することになる．

(2) フラジリティカーブの評価

フラジリティカーブは，地震動強さ（最大速度，最大加速度など）に応じて算出した損傷確率を，地震動強さを横軸に一価連続な関数として示した曲線である．

(7)式より，損傷確率 p_f は以下のようになる．

$$p_f = \int_{0}^{1.0} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\varsigma_Z z} \exp\left\{ -\frac{1}{2}\left(\frac{\ln z - \lambda_Z}{\varsigma_Z} \right)^2 \right\} dz \tag{8}$$

ここで，(8)式の積分変数を以下のように変換する．

$$x = r_m z \tag{9}$$

ここに，r_m は作用地震動の中央値である．積分変数の変化により(8)式は以下となる．

$$F_X(r_m) = \int_0^{r_m} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\varsigma_Z x} \exp\left\{ -\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \ln c_m}{\varsigma_Z} \right)^2 \right\} dx \tag{10}$$

上記は以下の関係を用いている．

$$\lambda_z = \ln z_m = \ln c_m - \ln r_m \tag{11}$$

ここに，c_m は耐力の中央値である．(10)式は作用地震動の中央値 r_m を変数とした非超過確率関数となり，これがフラジリティカーブである．フラジリティカーブから求められた損傷確率は**図-7** のイベントツリーやシステムモデルに用いる．なお，作用地震動の中央値は加速度や速度といった構造物の耐震性を直接説明できる指標を使う．

一方，耐力の中央値は，被害レベル（軽微，中破，大破，倒壊など）のクライテリア（層間変位や加速度など）を設定した上で，対象構造物の設計図書などから，そのクライテリアに達する耐力値を作用地震動と同じ指標で評価する．

3.5　地震損失関数

(1) 財物損失

地震損失関数は，横軸に地震動強さ，縦軸に損失額や損失率の期待値や 90%非超過値を示した関数の総称である．これらの値は前述**図-8** の損失の確率分布から求めるのが一般的である．なお，本報では後述する財務影響分析を効率的に行う都合上，**図-10** に示すように財物損失（再建費）や逸失利益（営業損失）などを地震損失関数とする．

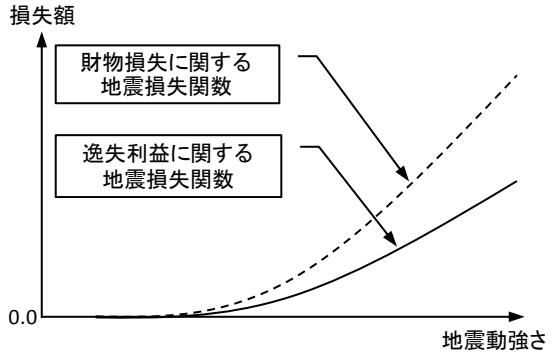


図-10　地震損失関数

(2) 事業停止期間と逸失利益

事業停止期間は，様々なシナリオ地震に対して復旧曲線を求め，復旧曲線から事業停止期間の期待値を算出する．復旧曲線は**図-11** に示すように横軸を復旧期間，縦軸を性能の低下率，あるいは復旧率などとした関数で，**図-11** 中のハッチングした部分の面積が事業停止期間の期待値となる．

一般的に復旧曲線は，性能を確率変数とした場合の曲線と，事業停止期間を確率変数とした場合の 2 つが求められる．ただし，事業停止期間の期待値はどちらの復旧曲線から求めても同じになるため，本報では事業停止期間を確率変数として算出した復旧曲線を説明する．

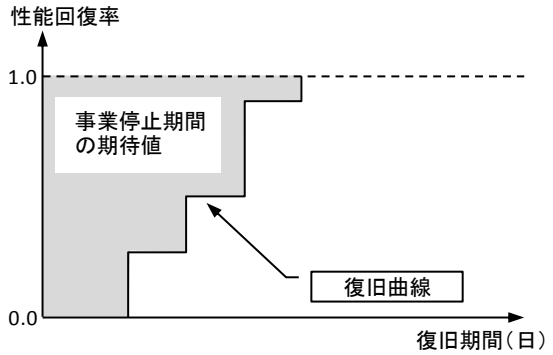


図-11　復旧曲線と事業停止期間の期待値

事業停止期間を確率変数 t として場合の復旧曲線 $R_T(r)$は，性能 r を条件とした t の確率密度関数 $f_T(t|r)$より次式で表される．

$$R_T(r) = \int_0^{\infty} t \cdot f_T(t \mid r) dt \tag{12}$$

また，事業停止期間の期待値は次式となる．

$$E(T) = \int_0^{1.0} R_T(r) dr \tag{13}$$

(13)式の $E(T)$を様々な地震動強さに対して算出し，この事業停止期間に売上高などを乗じることで逸失利益が求められる．この逸失利益を縦軸に，横軸に地震動を取ると逸失利益の地震損失関数を得る（**図-10** 参照）．

次に，空港や生産施設は複数の施設や機能から構成されるケースが多い．この場合，直列や並列，あるいは直並の混合システムとして記述し，システムに関する構造信頼性理論を使い復旧曲線を評価する．直列システムで

は，システムを構成する要素の復旧期間の MAX 演算を行う．具体的には性能 r を条件とした復旧時間 t の非超過確率関数 $F_T(t|r)$は以下のように求められる．

$$F_T(t\,|\,r)=\prod_{i=1}^{n}F_{Ti}(t\,|\,r) \tag{14}$$

ここに，$F_{Ti}(t|r)$ 要素 i の非超過確率関数である．並列システムでは以下となる．

$$1-F_T(t\,|\,r)=\prod_{i=1}^{n}\left(1-F_{Ti}(t\,|\,r)\right) \tag{15}$$

混在システムについても(14)，(15)式を用いることで求められる．詳細は中村(2011)の研究を参照されたい．

3.6　統計解析による複合偏差

フラジリティカーブに関する統計評価は兵庫県南部地震以降活発になり，建築物，道路橋脚及び日本と米国の道路橋のフラジリティカーブを比較した研究（中村ら(1996)，林ら(1997)，山崎ら(1998)，中村ら(1998)，Shinozuka ら(1999)，村尾ら(2000)，望月ら(2000)，Shinozuka ら(2001)）などがある．エキスパートジャッジにより求めた事例も含め，統計解析により評価したフラジリティカーブのばらつき（対数標準偏差）の比較例を吉川ら(2007)が整理しており，これを**表-1** に示す．**表-1** より，フラジリティカーブの複合偏差 ζ_Z は，建築物では 0.5～0.8 程度，道路橋脚では，0.4～0.7 程度の範囲と考えられる．

表-1　対数標準偏差の報告例（吉川ら(2007)）

構造物	損傷形態	対数標準偏差	参考文献
高速道路橋	C	0.59	中村他(1998)
	B	0.45	
	AS or A	0.43	
Highway Bridges	minor	0.84	Shinozuka et al.(2001)
	moderate	0.72	
	major	0.65	
	collapse	0.67	
Highway Bridges	slight	0.6 (recommended)	Mander(1999)
	moderate		
	extensive		
	complete		
Railway Bridges	slight	0.45	HAZUS99(1999)
	moderate	0.55	
	extensive	0.60	
	complete	0.70	
Buildings (low-rise reinforced concrete)	slight	0.75	
	moderate	0.76	
	extensive	0.81	
低層戸建住宅	小破	0.538	望月他(2000)
	中破	0.445	
	大破	0.467	
中高層住宅	小破	0.672	
	中破	0.679	
	大破	0.677	
Buildings (low-rise wood frame)	slight	0.84	Grossi(2000)
	moderate	0.90	
	extensive	1.00	
	complete	0.97	

なお，安中ら(1997)などの研究によると，距離減衰式の誤差のばらつきは，対数標準偏差で 0.45～0.50 程度である．

3.7　地震動指標と地盤増幅

地震動指標については，最大加速度や最大速度，あるいは加速度応答スペクトルなどの指標があるが，本研究では，フラジリティカーブの耐力中央値は工学的基盤の最大加速度に変換したものとする．変換方法としては，まず，ターゲットとなるシナリオ地震を設定し，その地震による工学的基盤における加速度応答スペクトルを算出する．当該地盤の増幅特性を加速度応答スペクトル比として算出する．加速度応答スペクトル比は同一の加速度レベルを持つ複数の地震波を用意し，重複反射理論や非線形時刻歴解析などを用いて地表面と工学的基盤面の加速度応答スペクトルを求め，その比を採ったものである．耐力中央値とともに対象構造物の固有周期が分かれば，地表面の加速度応答スペクトルと，加速度応答スペクトル比を用いて，工学的基盤における最大加速度に換算した耐力中央値を求めることができる．なお，地震動に依存した地盤の非線形効果を考慮する場合には，工学的基盤最大加速度への変換は，非線形の影響を応答倍率に反映させる必要であるので注意する．

3.8　イベントリスクカーブとリスクカーブ

(1) イベントリスクカーブ

マルチイベントモデルにより評価した各シナリオ地震の地震動強さに対してイベントツリー解析を実施すると，前述の**図-8** で示した財物損失額の期待値や 90%非超過値が求められる．そして各シナリオ地震の年発生確率の累積を縦軸にとり，横軸に対応する損失率の期待値，あるいは 90%非超過値をとると，**図-12** に示す曲線を描くことができる．図中の各点はシナリオ地震である．これをイベントリスクカーブと呼ぶ．また，イベントリスクカーブの各数値を，損失の大きいイベント順に数表化したものを一般的にイベントリスクリストと呼ぶ．リストの項目としては，シナリオ地震，シナリオ地震の発生確率，損失の期待値や 90%非超過値があり，その他，評価目的に応じて各種意思決定情報を加える．なお，本研究では保険付保の検討を目的としており，イベントリスクリストの具体的な項目については，後述の 3.10(3)a)で述べる．

(2) リスクカーブ

イベントリスクカーブは**図-12** に付記したように，損

失評価の不確実性から確率分布を持つ．そして，この確率分布の 90%非超過値を各シナリオ地震に対して結んだものが 90%非超過値のイベントリスクカーブである．

一方，イベントリスクカーブに表させる各損失の確率分布を用いれば，損失の超過確率であるリスクカーブが算出される（**図-13**）．リスクカーブは次式で求められる．

$$G_S^{(\tau)}(s) = 1 - \prod_{i=1}^{m} \left\{ 1 - P_i^{(\tau)} \int_s^{s_{\max}} f_S(\zeta \mid i) d\zeta \right\} \qquad (16)$$

ここに τ は期間（1 年間，30 年間など），$P_i^{(\tau)}$は τ 年間にシナリオ地震 i に遭遇する確率，$f_S(s|i)$ はシナリオ地震 i による損失額の確率密度関数，m は考慮するシナリオ地震の数，$s_{\max}$ は施設の再調達価格である．

一般的に，90%非超過値のイベントリスクカーブやリスクカーブの縦軸の 1/475 に対応する損失額（損失率）を PML（Probable Maximum Loss：予想最大損失）と呼び，不動産売買や証券化などの分野で地震リスク診断の代表値として用いられている．

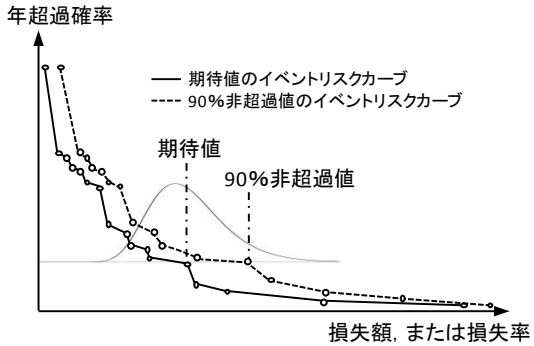


図-12　イベントリスクカーブ

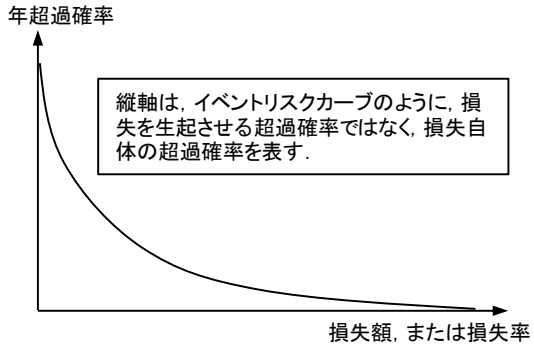


図-13　リスクカーブ

3.9　財務影響分析及びストレスの視覚化

(1) 財務影響分析

図-14 に地震リスク評価の結果を踏まえた財務影響分析の手順を示す．**図-14** より，まず①ベースとなる地震リスクを考慮する前の財務諸表（損益計算書，貸借対照表及びキャッシュフロー計算書）を今後の事業計画などを踏まえて推計する．そして，設定した評価期間中に地震が発生したと仮定し，②財物損失のうちの除去損を計上する．除去損を計上する逸失資産については，損壊した有形固定資産は簿価上の価値を，損壊した仕掛品や在庫品は逸失棚卸資産としての再調達価値をそれぞれ計上する．一方，損益計算書では資産の除去損として特別損失を計上する．ここで，法人税が減ることに注意を要する．

③逸失利益を考慮する．逸失利益は企業活動ができない期間の売上減を当初の売上からマイナス計上し，さらに営業できない期間の外注費などもマイナス計上する．逸失利益の影響は損益計算書とキャッシュフロー計算書の営業活動キャッシュフローを悪化させ，その結果は貸借対照表にも影響する．

④再建費を計上する．再建費は壊れて使えなくなった施設を元に戻す復旧費用であり，新たな設備投資と解釈できる．建物や設備機器などの有形固定資産が主な対象になる．このとき，貸借対照表の流動資産が固定資産に移動し，損益計算書には変化はない．ここで問題が生じるのは流動資産の中の現金と現預金に，再建に必要な費用がない場合である．この場合には外部から調達しなければならず，地震保険や代替の金融対策，借入などの対策が必要になる．

通常の財務影響分析はここまでであるが，地震保険などの金融対策を行った場合には，発災時には特別利益として保険金などが入る．そこで資金提供の効果を業績指標の改善効果として確認する必要がある．⑤は資金提供を受けた場合の財務諸表への影響を分析する項目である．

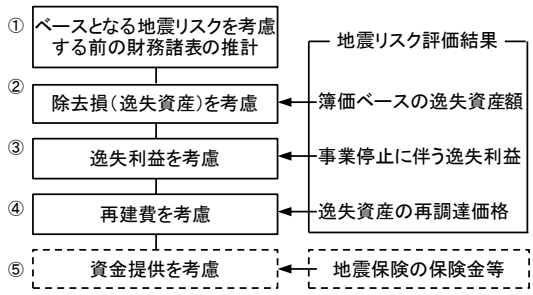


図-14　財務影響分析の手順

(2) 財務ストレス関数

本研究では，様々なシナリオ地震に応じた地震リスクが財務諸表にどの程度のストレスを与えるのかを分析し，

視覚化する．本報ではこれを財務ストレス関数と呼ぶ．

地震損失関数から財務ストレス関数までの流れを**図-15** に示す．**図-15** より，まず対象となる空港施設の地震損失関数を評価する．地震損失関数はマルチイベントモデルの各シナリオ地震の地震動強さに対してイベントツリー解析，システムモデルの解析を実施し，地震動強さを横軸，縦軸に損失率（除去損，逸失利益及び再建費）を取った関数である．

ベースとなる財務諸表に地震損失関数から除去損，逸失利益，再建費の順に反映させ，任意の地震動強さに応じた財務諸表を作成して業績指標（流動比率，当座比率，自己資本比率など）を算出する．

財務ストレス関数は，各シナリオ地震による地震動強さを横軸（地震損失関数と同じ）に，縦軸に業績指標を取った関数である．同関数より．業績指標に対する空港運営権者の許容限界から，どの程度のシナリオ地震，あるいは地震動強さ（限界点）で許容限界を超えるのかを見極めることができる．

財務ストレス関数より，業績指標が許容限界以内に収まる場合には，地震リスクが財務に与える影響は小さいと判断できる．一方で，許容限界を超える場合には，地震保険やその他代替金融対策を検討/実施する必要がある．そして，**図-14** に示したように，資金提供を受けた場合の財務分析を行い，併せて財務ストレス関数を作成する．金融対策を行わないケースの財務ストレス関数と比較することで，様々なシナリオ地震に応じた金融対策の効果を確認することができる．

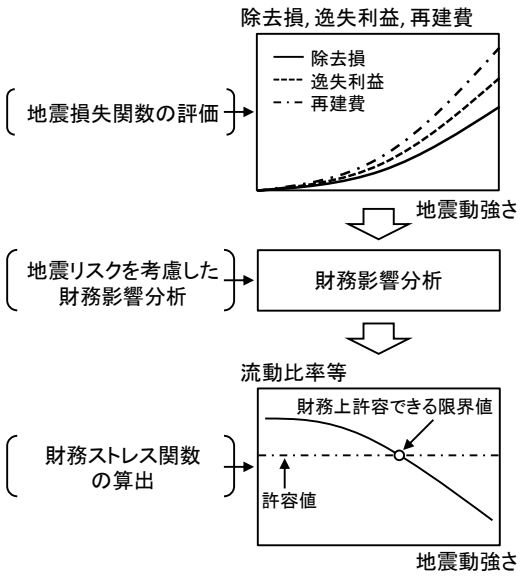


図-15　財務ストレス関数の算出の流れ

3.10　地震保険の設定

(1) 地震保険の概要

保険金の支払いの仕組みについて説明する．保険には支払限度と免責の上下限があり，損失の全てをカバーしてくれるわけではない．保険金の支払いは，実際の損失額が免責以下の場合，被保険者がリスクを保有し，免責以上支払限度以下では，実際の損失額から免責を差し引いた額が支払われる．支払限度以上の損失が発生した場合には支払限度から免責を差し引いた額が一律に支払われる．この仕組みをリスクカーブで示すと**図-16** のようになる．**図-16** の横軸は損失額，あるいは損失額を再調達価格で除した損失率であり．縦軸は向こう 1 年間の損失額，あるいは損失率を超える確率である．

図-16 より，保険契約者のリスクカーブは免責と支払限度の範囲において，現状のリスクカーブ（保険未加入）に比べて低下する．この低下分は保険会社に転嫁したリスクになる．この転嫁したリスクの期待値を保険純率，あるいは純保険料などと呼ぶ．保険純率は現状のリスクカーブの期待値（現状のリスクカーブの下の部分の面積に相当）から保険加入時のリスクカーブの期待値（保険加入時のリスクカーブの下の部分の面積に相当）を差し引いたもの（図のハッチング部分）である．保険契約者が支払う年間の保険料は，この純保険料に付加保険料とリスクロードを加えたものになる．付加保険料は保険会社の経費に相当するが，リスクロードは収益源となり危険手当のようなものである．

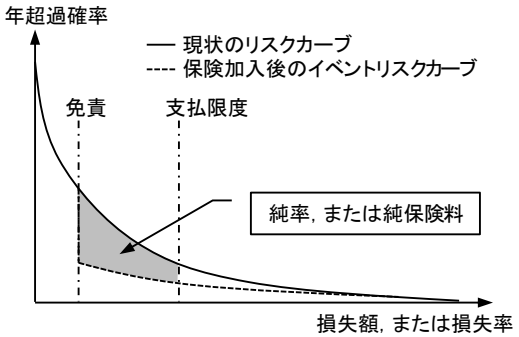


図-16　リスクカーブによる保険の支払いの仕組み

一方，保険会社は多数の保険契約を持つことで大数法則（保険数理）を貫徹させ，保険収支の定常（黒字）化を図っている．ところが，巨大地震が発生すると，多くの保険金を一時期に支払わなければならない．このようなリスクを集積リスクと呼ぶが，この時，引き受け能力を超えるような状況に至ると，保険収支は破綻することになる．そこで，保険会社は保険収支の定常化，引き受

け能力の補完などを目的に，**図-17** に示すように，再保険会社と再保険契約を結ぶことになる．再保険会社の大手としては，Munich Re(ドイツ)., Swiss Re.(スイス), Berkshire Hathaway Re.(アメリカ)などがある．

さらに，多数の保険会社に分散委託することもある．このため，再保険の評価や契約内容に精通した再保険ブローカーなどの仲介者が介在する．このように，リスクを分散させる仕組みや方法は複雑であり，これが割高な保険料の一因になっている．再保険市場の動向としては，再保険会社の競争激化と共に保険料率は下がるものの，巨大自然災害の発生に伴い，再保険会社の撤退／倒産が発生し，保険料率は上昇する．このような上昇／下降が繰返し起きることになり，地震保険の料率は安定しているわけではない．

以上より，保険料は再保険契約や再保険市場の動向に依存することになるが，保険純率に相当する部分については，保険会社の裁量の範囲になる．

そこで，保険会社へのリスク転嫁を少なくする．つまり保険純率を低くする．これにより保険会社の負担は少なくなり，必然的に保険料を下げることができる．具体的には，**図-16** に示す免責を上げる，支払限度を下げるなどを行う．一方で，免責を上げる，支払限度を下げるなどによって，地震発生時に保険契約者が負担しなければならない損失額は増えることになる．そこで，保険契約者にとって合理的な免責，支払限度の設定が求められると共に，元受保険会社が有利な再保険契約を締結できるよう，長期の保険契約についても検討する必要がある．いずれにしても地震時による財務影響分析が必要になるが，この点については後述する．

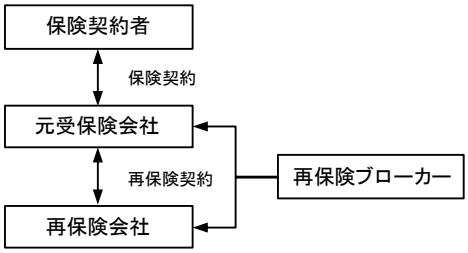


図-17　再保険の契約関係

ここで個人住宅の地震保険について解説する．高橋（2012）によると，個人住宅・家財の地震保険は総損失額が一定額を超えると，国が再保険者として負担するスキームができている．このため，地震保険の料率は地域，構造タイプなどによって一律に決められている．例えば，東京に所在する耐火建築物，準耐火建築物及び省令準耐火建物など以外の建物の場合，一年間の保険料は保険金額の 0.362%となる．この料率を基準保険料率と呼び，その内訳は純保険料率と付加保険料率から構成される．ただし，公共性の高い保険であることから，付加保険料には保険会社の利潤は入っておらず，損失調査費，契約事務費，保険代理店手数料などの最低限必要となる費用からなる．

(2)公共施設等運営権を民間事業者に付与する場合のリスク分担の考え方

改正 PFI 法により，公共施設などの運営権を民間事業者に付与する，いわゆるコンセッション方式が導入された．同方式は，土地や施設の所有権を国に残したまま，一定期間（30～50 年程度）の施設の運営，維持及び整備などを民間企業に任せ，民間企業は利用料の徴収権を得る仕組みである．

このような背景のもと，空港については，民活空港運営法の制定及び民間の能力を活用した国管理空港等の運営等に関する基本方針（平成 25 年 11 月国土交通省）の策定が行われた．これを受け，仙台空港について実施方針及び実施契約書案が示され，リスク分担に関する枠組みが明示された．

実施方針にあっては，運営権者は空港基本施設（滑走路，エプロン等）の維持管理（更新投資）を行うものとされ，これには局部的破損等の原状回復，耐震性向上等も含まれるとしている（**付録 C**）．

実施契約書案にあっては，運営権設定対象施設（空港基本施設を含む.）について支払限度 10 億円の土木構造物保険・地震危険担保特約（地震・津波・噴火を対象）の付保を義務付けている．保険市場全体において保険料率が大きく変動する場合は，付保範囲の変更が可能であり，運営権者が当該保険により復旧ができない場合，国が復旧（事業継続措置）することが可能となっている．

国は多様な人格を有するが，運営権を設定した動機を踏まえ，財政的立場の人格に着目する．耐震性向上や原状回復といった地震対策であっても，国は国費を節約したいので，地震リスクをできるだけ運営権者に転嫁したい．特に運営権者が国所有施設に付保する保険については，できるだけ，支払限度を高く，加入者は同じ保険料なら免責は低く設定したい．他方，地震の被害により運営権者の経営が困難になることは，リスクの転嫁先がなくなることを意味する．したがって，国の立場であっても運営権者の経営を持続することが，リスクを回避する意味で重要な要素となる．

運営権者の立場としての人格は，運営権対価などの投

資に見合った収益を得る必要があり，運営事業の性格から投資の回収に 10 年単位の長期間を要することから，その間に地震の被害があっても経営を持続することが求められる．また，国所有施設が被災してもできるだけ早期に原状回復することは逸失利益の最小化に繋がる．

このような観点から，国所有施設の保険が適切に設定されるだけでなく，運営権者が地震リスクに対し何らかの対策を講じ経営の持続性を高めることは，国と運営権者の共通の利益である．

実施契約書案中の優先交渉権者選定基準の策定理由にあっては，運営権者の財務に過度なストレスが生じた場合の保険，コミットメントラインなどの施策の提案を受けるものとし，運営権者の財務的救済への貢献を審査のポイントとしている（**付録 D**）．

したがって，本研究では，運営権者の所有施設を対象とした保険の設計と効果に着目する．保険を考慮した財務影響分析では，まず，運営権者が財務諸表に計上する地震損失は，運営権者が所有権を持つ施設に限り，それ以外の施設（国の所有）については，国が負担することを原則とする．

具体的には，本研究では除去損及び再建費に関する地震損失関数を評価するものの，これは運営権者の所有施設と国の所有施設それぞれに対して算出する．また，運営権者には保険加入が原則であるため，国が所有権を持つ施設にかける保険料については，運営権者の財務諸表上に計上しなければならないことに留意が必要である．なお，財務影響分析では，逸失利益に関する地震損失関数を考慮するが，これについては運営権者や国の施設の所有権の区分けは無関係に，空港施設全体で考慮することになる．

(3) 保険の設計

a) 運営権者所有施設の保険の設計

保険の設計は，リスクカーブを作成し，これに支払限度と免責を設定する作業である．まず，シナリオ地震のリスクを評価したうえで，イベントリスクリストを作成する．イベントリスクリストは，シナリオ地震別に発生確率，財物損失率（再調達ベース，「損失率（再建費）」という.），財務影響分析から得られる現金・現預金，流動比率などの業績指標などで構成する（後述の**表-12** など参照）．また，損失率（再建費），現金・現預金，流動比率は 90%非超過値を使う．理由は，リスク評価の不確実性を考慮すると，期待値では楽観的過ぎ，なるべく最悪に近い状態を想定するためである．

支払限度の具体的な設定方法であるが，まず①作成したイベントリスクリストから，流動比率などの財務指標を参照し，倒産など経営上困難な状況に陥らない限界の値として閾値を決定し，その現金・現預金を読む．②最悪と想定できる地震（以下，「最悪地震」という.）を，保険を考えるうえで有意な発生確率や関係者間の認知度などから決定する．その最悪地震の発生による現金・現預金を読む．そして①の現金・現預金と②の現金・現預金の差を求める．この金額が，最悪地震が発生した場合の必要資金である．必要資金は，再建費及び逸失利益並びに自己資金（現金・現預金等）の充当から構成されるが，そもそも，地震保険の付保対象は財物損失に限られ，その再調達価格（再建費）を超えて支払われることはない．

したがって，必要資金について，保険で賄うことができないケースもでてくる．これを確認するために，必要資金を，再調達価格で除すことにより無次元化し，損失率に換算したものを a と置く．また最悪地震の損失率を b，免責を d と置く．そして以下の不等式が成り立つ場合，

$$a > b - d \tag{17}$$

最悪地震が発生した場合の必要資金について，保険金を流用しても賄うことができない．つまり，保険以外の代替的金融対策あるいはハード対策の検討が必要となる．

一方，以下の不等式が成り立つ場合には，

$$a \le b - d \tag{18}$$

必要資金について保険金を流用して賄うことができる．この場合の支払限度を b と置くと，自己資金（現金・現預金等）の充当を最大限考慮した免責を算出するためには，(18)式が成立する最大の免責を求めればよく，d は b から a を差引いたものとなる．また，支払限度 b を下げ，d を下げることもできるが，免責は保険料，すなわち保険純率に顕著に影響することから，可能な限り高く設定し，保険純率（保険料）を最小化する必要がある．つまり，支払限度は b となる．

b) 国所有施設の保険の設定

国が所有する施設に対し，保険を設定する場合には，まず，国が運営権者に譲渡する期間（例えば 30 年間）を想定して，今後 30 年間のリスクカーブを作成する．そして 30 年間に国が地震による損失を負担しなければならない可能性（確率）を設定する（**図-18**）．すなわち，この確率に対応する損失額が，運営権者が分担しなければならない地震リスクである．その結果，国及び運営権

者のリスクカーブは**図-19** のように分担される．また，前述したように，運営権者はこの分担分をすべて保険で賄うとすると，この損失額がそのまま保険の支払限度額になる．

確率でリスク分担を規定する利点は，空港の規模や地震危険度の地域性などの影響を受けない，全国一律の判断尺度が確保され，公平性が保たれる点にある．また，国が負担する損失額の源泉は諸税であることから，負担はできるだけ低く抑えるよう配慮する必要がある．なお，空港の重要度に応じて基準の確率を階層区分することは排除していない．

他方，国は保険の支払限度額を超える損害が発生した場合にのみ，補填することになる．国の所有物は運営権者の所有物に比べ，最大地震による損失が小さく，保険料率も小さいと考えられること，また，運営権者の財務諸表には逸失利益の負の計上しか生じないことから，運営権者が免責を設定する利点が少ないと考えられる．これを踏まえ本研究では，国所有の施設の地震保険には原則免責は考慮しないこととする．

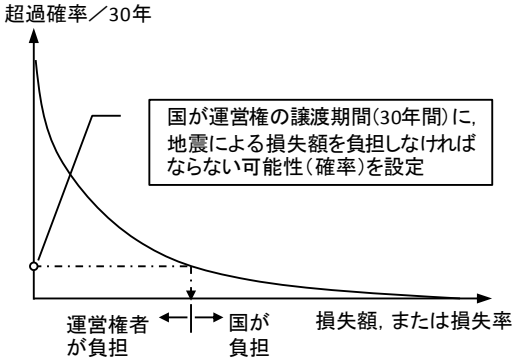


図-18　国所有施設の保険の支払限度の設定方法

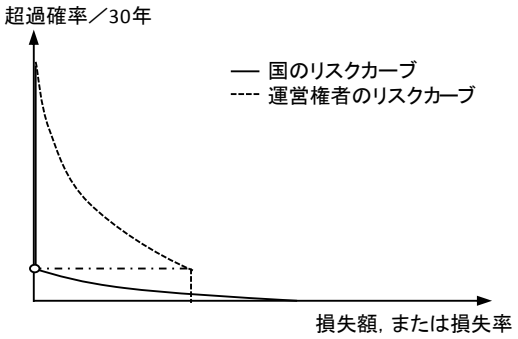


図-19　国及び運営権者のリスクカーブ

4. 評価事例

4.1　標本空港の設定

(1) 標本空港

前章までの体系化手法を用いて，地震リスク評価，財務影響分析，保険の設計とその効果の検討を，空港施設を対象にケーススタディを行う．ケーススタディを行う空港は，津波の影響が及ばない内陸部の大都市圏に立地する空港とする．また，当該空港はいわゆるコンセッション方式に基づき，民間の空港運営会社により管理・運営されているものとする．ケーススタディの対象となる空港は以下，標本空港と呼ぶこととする．

(2) 標本空港の立地

ケーススタディでは，地震危険度の影響を見るため，同一の標本空港が 2 つの地域に所在した場合を比較する．一つはＦ県の任意の地点に，もう一つはＯ県の任意の地点に，それぞれ所在するものとする．

4.2　標本空港のフラジリティ情報の設定

標本空港の地震リスクを評価するためのフラジリティ情報を**表-2**，**表-3** に示す．表より，地震リスクを評価する際の施設数は計 16 とし，施設毎に被害要因ならびに被害レベルを設定している．表中の耐力中央値は工学的基盤面上に換算した最大加速度（PBA）であり，これらは既往の研究成果などを参考に仮定した，また，複合偏差についても，既往の研究成果などを参照し，耐力の対数標準偏差を 0.3，作用地震動の対数標準偏差を 0.45 としてこれらの二乗和平方根から，複合偏差を 0.54 と設定した．この値は吉川ら(2007)の調査結果と整合的である．その他，復旧日数及び運航能力（性能）も適宜仮定している．本来であれば，耐力中央値は対象構造物の設計図書などから固有の耐震性能を算出し，設定する必要がある．

なお，表中右側備考に，①構造物の所有者，②財物損失評価で考慮及び③事業停止期間評価で考慮，の欄があるが，①は，運営権者は国の所有物に関しては震災で損傷したとしてもリスクを負担しない（保険料のみ支払う）ため，計算上その区別をつけるため設けている．次に②，③については，対象構造物によっては空港機能の復旧期間の評価にのみ関わる構造物があり，これを区別するために設けている．例えば，管制塔は運営権にも含まれておらず，保険の対象にもなっていないため，財物損失の評価では考慮しないが，空港機能上は重要であり，事業停止期間の評価では考慮すべきである．

また，**表-3** の最下部の対象構造物の欄に「点検」を項目として導入しているが，これは当該施設地点に150cm/s^2 の地震動が観測された場合は空港を一時閉鎖して，場内点検が行われることを仮定したものである．

表-2　標本空港のフラジリティ情報（1/2）

対象構造物，被害要因及び被害レベル				フラジリティ情報					備考		
No.	対象構造物	被害要因	被害レベル	耐力中央値（cm/s^2）	複合偏差	損失額（百万円）	復旧日数	性能（%）（運航機能）	構造物の所有者	財物損失額評価で考慮	事業停止期間評価で考慮
(1)	場周柵	監視カメラ	無被害	－	－	－	0	100%	国	○	○
			破損	800	0.54	10	7	0%			
		場周柵	無被害	－	－	－	0	100%			
			損傷	800	0.54	100	30	0%			
(2)	場面管理棟	場面管理設備	無被害	－	－	－	0	100%	国	○	○
			損傷	800	0.54	90	7	0%			
		非構造部材（内外装等）	無被害	－	－	－	0	100%			
			損傷	500	0.54	90	15	0%			
		建屋	無被害	－	－	－	0	100%			
			小破	600	0.54	45	7	0%			
			大破	1000	0.54	270	30	0%			
(3)	管制塔	管制塔設備	無被害	－	－	－	0	100%	別機関	×	○
			損傷	600	0.54	－	3	0%			
		非構造部材（内外装等）	無被害	－	－	－	0	100%			
			損傷	700	0.54	－	15	0%			
		建屋	無被害	－	－	－	0	100%			
			小破	700	0.54	－	7	0%			
			大破	1200	0.54	－	30	0%			
(4)	滑走路	液状化	無被害	－	－	－	0	100%	国	○	○
			小規模液状化	400	0.54	23	3	20%			
			大規模液状化	800	0.54	450	20	0%			
(5)	誘導路	液状化	無被害	－	－	－	0	100%	国	○	○
			小規模液状化	400	0.54	45	3	20%			
			大規模液状化	800	0.54	900	20	0%			
(6)	エプロン	液状化	無被害	－	－	－	0	100%	国	○	○
			小規模液状化	400	0.54	150	3	20%			
			大規模液状化	800	0.54	3,000	20	0%			
(7)	旅客ターミナルA	建築設備	無被害	－	－	－	0	100%	運営権者	○	○
			損傷	800	0.54	370	7	0%			
		手荷物搬送システム	無被害	－	－	－	0	100%			
			破損	600	0.54	185	20	20%			
		非構造部材（内外装等）	無被害	－	－	－	0	100%			
			損傷	700	0.54	370	15	0%			
		建屋	無被害	－	－	－	0	100%			
			小破	600	0.54	185	7	0%			
			大破	1000	0.54	1,110	30	0%			
(8)	旅客ターミナルB	建築設備	無被害	－	－	－	0	100%	運営権者	○	○
			損傷	800	0.54	3,000	7	0%			
		手荷物搬送システム	無被害	－	－	－	0	100%			
			破損	600	0.54	1,500	20	20%			
		非構造部材（内外装等）	無被害	－	－	－	0	100%			
			損傷	700	0.54	3,000	15	0%			
		建屋	無被害	－	－	－	0	100%			
			小破	600	0.54	1,500	7	0%			
			大破	1000	0.54	9,000	30	0%			
(9)	旅客ターミナルC	建築設備	無被害	－	－	－	0	100%	運営権者	○	○
			損傷	800	0.54	950	7	0%			
		手荷物搬送システム	無被害	－	－	－	0	100%			
			破損	600	0.54	475	20	20%			
		非構造部材（内外装等）	無被害	－	－	－	0	100%			
			損傷	700	0.54	950	15	0%			
		建屋	無被害	－	－	－	0	100%			
			小破	600	0.54	475	7	0%			
			大破	1000	0.54	2,850	30	0%			
(10)	旅客ターミナルD	建築設備	無被害	－	－	－	0	100%	運営権者	○	○
			損傷	800	0.54	2,700	7	0%			
		手荷物搬送システム	無被害	－	－	－	0	100%			
			破損	600	0.54	1,350	20	20%			
		非構造部材（内外装等）	無被害	－	－	－	0	100%			
			損傷	700	0.54	2,700	15	0%			
		建屋	無被害	－	－	－	0	100%			
			小破	600	0.54	1,350	7	0%			
			大破	1000	0.54	8,100	30	0%			
(11)	貨物ビルA	非構造部材（内外装等）	無被害	－	－	－	0	100%	運営権者	○	×
			損傷	700	0.54	175	15	0%			
		建屋	無被害	－	－	－	0	100%			
			小破	600	0.54	175	7	0%			
			大破	1000	0.54	1,050	30	0%			
(12)	貨物ビルB	非構造部材（内外装等）	無被害	－	－	－	0	100%	運営権者	○	×
			損傷	700	0.54	215	15	0%			
		建屋	無被害	－	－	－	0	100%			
			小破	600	0.54	215	7	0%			
			大破	1000	0.54	1,290	30	0%			

表-3　標本空港のフラジリティ情報（2/2）

対象構造物，被害要因及び被害レベル				フラジリティ情報					備考		
No.	対象構造物	被害要因	被害レベル	耐力中央値（cm/s^2）	複合偏差	損失額（百万円）	復旧日数	性能（%）（運航機能）	構造物の所有者	財物損失額評価で考慮	事業停止期間評価で考慮
(13)	空港電力施設（電源局舎）	電力関連設備	無被害	－	－	－	0	100%	国	○	○
			損傷	700	0.54	90	3	0%			
		非構造部材（内外装等）	無被害	－	－	－	0	100%			
			損傷	700	0.54	45	15	0%			
		建屋	無被害	－	－	－	0	100%			
			小破	600	0.54	45	7	0%			
			大破	1000	0.54	270	30	0%			
(14)	燃料貯蔵施設	燃料貯蔵関連設備	無被害	－	－	－	0	100%	国	○	○
			損傷	800	0.54	100	20	50%			
(15)	自家発	冷却	無被害	－	－	－	0	100%	運営権者	○	○
			不可	700	0.54	－	3	0%			
		燃料供給	無被害	－	－	－	0	100%			
			不可	800	0.54	－	3	0%			
(16)	点検	点検	未発生	－	－	－	0	100%	運営権者	×	○
			発生	150	0.00	－	1	0%			

4.3　財物損失額の評価（イベントツリーモデル）

表-2，**表-3** に示した被害要因と被害レベルを使い，**図-6**，**図-7** に示したイベントツリーモデルを構築する．イベントツリーの分岐確率は，表中の耐力中央値ならびに複合偏差を(10)式に適用して求める．被害形態（被害要因の組合せ）の損失額については各被害要因の損失額を和して求める．ただし，被害形態によっては損失額が重複する場合がある．この場合には重複する損失額を削除する．イベントツリーの帰結確率と損失額から**図-8** の確率関数（棒グラフ）を求め，これに近似した確率密度関数も併せて求める．求められた確率分布から地震リスクの代表値（損失額の期待値と 90%非超過値）を求める．なお，各被害要因の損傷は独立と仮定する．

4.4　事業停止期間の評価（システムモデル）

標本空港の空港機能に関する直列のシステムモデルを**図-20** に示す．図の□は構造物を機能として捉えた構成要素である．構成要素はそれぞれが空港機能を担うものの，どれか一つでも損傷すると空港機能は失われるモデルとなっている．

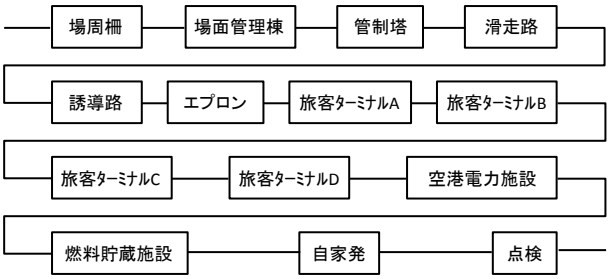


図-20　空港機能に関するシステムモデル

各構成要素のフラジリティ情報と復旧日数を**表-2**，**表-3** から取り出し，(14)式に適用しシステムの復旧時間 t の非超過確率関数 $F_T(t|r)$を求める．その上で，(12),(13)式を使い，事業停止期間（期待値）を求める．

4.5　標本となる財務諸表の設定

標本となる財務諸表として，本研究では損益計算書と貸借対照表の 2 表を設定する．このとき，公共施設等の運営権は 1,100 億円と設定した．

さらに，外生的要因により空港需要は変動することがあり，さらには突発的な経済環境の悪化も考えられるため，財務諸表は標準ケース，悲観ケース及び楽観ケースの 3 ケースを設定することとした．

設定した財務諸表を**表-4**～**表-6** に示す．**表-4** は標準ケース，**表-5** は悲観ケース，**表-6** は楽観ケースであるが，悲観ケースについては，リーマンショックのような突然の経済変化が発生し，これに伴い空港需要も低下する可能性があることから，標準ケースの損益計算書の売上高と売上原価の費用（その他）を 6%下方修正することとした．一方，楽観ケースについては，空港需要の上昇を想定して，標準ケースに対して売上高と売上原価の費用（その他）を 3%積み増すこととした．

なお，それぞれのケースの貸借対照表は，貸方と借方が同じになるように現金・現預金を調整している．この調整は法人税の増減が現金・現預金の増減に直接影響すると考えたからである．

これら財務諸表の設定は，運営権対価の高騰による長期借入増，土地の借用料の一部負担などにも応用できる．

表-4～**表-6** の各ケースの財務諸表の右下には，自己資本比率，当座比率及び流動比率を示しているが，本研究では，運用資金の状況（資金繰りの状況）を直接に把握できる流動比率を対象に検討を行うこととする．因みに，地震リスクを考慮しない現状では，標準ケースの流動比率は 1.59，悲観ケースの流動比率は 1.47，楽観ケースの流動比率は 1.65 である．各業績指標の算出式は**付録 E** に示す．

表-4　標本空港の財務２表（標準ケース）

損益計算書　（単位：百万円）

科目	金額
売上高	23,000
売上原価	
減価償却費	2,100
その他	3,600
売上総利益	17,300
販売費及び一般管理費	
人件費	4,200
外注費	4,700
その他	3,500
営業利益	4,900
営業外収入	850
営業外支出	
支払利息	2,000
その他	60
経常利益	3,690
特別利益	0
特別損失	0
税引前当期純利益	3,690
法人税等	1,402
当期純利益	2,288

貸借対照表　（単位：百万円）

資産の部		負債の部	
科目	金額	科目	金額
流動資産	9,618	流動負債	6,060
現金・現預金	8,198	買掛金	250
売掛金	500	1年内返済予定の固定負債	3,700
繰越税金資産	120	未払金等	1,300
棚卸資産	600	前受金	600
その他	200	預り金	10
有形固定資産	23,650	その他	200
土地	150	固定負債	83,050
建物	18,000	長期借入金	81,000
設備機器	5,000	その他	2,050
その他	500	純資産の部	
無形固定資産・投資等	110,535	純資産	54,693
施設利用権	10	資本金	37,000
電話加入権	5	資本余剰金	400
公共施設等運営権	110,000	利益余剰金	17,288
投資・その他	520	当期純利益	2,288
		繰越利益余剰金	15,000
		評価・換算差額等	5
資産合計	143,803	負債・純資産総額	143,803

自己資本比率＝　0.38
当座比率＝　1.44
流動比率＝　1.59

表-5　標本空港の財務２表（悲観ケース）

損益計算書　（単位：百万円）

科目	金額
売上高	21,620
売上原価	
減価償却費	2,100
その他	3,384
売上総利益	16,136
販売費及び一般管理費	
人件費	4,200
外注費	4,700
その他	3,500
営業利益	3,736
営業外収入	850
営業外支出	
支払利息	2,000
その他	60
経常利益	2,526
特別利益	0
特別損失	0
税引前当期純利益	2,526
法人税等	960
当期純利益	1,566

貸借対照表　（単位：百万円）

資産の部		負債の部	
科目	金額	科目	金額
流動資産	8,896	流動負債	6,060
現金・現預金	7,476	買掛金	250
売掛金	500	1年内返済予定の固定負債	3,700
繰越税金資産	120	未払金等	1,300
棚卸資産	600	前受金	600
その他	200	預り金	10
有形固定資産	23,650	その他	200
土地	150	固定負債	83,050
建物	18,000	長期借入金	81,000
設備機器	5,000	その他	2,050
その他	500	純資産の部	
無形固定資産・投資等	110,535	純資産	53,971
施設利用権	10	資本金	37,000
電話加入権	5	資本余剰金	400
公共施設等運営権	110,000	利益余剰金	16,566
投資・その他	520	当期純利益	1,566
		繰越利益余剰金	15,000
		評価・換算差額等	5
資産合計	143,081	負債・純資産総額	143,081

自己資本比率＝　0.38
当座比率＝　1.32
流動比率＝　1.47

表-6　標本空港の財務２表（楽観ケース）

損益計算書　（単位：百万円）

科目	金額
売上高	23,690
売上原価	
減価償却費	2,100
その他	3,708
売上総利益	17,882
販売費及び一般管理費	
人件費	4,200
外注費	4,700
その他	3,500
営業利益	5,482
営業外収入	850
営業外支出	
支払利息	2,000
その他	60
経常利益	4,272
特別利益	0
特別損失	0
税引前当期純利益	4,272
法人税等	1,623
当期純利益	2,649

貸借対照表　（単位：百万円）

資産の部		負債の部	
科目	金額	科目	金額
流動資産	9,979	流動負債	6,060
現金・現預金	8,559	買掛金	250
売掛金	500	1年内返済予定の固定負債	3,700
繰越税金資産	120	未払金等	1,300
棚卸資産	600	前受金	600
その他	200	預り金	10
有形固定資産	23,650	その他	200
土地	150	固定負債	83,050
建物	18,000	長期借入金	81,000
設備機器	5,000	その他	2,050
その他	500	純資産の部	
無形固定資産・投資等	110,535	純資産	55,054
施設利用権	10	資本金	37,000
電話加入権	5	資本余剰金	400
公共施設等運営権	110,000	利益余剰金	17,649
投資・その他	520	当期純利益	2,649
		繰越利益余剰金	15,000
		評価・換算差額等	5
資産合計	144,164	負債・純資産総額	144,164

自己資本比率＝　0.38
当座比率＝　1.49
流動比率＝　1.65

4.6　その他の条件設定

ケーススタディのその他の条件として，再調達価格については，運営権者の所有物が 78,000 百万円，国の所有物が 26,600 百万円とし，簿価はそれぞれの再調達価格の 30%になるものとした．また，再調達価格は建物 80%，設備機器 20%で分けるものとした．

逸失利益を評価する際に必要となる，日当り営業損失は，売上高からその他を差引いた額を 365 日で除して求めた．例えば標準ケースの場合，53 百万円（＝(23,000 百万円-3,600 百万円)÷365 日）となる．

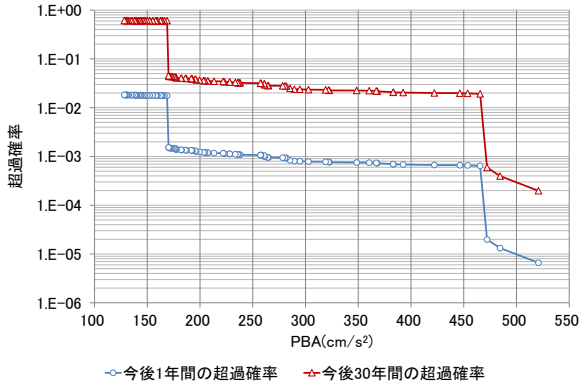
4.7　評価結果

(1) 地震ハザード解析

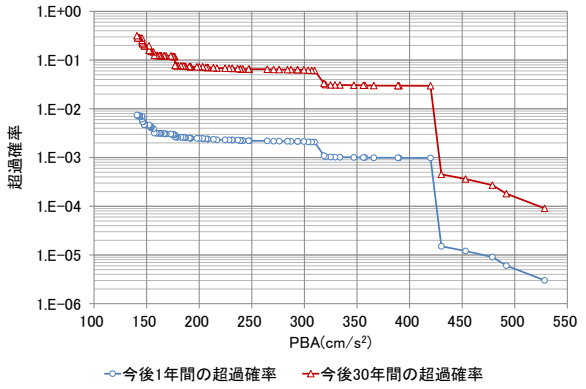
マルチイベントモデル（上位 100 イベントを抽出）によるイベントハザード解析の結果を**図-21**，**表-7** に示す．**表-7** の緯度経度で示した震源は，背景地震である．**図-21** には，今後 1 年間を想定した場合と，今後 30 年間を想定した場合のイベントハザード曲線を，**表-7** には震源情報（名称，マグニチュード，観測点での地震動）と今後 1 年間と 30 年間の発生確率をそれぞれ示している．

図-21 よりＦ県とＯ県を比較すると，420cm/s^2 程度以下では，相対的にＯ県の方が超過確率が高く（地震が生

起し易く)，地震危険度が高いことが分かる．ただし，背景地震による影響と考えられるが，500cm/s^2 前後ではほぼ同程度の地震危険度である．



(a)F 県



(b)O 県

図-21　イベントハザード曲線

表-7　イベントリスト（PBA の大きい上位 30）

(a)F 県

No.	震源名	M	PBA (cm/s^2)	発生確率 ／1年	超過確率 ／1年	発生確率 ／30年	超過確率 ／30年
1	(130.45 , 33.55)	M7.0	521	0.00001	0.00001	0.00020	0.00020
2	(130.55 , 33.55)	M7.0	484	0.00001	0.00001	0.00020	0.00040
3	(130.45 , 33.65)	M7.0	472	0.00001	0.00002	0.00020	0.00060
4	警固断層帯南東部	M7.2	465	0.00062	0.00064	0.01865	0.01924
5	(130.45 , 33.55)	M6.5	454	0.00001	0.00066	0.00041	0.01964
6	(130.55 , 33.65)	M7.0	446	0.00001	0.00066	0.00020	0.01984
7	(130.35 , 33.55)	M7.0	422	0.00001	0.00067	0.00020	0.02003
8	(130.55 , 33.55)	M6.5	393	0.00001	0.00068	0.00041	0.02044
9	(130.45 , 33.45)	M7.0	383	0.00001	0.00069	0.00020	0.02063
10	(130.35 , 33.65)	M7.0	383	0.00001	0.00070	0.00020	0.02083
11	(130.45 , 33.55)	M6.0	368	0.00003	0.00072	0.00086	0.02167
12	(130.45 , 33.65)	M6.5	367	0.00001	0.00074	0.00041	0.02207
13	(130.55 , 33.45)	M7.0	360	0.00001	0.00075	0.00020	0.02226
14	(130.65 , 33.55)	M7.0	349	0.00001	0.00075	0.00020	0.02246
15	(130.65 , 33.65)	M7.0	323	0.00001	0.00076	0.00020	0.02265
16	(130.55 , 33.65)	M6.5	322	0.00001	0.00077	0.00041	0.02305
17	(130.35 , 33.45)	M7.0	319	0.00001	0.00078	0.00020	0.02325
18	(130.45 , 33.75)	M7.0	303	0.00001	0.00079	0.00020	0.02344
19	(130.35 , 33.55)	M6.5	295	0.00001	0.00080	0.00041	0.02385
20	(130.55 , 33.75)	M7.0	289	0.00001	0.00081	0.00020	0.02404
21	(130.55 , 33.55)	M6.0	285	0.00003	0.00083	0.00086	0.02488
22	西山断層帯	M7.3	282	0.00010	0.00093	0.00286	0.02766
23	(130.25 , 33.55)	M7.0	281	0.00001	0.00094	0.00020	0.02786
24	(130.65 , 33.45)	M7.0	278	0.00001	0.00094	0.00020	0.02805
25	(130.25 , 33.65)	M7.0	265	0.00001	0.00095	0.00020	0.02824
26	(130.35 , 33.75)	M7.0	264	0.00001	0.00096	0.00020	0.02844
27	(130.45 , 33.65)	M6.0	261	0.00003	0.00098	0.00086	0.02927
28	(130.45 , 33.55)	M5.5	261	0.00006	0.00104	0.00178	0.03100
29	(130.45 , 33.45)	M6.5	258	0.00001	0.00106	0.00041	0.03140
30	(130.35 , 33.65)	M6.5	258	0.00001	0.00107	0.00041	0.03180

(b)O 県

No.	震源名	M	PBA (cm/s^2)	発生確率 ／1年	超過確率 ／1年	発生確率 ／30年	超過確率 ／30年
1	(135.25 , 34.45)	M7.0	528	0.00000	0.00000	0.00009	0.00009
2	(135.15 , 34.45)	M7.0	492	0.00000	0.00001	0.00009	0.00018
3	(135.25 , 34.35)	M7.0	479	0.00000	0.00001	0.00009	0.00027
4	(135.15 , 34.35)	M7.0	453	0.00000	0.00001	0.00009	0.00036
5	(135.35 , 34.45)	M7.0	430	0.00000	0.00002	0.00009	0.00045
6	中央構造線(和泉山脈)	M7.7	420	0.00097	0.00098	0.02927	0.02971
7	(135.35 , 34.35)	M7.0	390	0.00000	0.00098	0.00009	0.02980
8	(135.25 , 34.55)	M7.0	389	0.00000	0.00099	0.00009	0.02989
9	(135.15 , 34.55)	M7.0	366	0.00000	0.00099	0.00009	0.02998
10	(135.25 , 34.45)	M6.5	357	0.00001	0.00100	0.00038	0.03034
11	(135.05 , 34.45)	M7.0	356	0.00000	0.00101	0.00009	0.03043
12	大阪湾断層帯	M7.5	347	0.00000	0.00101	0.00004	0.03047
13	(135.15 , 34.45)	M6.5	334	0.00001	0.00102	0.00038	0.03083
14	(135.05 , 34.35)	M7.0	329	0.00000	0.00102	0.00009	0.03092
15	(135.35 , 34.55)	M7.0	325	0.00000	0.00103	0.00009	0.03101
16	(135.25 , 34.35)	M6.5	320	0.00001	0.00104	0.00038	0.03137
17	中央構造線(紀淡ー鳴門)	M7.7	319	0.00006	0.00110	0.00178	0.03310
18	上町断層帯	M7.5	310	0.00099	0.00208	0.02918	0.06131
19	(135.25 , 34.25)	M7.0	307	0.00000	0.00208	0.00009	0.06140
20	和泉北麓断層帯	M6.8	304	0.00002	0.00210	0.00045	0.06182
21	六甲・淡路断層帯(六甲南縁)	M7.9	299	0.00004	0.00214	0.00138	0.06312
22	(135.15 , 34.25)	M7.0	294	0.00000	0.00214	0.00009	0.06321
23	(135.15 , 34.35)	M6.5	293	0.00001	0.00215	0.00038	0.06356
24	(135.45 , 34.45)	M7.0	287	0.00000	0.00216	0.00009	0.06364
25	(135.05 , 34.55)	M7.0	284	0.00000	0.00216	0.00009	0.06373
26	(135.35 , 34.45)	M6.5	276	0.00001	0.00217	0.00038	0.06408
27	(135.45 , 34.35)	M7.0	271	0.00000	0.00217	0.00009	0.06417
28	(135.35 , 34.25)	M7.0	265	0.00002	0.00220	0.00067	0.06480
29	(135.35 , 34.35)	M6.5	248	0.00001	0.00221	0.00038	0.06515
30	(135.25 , 34.55)	M6.5	247	0.00001	0.00222	0.00038	0.06550

(2) 地震損失関数の評価結果

マルチイベントモデルの地震ハザード解析で算出された各地震動に対してイベントツリー解析を実施し，運営権者と国のそれぞれに対して財物損失額を評価した．また，**図-20** のシステムモデルを使い事業中断期間を評価した．これらの結果に基づき，除去損，逸失利益及び再建費について地震損失関数を評価した．F 県の標準ケースについて，シナリオ地震毎の各種損失の例として**表-8** に示す．

表-8　シナリオ地震毎の各種損失の例
（F 県，標準ケース）

No.	震源名	M	PBA (cm/s^2)	再建費 運営権者	再建費 国	除去損 運営権者	逸失利益 運営権者	
1	(130.45 , 33.55)	M7.0	521	8,814	1,266	5,288	1,431	(27日)
2	(130.55 , 33.55)	M7.0	484	7,390	1,066	4,434	1,375	(26日)
3	(130.45 , 33.65)	M7.0	472	6,917	1,000	4,150	1,354	(25日)
4	警固断層帯南東部	M7.2	465	6,669	965	4,001	1,341	(25日)
5	(130.45 , 33.55)	M6.5	454	6,233	904	3,740	1,319	(25日)
6	(130.55 , 33.65)	M7.0	446	5,961	865	3,577	1,303	(25日)
7	(130.35 , 33.55)	M7.0	422	5,106	745	3,064	1,250	(24日)
8	(130.55 , 33.55)	M6.5	393	4,124	606	2,474	1,174	(22日)
9	(130.45 , 33.45)	M7.0	383	3,836	565	2,301	1,148	(22日)
10	(130.35 , 33.65)	M7.0	383	3,826	564	2,296	1,147	(22日)
11	(130.45 , 33.55)	M6.0	368	3,372	499	2,023	1,101	(21日)
12	(130.45 , 33.65)	M6.5	367	3,347	496	2,008	1,098	(21日)
13	(130.55 , 33.45)	M7.0	360	3,153	468	1,892	1,076	(20日)
14	(130.65 , 33.55)	M7.0	349	2,825	421	1,695	1,035	(19日)
15	(130.65 , 33.65)	M7.0	323	2,169	328	1,301	935	(18日)
16	(130.55 , 33.65)	M6.5	322	2,149	325	1,289	932	(18日)
17	(130.35 , 33.45)	M7.0	319	2,083	315	1,250	920	(17日)
18	(130.45 , 33.75)	M7.0	303	1,722	263	1,033	847	(16日)
19	(130.35 , 33.55)	M6.5	295	1,556	239	934	808	(15日)
20	(130.55 , 33.75)	M7.0	289	1,455	225	873	783	(15日)
21	(130.55 , 33.55)	M6.0	285	1,378	214	827	762	(14日)
22	西山断層帯	M7.3	282	1,313	204	788	744	(14日)
23	(130.25 , 33.55)	M7.0	281	1,291	201	774	737	(14日)
24	(130.65 , 33.45)	M7.0	278	1,250	195	750	725	(14日)
25	(130.25 , 33.65)	M7.0	265	1,027	162	616	654	(12日)
26	(130.35 , 33.75)	M7.0	264	1,015	161	609	650	(12日)
27	(130.45 , 33.65)	M6.0	261	972	154	583	634	(12日)
28	(130.45 , 33.55)	M5.5	261	964	153	578	631	(12日)
29	(130.45 , 33.45)	M6.5	258	919	146	551	615	(12日)
30	(130.35 , 33.65)	M6.5	258	915	146	549	613	(12日)

（金額の単位は百万円，逸失利益の括弧は事業中断日数）

期待値と 90%非超過値の地震損失関数を**図-22～図-29** に示すが，図化にあたり，再建費（再調達ベース）については損失額を再調達価格で除し，除去損（簿価ベース）はその値に 0.3 を乗じている．逸失利益については，例えばＦ県では損益計算書の売上高 23,000 百万円から売上原価（その他）3,600 百万円を差し引いた値で除している．

図-22～図-29 より，再建費については，国に比べて運営権者の方が相対的に大きい（よりグラフの上側に位置する）．これは**表-2**，**表-3** で仮定した耐力中央値や損失額の影響と考えられ，一般的傾向とは言えない．逸失利益の特徴として，除去損や再建費と異なり上に凸の関数形状をしている．これは事業中断期間の評価において，構成要素の復旧期間の MAX 演算を行っていることが理由である．ただし，損傷相関を考慮する場合はこの限りではない（能島(2009)）．

一方，Ｆ県とＯ県の比較については，各図を比べても顕著な差異はみられない．これは各シナリオ地震の発生確率を考慮していないからである．後述するイベントリスクカーブにおいて地域差は顕著となる．

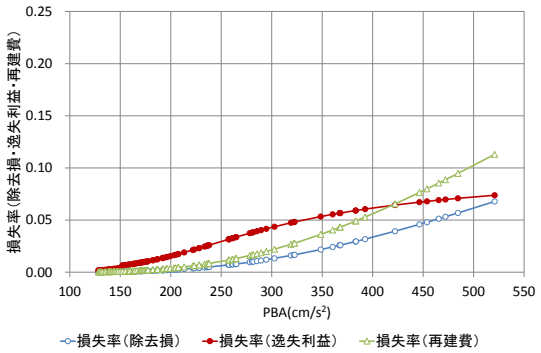


図-22　運営権者の期待値の地震損失関数（Ｆ県）

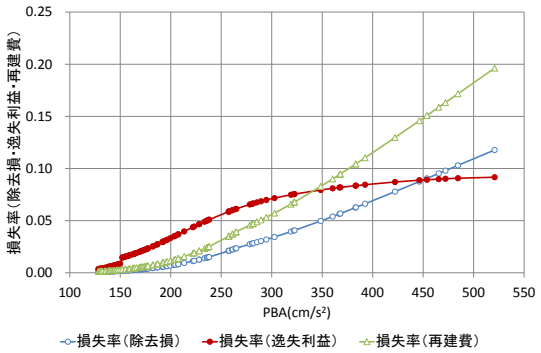


図-23　運営権者の 90%非超過値の地震損失関数（Ｆ県）

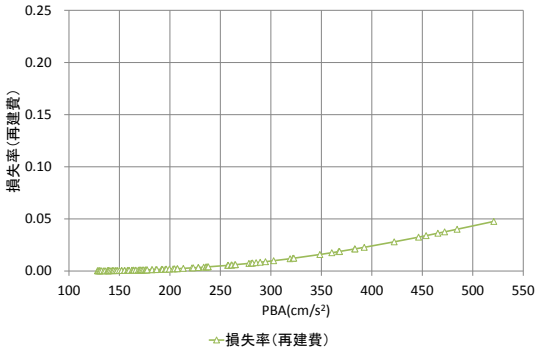


図-24　国の期待値の地震損失関数（Ｆ県）

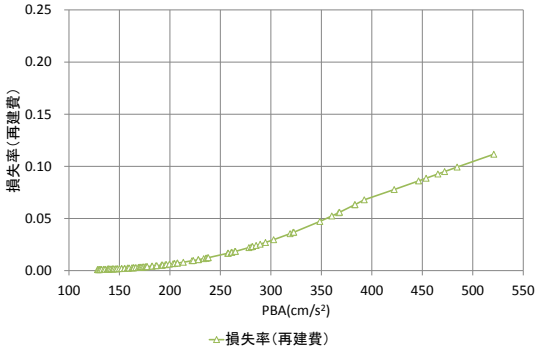


図-25　国の 90%非超過値の地震損失関数（Ｆ県）

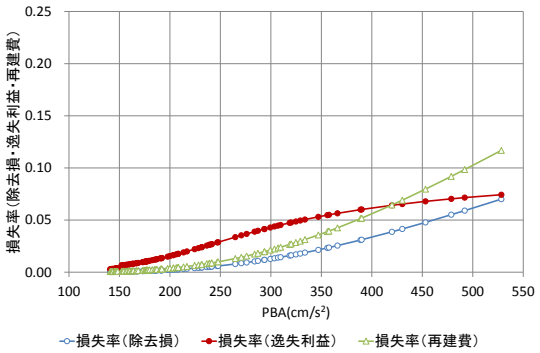


図-26　運営権者の期待値の地震損失関数（Ｏ県）

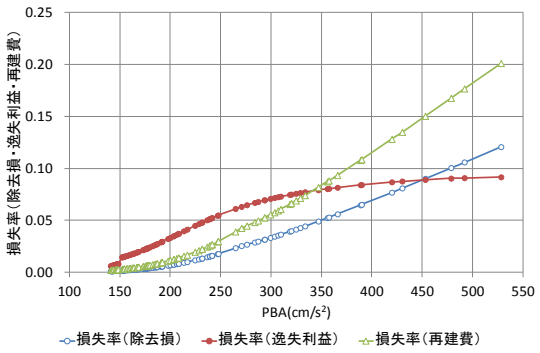


図-27　運営権者の 90%非超過値の地震損失関数（Ｏ県）

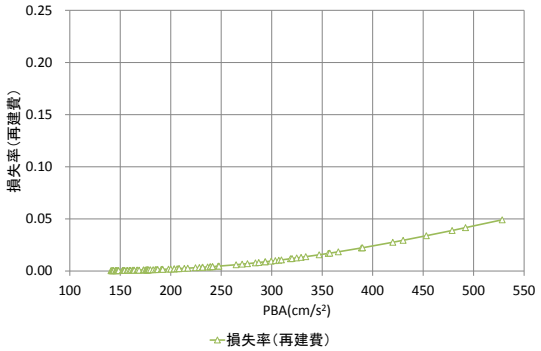


図-28　国の期待値の地震損失関数（O県）

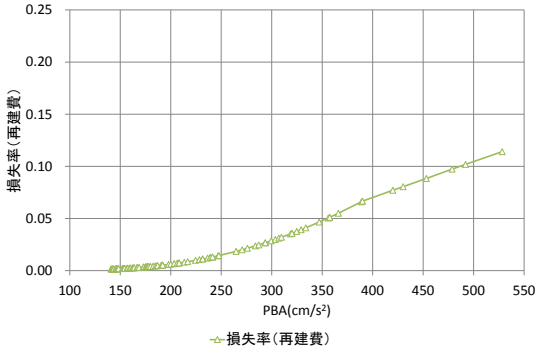


図-29　国の 90%非超過値の地震損失関数（O県）

(3)イベントリスクカーブとリスクカーブの評価

マルチイベントモデルとイベントツリー解析に基づき，損失率（再建費）に関するイベントリスクカーブを算出し，(15)式を使いリスクカーブを評価した．結果を**図-30**～**図-37** に示す．各図より，運営権者に対して国の各種カーブは図の左下側に位置しているため，運営権者に比べて国の地震リスクは相対的に低いことが分かる．また，標本空港がＦ県に所在するよりも，Ｏ県に所在する方が，地震リスクが大きくなる．地震の発生確率が相対的に高いことが理由である．

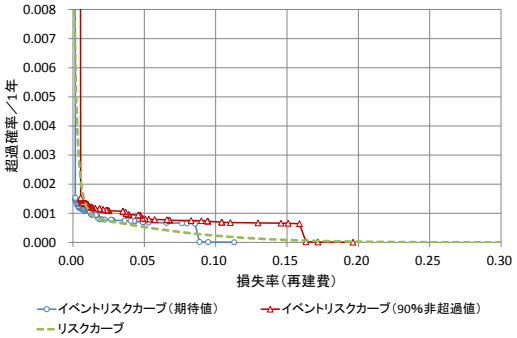


図-30　運営権者のイベントリスクカーブとリスクカーブ（Ｆ県，今後１年）

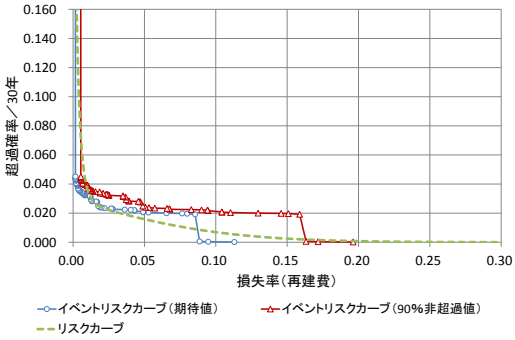


図-31　運営権者のイベントリスクカーブとリスクカーブ（Ｆ県，今後 30 年）

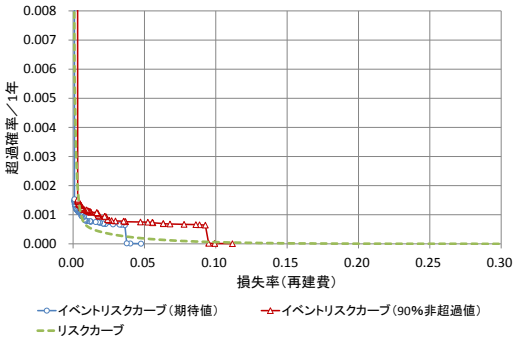


図-32　国のイベントリスクカーブとリスクカーブ（Ｆ県，今後１年）

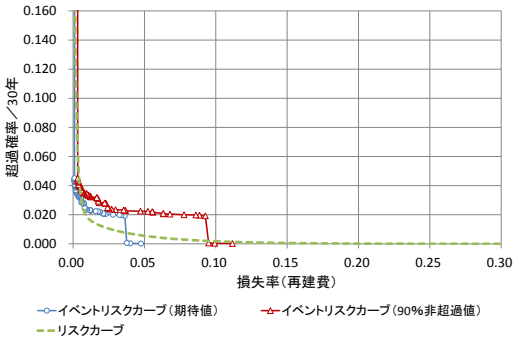


図-33　国のイベントリスクカーブとリスクカーブ（Ｆ県，今後 30 年）

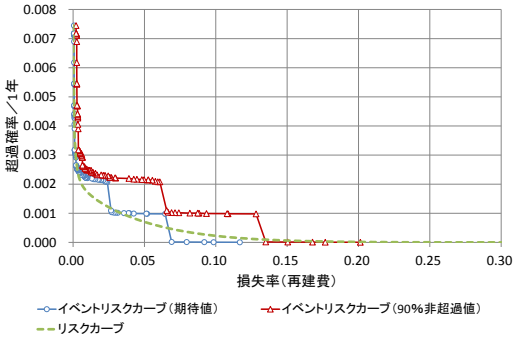


図-34　運営権者のイベントリスクカーブとリスクカーブ（Ｏ県，今後１年）

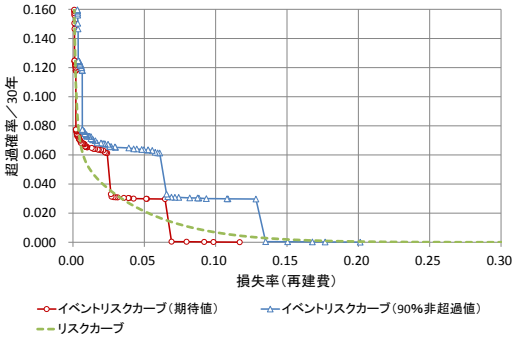


図-35　運営権者のイベントリスクカーブとリスクカーブ（O県，今後 30 年）

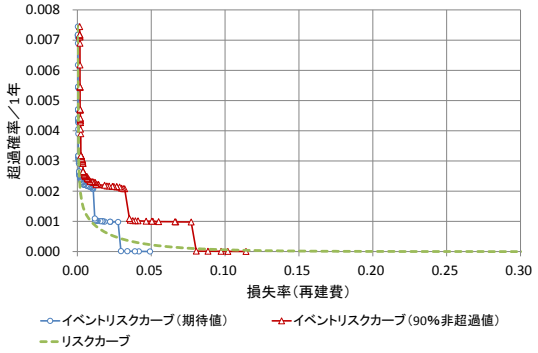


図-36　国のイベントリスクカーブとリスクカーブ（O県，今後 1 年）

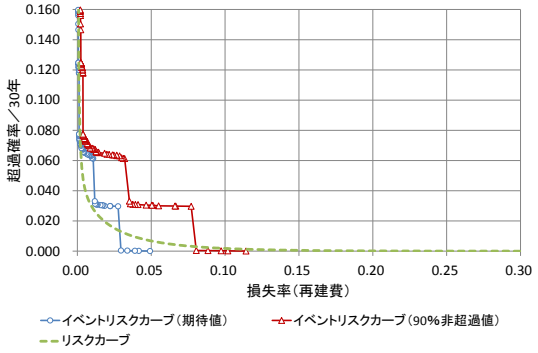


図-37　国のイベントリスクカーブとリスクカーブ（O県，今後 30 年）

(4) 地震リスクを考慮した財務影響分析

標準ケースの損益計算書と貸借対照表を取り上げ，F 県を標本空港の所在地とした場合に，警固断層帯南東部の地震が発生した場合の財務影響分析の結果を**表-9**～**表-11** に示す．**表-9** は除去損，**表-10** は除去損に逸失利益を考慮したもので，**表-11** はさらに再建費を考慮したものである．各表のハッチングしてある欄は一つ前の財務諸表と比較して変化した欄を表している．また，表の右下に自己資本比率，当座比率，流動比率を示す．

表-9　警固断層帯南東部による標準ケースの分析結果（除去損を考慮）

損益計算書　（単位：百万円）

科目	金額
売上高	23,000
売上原価	
減価償却費	2,100
その他	3,600
売上総利益	17,300
販売費及び一般管理費	
人件費	4,200
外注費	4,700
その他	3,500
営業利益	4,900
営業外収入	850
営業外支出	
支払利息	2,000
その他	60
経常利益	3,690
特別利益	0
特別損失	2,001
税引前当期純利益	1,689
法人税等	0
当期純利益	1,689

貸借対照表　（単位：百万円）

資産の部		負債の部	
科目	金額	科目	金額
流動資産	11,020	流動負債	6,060
現金・現預金	9,600	買掛金	250
売掛金	500	1年内返済予定の固定負債	3,700
繰越税金資産	120	未払金等	1,300
棚卸資産	600	前受金	600
その他	200	預り金	10
有形固定資産	21,649	その他	200
土地	150	固定負債	83,050
建物	16,400	長期借入金	81,000
設備機器	4,600	その他	2,050
その他	500	純資産の部	
無形固定資産・投資等	110,535	純資産	54,094
施設利用権	10	資本金	37,000
電話加入権	5	資本余剰金	400
公共施設等運営権	110,000	利益余剰金	16,689
投資・その他	520	当期純利益	1,689
		繰越利益余剰金	15,000
		評価・換算差額等	5
資産合計	143,204	負債・純資産総額	143,204

自己資本比率＝　0.38
当座比率＝　1.67
流動比率＝　1.82

表-10　警固断層帯南東部による標準ケースの分析結果（逸失利益を考慮）

損益計算書　（単位：百万円）

科目	金額
売上高	21,410
売上原価	
減価償却費	2,100
その他	3,351
売上総利益	15,959
販売費及び一般管理費	
人件費	4,200
外注費	4,700
その他	3,500
営業利益	3,559
営業外収入	850
営業外支出	
支払利息	2,000
その他	60
経常利益	2,349
特別利益	0
特別損失	2,001
税引前当期純利益	348
法人税等	0
当期純利益	348

貸借対照表　（単位：百万円）

資産の部		負債の部	
科目	金額	科目	金額
流動資産	9,679	流動負債	6,060
現金・現預金	8,259	買掛金	250
売掛金	500	1年内返済予定の固定負債	3,700
繰越税金資産	120	未払金等	1,300
棚卸資産	600	前受金	600
その他	200	預り金	10
有形固定資産	21,649	その他	200
土地	150	固定負債	83,050
建物	16,400	長期借入金	81,000
設備機器	4,600	その他	2,050
その他	500	純資産の部	
無形固定資産・投資等	110,535	純資産	52,753
施設利用権	10	資本金	37,000
電話加入権	5	資本余剰金	400
公共施設等運営権	110,000	利益余剰金	15,348
投資・その他	520	当期純利益	348
		繰越利益余剰金	15,000
		評価・換算差額等	5
資産合計	141,863	負債・純資産総額	141,863

自己資本比率＝　0.37
当座比率＝　1.45
流動比率＝　1.60

表-11　警固断層帯南東部による標準ケースの分析結果（再建費を考慮）

損益計算書　（単位：百万円）

科目	金額
売上高	21,410
売上原価	
減価償却費	2,100
その他	3,351
売上総利益	15,959
販売費及び一般管理費	
人件費	4,200
外注費	4,700
その他	3,500
営業利益	3,559
営業外収入	850
営業外支出	
支払利息	2,000
その他	60
経常利益	2,349
特別利益	0
特別損失	2,001
税引前当期純利益	348
法人税等	0
当期純利益	348

貸借対照表　（単位：百万円）

資産の部		負債の部	
科目	金額	科目	金額
流動資産	3,010	流動負債	6,060
現金・現預金	1,590	買掛金	250
売掛金	500	1年内返済予定の固定負債	3,700
繰越税金資産	120	未払金等	1,300
棚卸資産	600	前受金	600
その他	200	預り金	10
有形固定資産	28,318	その他	200
土地	150	固定負債	83,050
建物	21,734	長期借入金	81,000
設備機器	5,934	その他	2,050
その他	500	純資産の部	
無形固定資産・投資等	110,535	純資産	52,753
施設利用権	10	資本金	37,000
電話加入権	5	資本余剰金	400
公共施設等運営権	110,000	利益余剰金	15,348
投資・その他	520	当期純利益	348
		繰越利益余剰金	15,000
		評価・換算差額等	5
資産合計	141,863	負債・純資産総額	141,863

自己資本比率＝　0.37
当座比率＝　0.34
流動比率＝　0.50

(5) 財務ストレス関数の結果

シナリオ地震による地震動強さ（PBA）を算出し，その PBA に応じた地震リスク（除去損，逸失利益，再建費）が，財務にどの程度の負荷を与えるのかを，PBA を横軸とした業績指標の変化を財務ストレス関数で見る．ここでは特に流動比率を取上げ，これを**図-38**～**図-43** に示す．なお，各図には期待値として地震リスクを考慮した場合と，90%非超過値で地震リスクを考慮した場合の 2 つの関数を示している．各点がシナリオ地震を表していることから，シナリオ地震ならびに地震動の双方から，財務負荷の程度を把握でき，便利である．

図-38～**図-43** より，地震リスクを考慮しない場合の流動比率に対して，地震リスクを考慮した流動比率は PBA が高くなるに従い低くなる．一方で，地震動が小さい範囲では地震リスク未考慮に比べ，地震リスク考慮が上回っている．これは発災により法人税免除を考慮したからである．また 90%非超過値の地震リスクを考慮すると，400cm/s^2 前後の地震では，流動比率は 0.0 に至る，0.0 以下の流動比率は便宜上 0.0 としている．

業種や企業毎に収益構造は異なるため，流動比率の許容限界も様々であるが，松井らの研究(2007)を参照すると，流動比率が 1.0 を下回ると倒産に至る懸念が大きいといわれている（図中点線）．その視点に基づけば，どのシナリオ地震においても 1.0 を下回っており，これより大きい地震動を誘発するシナリオ地震と遭遇した場合は，債務の不履行，支払の滞りなどの状況が懸念される．

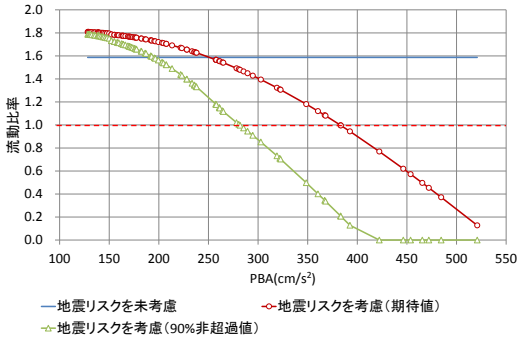


図-38　流動比率の財務ストレス関数（F 県，標準ケース）

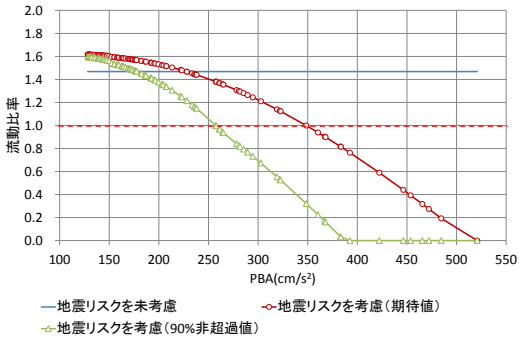


図-39　流動比率の財務ストレス関数（F 県，悲観ケース）

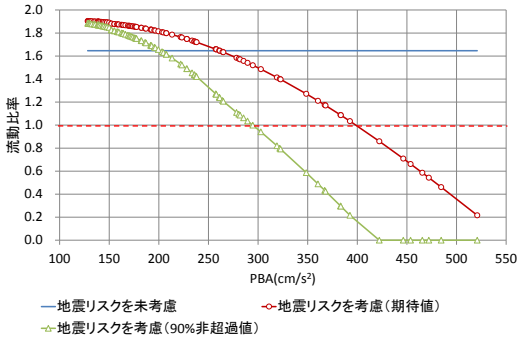


図-40　流動比率の財務ストレス関数（F 県，楽観ケース）

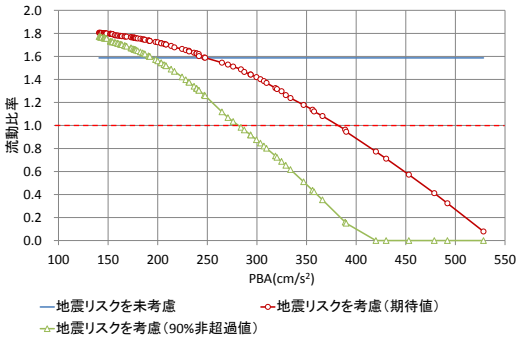


図-41　流動比率の財務ストレス関数
（O県，標準ケース）

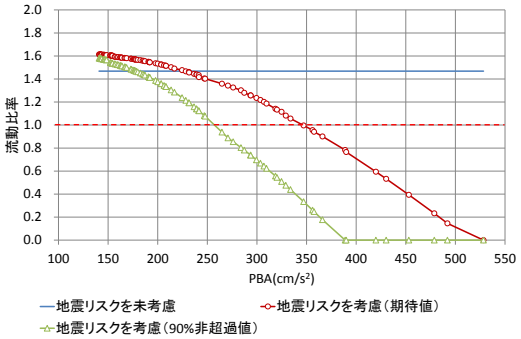


図-42　流動比率の財務ストレス関数
（O県，悲観ケース）

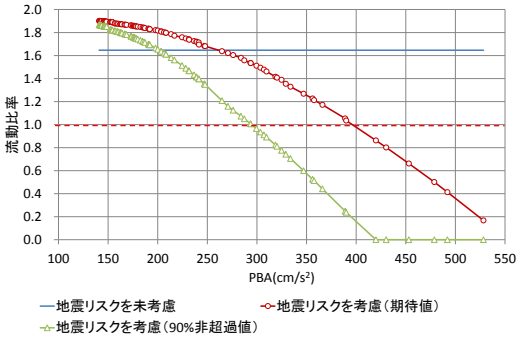


図-43　流動比率の財務ストレス関数
（O県，楽観ケース）

(6) 保険の設計

a) 運営権者の所有物に関する保険の設定

前述の 3.9 (3) a)に記した方法で運営権者の所有物に関する保険の設計を行う．支払限度を設定するため，財務などに関する指標のイベントリスクリストを**表-12～表-17** に示す．各表の損失率などは，期待値ではなく，90%非超過値である．これらイベントリスクの現金・現預金は，設定した財務諸表に比較的潤沢な流動資産が計上されていることを考慮し算出したものである．

まず，①倒産等経営上困難な状況に陥る可能性のある流動比率を 0.9 と仮定し，**表-12～表-17** に示したリストから，0.9 前後の現金・現預金を読む．次に，②保険を考えるうえで有意な発生確率及び関係者間の認知度を踏まえ，表中のハッチングをした地震を最悪地震と考え，最悪地震による現金・現預金を読む（上位の地震は背景地震であり保険の検討にあたり考慮されることは極稀である.）．①と②の差が，最悪地震が発生した場合の必要資金となる．この最悪地震の必要資金を再調達価格（運営権者の所有施設）で除して損失率に換算したものを a とする．最悪地震の損失率を b，免責を d とする．

例えば，F 県の標準ケースでは a≒0.11，b=0.16 であり，(17)式より，必要資金を保険金の流用で賄うことができ，この時の免責 d は 0.05 となる（**付録 F**）．

O 県を含めた他のケースも同様に設定する．各ケースについて，保険の付保範囲（支払限度・免責）と保険純率を**表-18** にまとめて示す．表より，F 県と O 県を比較すると，O 県の方が支払限度が低い．これは**表-12～表-17** から知るように，最悪地震を F 県は警固断層（465.5cm/s^2）としているのに対し，O 県は中央構造線（419.9cm/s^2）とし，O 県の方が低い地震動のものを最悪地震としているからである．免責については，保険純率を最小とするため，b から a を差引いた値としている．また，標準ケースに比べて，悲観ケースは付保範囲が広く，楽観ケースは逆に狭くなっている．これに伴い保険純率も変化している．一例として，標本空港が F 県に位置する標準ケースについて，保険加入後のリスクカーブを**図-44** に示す．

ここで，保険料は保険純率に施設の再調達価格を乗じ，これに付加保険料や保険会社の収益源のリスクロードを加えることになるが，明確な根拠の基で特定することは難しい（特に保険会社の収益について）ことから，本研究では，保険料は売上高よりも十分小さく，その財務への影響は考慮しないものとした．

b) 国の所有物に関する保険の設定

前述の 3.9 (3) b)に記載した方法で，今後 30 年間のリスクカーブ（**図-33** 及び**図-38**）を用いて国の所有物に関する保険の付保範囲を設定した．実施契約案において，支払限度 10 億円が示されたが，財政の視点から，国の損失額の負担はできるだけ少ない方が望ましい．そこで国が損失額を負担しなければならない可能性（確率）を向う 30 年で 1.0%とし，リスクカーブにおいて，この確率に対応する損失率を支払限度とした．損失率は，F 県は 0.03（798 百万円），O 県は 0.04（1,064 百万円）である．これ以上の損失が発生した場合に，国はこれを超えた損失額を負担することになる．一例として，標本空港

がＦ県に位置する場合の標準ケースの保険加入後のリスクカーブを**図-45** に示す.

表-12　財務などに関する指標の上位 30 のイベントリスクリスト（Ｆ県，標準ケース）

No.	震源名	M	PBA (cm/s²)	発生確率／1年	超過確率／1年	90%非超過値 損失率（再建費）	90%非超過値 現金・現預金（百万円）	90%非超過値 流動比率
1	(130.45 , 33.55)	M7.0	521	0.00001	0.00001	0.20	−7,485	—
2	(130.55 , 33.55)	M7.0	484	0.00001	0.00001	0.17	−5,548	—
3	(130.45 , 33.65)	M7.0	472	0.00001	0.00002	0.16	−4,882	—
4	菅岡断層帯南東部	M7.2	465	0.00062	0.00064	0.16	(2) −4,527	—
5	(130.45 , 33.55)	M6.5	454	0.00001	0.00066	0.15	−3,896	—
6	(130.55 , 33.65)	M7.0	446	0.00001	0.00066	0.15	−3,496	—
7	(130.35 , 33.55)	M7.0	422	0.00001	0.00067	0.13	−2,204	—
8	(130.55 , 33.55)	M6.5	393	0.00001	0.00068	0.11	−642	0.13
9	(130.45 , 33.45)	M7.0	383	0.00001	0.00069	0.10	−165	0.21
10	(130.35 , 33.65)	M7.0	383	0.00001	0.00070	0.10	−148	0.21
11	(130.45 , 33.55)	M6.0	368	0.00003	0.00072	0.09	625	0.34
12	(130.45 , 33.65)	M6.5	367	0.00001	0.00074	0.09	669	0.34
13	(130.55 , 33.45)	M7.0	360	0.00001	0.00075	0.09	1,011	0.40
14	(130.65 , 33.55)	M7.0	349	0.00001	0.00075	0.08	1,601	0.50
15	(130.65 , 33.65)	M7.0	323	0.00001	0.00076	0.07	2,843	0.70
16	(130.55 , 33.65)	M6.5	322	0.00001	0.00077	0.07	2,883	0.71
17	(130.35 , 33.45)	M7.0	319	0.00001	0.00078	0.07	3,014	0.73
18	(130.45 , 33.75)	M7.0	303	0.00001	0.00079	0.06	3,746	0.85
19	(130.45 , 33.55)	M6.5	295	0.00001	0.00080	0.05	(1) 4,096	0.91
20	(130.55 , 33.75)	M7.0	289	0.00001	0.00081	0.05	4,314	0.95
21	(130.55 , 33.55)	M6.0	285	0.00003	0.00083	0.05	4,481	0.97
22	西山断層帯	M7.3	282	0.00010	0.00093	0.05	4,623	1.00
23	(130.25 , 33.55)	M7.0	281	0.00001	0.00094	0.05	4,673	1.01
24	(130.65 , 33.45)	M7.0	278	0.00001	0.00094	0.05	4,763	1.02
25	(130.25 , 33.65)	M7.0	265	0.00001	0.00095	0.04	5,346	1.12
26	(130.35 , 33.75)	M7.0	264	0.00001	0.00096	0.04	5,386	1.12
27	(130.45 , 33.65)	M6.0	261	0.00003	0.00098	0.04	5,531	1.15
28	(130.45 , 33.55)	M5.5	261	0.00006	0.00104	0.04	5,560	1.15
29	(130.45 , 33.45)	M6.5	258	0.00001	0.00106	0.04	5,713	1.18
30	(130.35 , 33.65)	M6.5	258	0.00001	0.00107	0.04	5,728	1.18

表-13　財務などに関する指標の上位 30 のイベントリスクリスト（Ｆ県，悲観ケース）

No.	震源名	M	PBA (cm/s²)	発生確率／1年	超過確率／1年	90%非超過値 損失率（再建費）	90%非超過値 現金・現預金（百万円）	90%非超過値 流動比率
1	(130.45 , 33.55)	M7.0	521	0.00001	0.00001	0.20	−8,542	—
2	(130.55 , 33.55)	M7.0	484	0.00001	0.00001	0.17	−6,607	—
3	(130.45 , 33.65)	M7.0	472	0.00001	0.00002	0.16	−5,941	—
4	菅岡断層帯南東部	M7.2	465	0.00062	0.00064	0.16	(2) −5,587	—
5	(130.45 , 33.55)	M6.5	454	0.00001	0.00066	0.15	−4,956	—
6	(130.55 , 33.65)	M7.0	446	0.00001	0.00066	0.15	−4,557	—
7	(130.35 , 33.55)	M7.0	422	0.00001	0.00067	0.13	−3,267	—
8	(130.55 , 33.55)	M6.5	393	0.00001	0.00068	0.11	−1,707	—
9	(130.45 , 33.45)	M7.0	383	0.00001	0.00069	0.10	−1,231	0.03
10	(130.35 , 33.65)	M7.0	383	0.00001	0.00070	0.10	−1,215	0.03
11	(130.45 , 33.55)	M6.0	368	0.00003	0.00072	0.09	−443	0.16
12	(130.45 , 33.65)	M6.5	367	0.00001	0.00074	0.09	−400	0.17
13	(130.55 , 33.45)	M7.0	360	0.00001	0.00075	0.09	−59	0.22
14	(130.65 , 33.55)	M7.0	349	0.00001	0.00075	0.08	529	0.32
15	(130.65 , 33.65)	M7.0	323	0.00001	0.00076	0.07	1,767	0.53
16	(130.55 , 33.65)	M6.5	322	0.00001	0.00077	0.07	1,806	0.53
17	(130.35 , 33.45)	M7.0	319	0.00001	0.00078	0.07	1,937	0.55
18	(130.45 , 33.75)	M7.0	303	0.00001	0.00079	0.06	2,665	0.67
19	(130.35 , 33.55)	M6.5	295	0.00001	0.00080	0.05	3,013	0.73
20	(130.55 , 33.75)	M7.0	289	0.00001	0.00081	0.05	3,229	0.77
21	(130.55 , 33.55)	M6.0	285	0.00003	0.00083	0.05	3,396	0.79
22	西山断層帯	M7.3	282	0.00010	0.00093	0.05	3,536	0.82
23	(130.25 , 33.55)	M7.0	281	0.00001	0.00094	0.05	3,586	0.83
24	(130.65 , 33.45)	M7.0	278	0.00001	0.00094	0.05	3,676	0.84
25	(130.25 , 33.65)	M7.0	265	0.00001	0.00095	0.04	(1) 4,253	0.94
26	(130.35 , 33.75)	M7.0	264	0.00001	0.00096	0.04	4,293	0.94
27	(130.45 , 33.65)	M6.0	261	0.00003	0.00098	0.04	4,437	0.97
28	(130.45 , 33.55)	M5.5	261	0.00006	0.00104	0.04	4,466	0.97
29	(130.45 , 33.45)	M6.5	258	0.00001	0.00106	0.04	4,618	1.00
30	(130.35 , 33.65)	M6.5	258	0.00001	0.00107	0.04	4,632	1.00

表-14　財務などに関する指標の上位 30 のイベントリスクリスト（Ｆ県，楽観ケース）

No.	震源名	M	PBA (cm/s²)	発生確率／1年	超過確率／1年	90%非超過値 損失率（再建費）	90%非超過値 現金・現預金（百万円）	90%非超過値 流動比率
1	(130.45 , 33.55)	M7.0	521	0.00001	0.00001	0.20	−6,956	—
2	(130.55 , 33.55)	M7.0	484	0.00001	0.00001	0.17	−5,019	—
3	(130.45 , 33.65)	M7.0	472	0.00001	0.00002	0.16	−4,352	—
4	菅岡断層帯南東部	M7.2	465	0.00062	0.00064	0.16	(2) −3,998	—
5	(130.45 , 33.55)	M6.5	454	0.00001	0.00066	0.15	−3,366	—
6	(130.55 , 33.65)	M7.0	446	0.00001	0.00066	0.15	−2,966	—
7	(130.35 , 33.55)	M7.0	422	0.00001	0.00067	0.13	−1,673	—
8	(130.55 , 33.55)	M6.5	393	0.00001	0.00068	0.11	−109	0.22
9	(130.45 , 33.45)	M7.0	383	0.00001	0.00069	0.10	369	0.30
10	(130.35 , 33.65)	M7.0	383	0.00001	0.00070	0.10	385	0.30
11	(130.45 , 33.55)	M6.0	368	0.00003	0.00072	0.09	1,160	0.43
12	(130.45 , 33.65)	M6.5	367	0.00001	0.00074	0.09	1,204	0.43
13	(130.55 , 33.45)	M7.0	360	0.00001	0.00075	0.09	1,546	0.49
14	(130.65 , 33.55)	M7.0	349	0.00001	0.00075	0.08	2,137	0.59
15	(130.65 , 33.65)	M7.0	323	0.00001	0.00076	0.07	3,381	0.79
16	(130.55 , 33.65)	M6.5	322	0.00001	0.00077	0.07	3,421	0.80
17	(130.35 , 33.45)	M7.0	319	0.00001	0.00078	0.07	3,553	0.82
18	(130.45 , 33.75)	M7.0	303	0.00001	0.00079	0.06	(1) 4,286	0.94
19	(130.35 , 33.55)	M6.5	295	0.00001	0.00080	0.05	4,637	1.00
20	(130.55 , 33.75)	M7.0	289	0.00001	0.00081	0.05	4,856	1.04
21	(130.55 , 33.55)	M6.0	285	0.00003	0.00083	0.05	5,024	1.06
22	西山断層帯	M7.3	282	0.00010	0.00093	0.05	5,166	1.09
23	(130.25 , 33.55)	M7.0	281	0.00001	0.00094	0.05	5,216	1.10
24	(130.65 , 33.45)	M7.0	278	0.00001	0.00094	0.05	5,307	1.11
25	(130.25 , 33.65)	M7.0	265	0.00001	0.00095	0.04	5,892	1.21
26	(130.35 , 33.75)	M7.0	264	0.00001	0.00096	0.04	5,933	1.21
27	(130.45 , 33.65)	M6.0	261	0.00003	0.00098	0.04	6,078	1.24
28	(130.45 , 33.55)	M5.5	261	0.00006	0.00104	0.04	6,107	1.24
29	(130.45 , 33.45)	M6.5	258	0.00001	0.00106	0.04	6,261	1.27
30	(130.35 , 33.65)	M6.5	258	0.00001	0.00107	0.04	6,275	1.27

表-15　財務などに関する指標の上位 30 のイベントリスクリスト（Ｏ県，標準ケース）

No.	震源名	M	PBA (cm/s²)	発生確率／1年	超過確率／1年	90%非超過値 損失率（再建費）	90%非超過値 現金・現預金（百万円）	90%非超過値 流動比率
1	(135.25 , 34.45)	M7.0	528	0.00000	0.00000	0.20	−7,878	—
2	(135.15 , 34.45)	M7.0	492	0.00000	0.00001	0.18	−5,949	—
3	(135.25 , 34.35)	M7.0	479	0.00000	0.00001	0.17	−5,239	—
4	(135.15 , 34.35)	M7.0	453	0.00000	0.00001	0.15	−3,863	—
5	(135.35 , 34.45)	M7.0	430	0.00000	0.00002	0.14	−2,634	—
6	中央構造線(和泉山脈)	M7.7	420	0.00097	0.00098	0.13	(2) −2,085	—
7	(135.35 , 34.35)	M7.0	390	0.00000	0.00098	0.11	−506	0.15
8	(135.25 , 34.55)	M7.0	389	0.00000	0.00099	0.11	−450	0.16
9	(135.15 , 34.55)	M7.0	366	0.00000	0.00099	0.09	726	0.35
10	(135.25 , 34.45)	M6.5	357	0.00001	0.00100	0.09	1,155	0.42
11	(135.05 , 34.45)	M7.0	356	0.00000	0.00101	0.09	1,229	0.44
12	大阪湾断層帯	M7.5	347	0.00000	0.00101	0.08	1,677	0.51
13	(135.15 , 34.45)	M6.5	334	0.00001	0.00102	0.07	2,320	0.62
14	(135.05 , 34.35)	M7.0	329	0.00000	0.00102	0.07	2,542	0.65
15	(135.35 , 34.55)	M7.0	325	0.00000	0.00103	0.07	2,746	0.69
16	(135.25 , 34.35)	M6.5	320	0.00001	0.00104	0.07	2,961	0.72
17	中央構造線(紀淡ー鳴門)	M7.7	319	0.00006	0.00110	0.07	3,032	0.73
18	上町断層帯	M7.5	310	0.00099	0.00208	0.06	3,440	0.80
19	(135.25 , 34.25)	M7.0	307	0.00000	0.00208	0.06	3,559	0.82
20	和泉北麓断層帯	M6.8	304	0.00002	0.00210	0.06	3,712	0.85
21	六甲・淡路断層帯(六甲南縁)	M7.9	299	0.00004	0.00214	0.06	3,890	0.88
22	(135.15 , 34.25)	M7.0	294	0.00000	0.00214	0.05	(1) 4,136	0.92
23	(135.15 , 34.35)	M6.5	293	0.00001	0.00215	0.05	4,144	0.92
24	(135.45 , 34.45)	M7.0	287	0.00000	0.00216	0.05	4,405	0.96
25	(135.05 , 34.55)	M7.0	284	0.00000	0.00216	0.05	4,540	0.98
26	(135.35 , 34.45)	M6.5	276	0.00001	0.00217	0.04	4,853	1.04
27	(135.45 , 34.35)	M7.0	271	0.00000	0.00217	0.04	5,056	1.07
28	(135.35 , 34.25)	M7.0	265	0.00002	0.00220	0.04	5,359	1.12
29	(135.35 , 34.35)	M6.5	248	0.00001	0.00221	0.03	6,206	1.26
30	(135.25 , 34.55)	M6.5	247	0.00001	0.00222	0.03	6,240	1.26

表-16　財務などに関する指標の上位 30 のイベントリスクリスト（Ｏ県，悲観ケース）

No.	震源名	M	PBA (cm/s²)	発生確率／1年	超過確率／1年	90%非超過値 損失率（再建費）	90%非超過値 現金・現預金（百万円）	90%非超過値 流動比率
1	(135.25 , 34.45)	M7.0	528	0.00000	0.00000	0.20	−8,936	—
2	(135.15 , 34.45)	M7.0	492	0.00000	0.00001	0.18	−7,007	—
3	(135.25 , 34.35)	M7.0	479	0.00000	0.00001	0.17	−6,298	—
4	(135.15 , 34.35)	M7.0	453	0.00000	0.00001	0.15	−4,923	—
5	(135.35 , 34.45)	M7.0	430	0.00000	0.00002	0.14	−3,696	—
6	中央構造線(和泉山脈)	M7.7	420	0.00097	0.00098	0.13	(2) −3,148	—
7	(135.35 , 34.35)	M7.0	390	0.00000	0.00098	0.11	−1,572	—
8	(135.25 , 34.55)	M7.0	389	0.00000	0.00099	0.11	−1,516	—
9	(135.15 , 34.55)	M7.0	366	0.00000	0.00099	0.09	−343	0.18
10	(135.25 , 34.45)	M6.5	357	0.00001	0.00100	0.09	85	0.25
11	(135.05 , 34.45)	M7.0	356	0.00000	0.00101	0.09	159	0.26
12	大阪湾断層帯	M7.5	347	0.00000	0.00101	0.08	606	0.33
13	(135.15 , 34.45)	M6.5	334	0.00001	0.00102	0.07	1,246	0.44
14	(135.05 , 34.35)	M7.0	329	0.00000	0.00102	0.07	1,467	0.48
15	(135.35 , 34.55)	M7.0	325	0.00000	0.00103	0.07	1,670	0.51
16	(135.25 , 34.35)	M6.5	320	0.00001	0.00104	0.07	1,884	0.55
17	中央構造線(紀淡ー鳴門)	M7.7	319	0.00006	0.00110	0.07	1,955	0.56
18	上町断層帯	M7.5	310	0.00099	0.00208	0.06	2,361	0.62
19	(135.25 , 34.25)	M7.0	307	0.00000	0.00208	0.06	2,479	0.64
20	和泉北麓断層帯	M6.8	304	0.00002	0.00210	0.06	2,632	0.67
21	六甲・淡路断層帯(六甲南縁)	M7.9	299	0.00004	0.00214	0.06	2,808	0.70
22	(135.15 , 34.25)	M7.0	294	0.00000	0.00214	0.05	3,053	0.74
23	(135.15 , 34.35)	M6.5	293	0.00001	0.00215	0.05	3,060	0.74
24	(135.45 , 34.45)	M7.0	287	0.00000	0.00216	0.05	3,320	0.78
25	(135.05 , 34.55)	M7.0	284	0.00000	0.00216	0.05	3,454	0.80
26	(135.35 , 34.45)	M6.5	276	0.00001	0.00217	0.04	3,765	0.86
27	(135.45 , 34.35)	M7.0	271	0.00000	0.00217	0.04	3,965	0.89
28	(135.35 , 34.25)	M7.0	265	0.00002	0.00220	0.04	(1) 4,266	0.94
29	(135.35 , 34.35)	M6.5	248	0.00001	0.00221	0.03	5,106	1.08
30	(135.25 , 34.55)	M6.5	247	0.00001	0.00222	0.03	5,140	1.08

表-17　財務などに関する指標の上位 30 のイベントリスクリスト（Ｏ県，楽観ケース）

No.	震源名	M	PBA (cm/s²)	発生確率／1年	超過確率／1年	90%非超過値 損失率（再建費）	90%非超過値 現金・現預金（百万円）	90%非超過値 流動比率
1	(135.25 , 34.45)	M7.0	528	0.00000	0.00000	0.20	−7,350	—
2	(135.15 , 34.45)	M7.0	492	0.00000	0.00001	0.18	−5,420	—
3	(135.25 , 34.35)	M7.0	479	0.00000	0.00001	0.17	−4,710	—
4	(135.15 , 34.35)	M7.0	453	0.00000	0.00001	0.15	−3,333	—
5	(135.35 , 34.45)	M7.0	430	0.00000	0.00002	0.14	−2,103	—
6	中央構造線(和泉山脈)	M7.7	420	0.00097	0.00098	0.13	(2) −1,554	—
7	(135.35 , 34.35)	M7.0	390	0.00000	0.00098	0.11	27	0.24
8	(135.25 , 34.55)	M7.0	389	0.00000	0.00099	0.11	83	0.25
9	(135.15 , 34.55)	M7.0	366	0.00000	0.00099	0.09	1,260	0.44
10	(135.25 , 34.45)	M6.5	357	0.00001	0.00100	0.09	1,690	0.51
11	(135.05 , 34.45)	M7.0	356	0.00000	0.00101	0.09	1,765	0.53
12	大阪湾断層帯	M7.5	347	0.00000	0.00101	0.08	2,213	0.60
13	(135.15 , 34.45)	M6.5	334	0.00001	0.00102	0.07	2,857	0.71
14	(135.05 , 34.35)	M7.0	329	0.00000	0.00102	0.07	3,079	0.74
15	(135.35 , 34.55)	M7.0	325	0.00000	0.00103	0.07	3,284	0.78
16	(135.25 , 34.35)	M6.5	320	0.00001	0.00104	0.07	3,499	0.81
17	中央構造線(紀淡ー鳴門)	M7.7	319	0.00006	0.00110	0.07	3,571	0.82
18	上町断層帯	M7.5	310	0.00099	0.00208	0.06	3,979	0.89
19	(135.25 , 34.25)	M7.0	307	0.00000	0.00208	0.06	(1) 4,098	0.91
20	和泉北麓断層帯	M6.8	304	0.00002	0.00210	0.06	4,252	0.94
21	六甲・淡路断層帯(六甲南縁)	M7.9	299	0.00004	0.00214	0.06	4,430	0.97
22	(135.15 , 34.25)	M7.0	294	0.00000	0.00214	0.05	4,678	1.01
23	(135.15 , 34.35)	M6.5	293	0.00001	0.00215	0.05	4,685	1.01
24	(135.45 , 34.45)	M7.0	287	0.00000	0.00216	0.05	4,947	1.05
25	(135.05 , 34.55)	M7.0	284	0.00000	0.00216	0.05	5,083	1.07
26	(135.35 , 34.45)	M6.5	276	0.00001	0.00217	0.04	5,397	1.12
27	(135.45 , 34.35)	M7.0	271	0.00000	0.00217	0.04	5,601	1.16
28	(135.35 , 34.25)	M7.0	265	0.00002	0.00220	0.04	5,905	1.21
29	(135.35 , 34.35)	M6.5	248	0.00001	0.00221	0.03	6,756	1.35
30	(135.25 , 34.55)	M6.5	247	0.00001	0.00222	0.03	6,791	1.35

表-18　設定した保険の付保範囲と保険純率

(a)空港がＦ県に位置する場合

	標準ケース		悲観ケース		楽観ケース	
	運営権者	国	運営権者	国	運営権者	国
免責	0.05	0.00	0.03	0.00	0.05	0.00
支払限度	0.16	0.03	0.16	0.03	0.16	0.03
保険純率	0.000027	0.000044	0.000039	0.000044	0.000027	0.000044

(b)空港がＯ県に位置する場合

	標準ケース		悲観ケース		楽観ケース	
	運営権者	国	運営権者	国	運営権者	国
免責	0.05	0.00	0.03	0.00	0.06	0.00
支払限度	0.13	0.04	0.13	0.04	0.13	0.04
保険純率	0.000026	0.000038	0.000044	0.000038	0.000020	0.000038

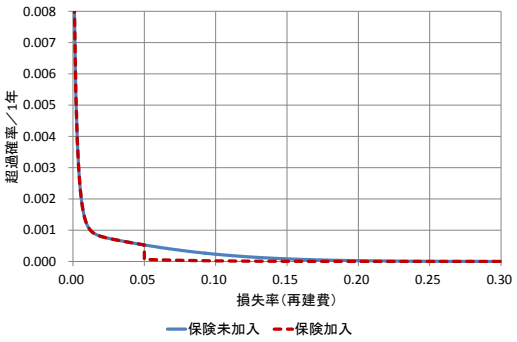


図-44　運営権者の所有物に関するリスクカーブ（Ｆ県，標準ケース）

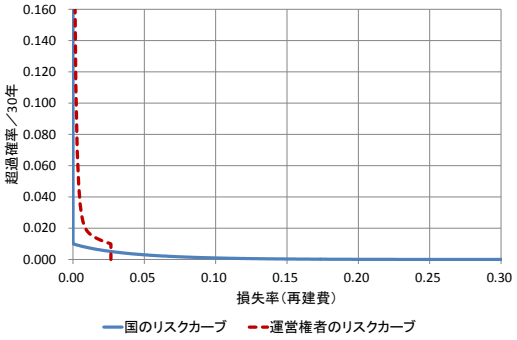


図-45　国の所有物に関する，国と運営権者のリスクカーブ（Ｆ県，標準ケース）

(7) 保険の効果に関する検討

表-18 に示した保険の免責と支払限度の設計値に基づき，保険金支払いによる財務への影響について検討を行った．流動比率の財務ストレス関数について，保険未加入と加入した場合について比較したものを**図-46**～**図-51** に示す．なお，発災により法人税の免除を考慮しており，そのため低い地震動で，地震リスク未考慮に比べ地震リスク考慮が上回っている．

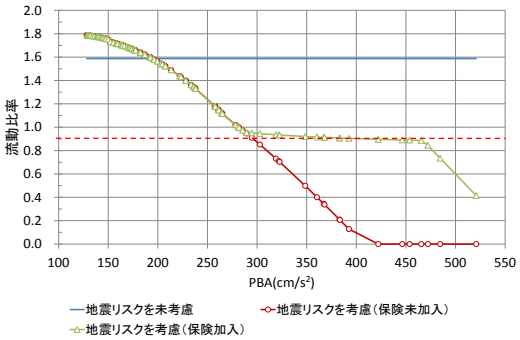


図-46　財務ストレス関数でみた保険の効果（Ｆ県，標準ケース）

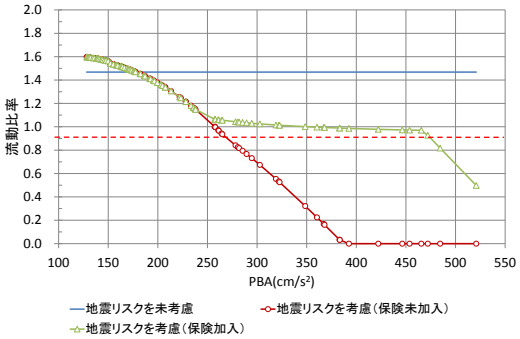


図-47　財務ストレス関数でみた保険の効果（Ｆ県，悲観ケース）

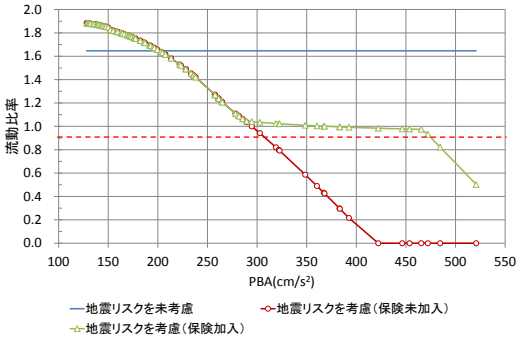


図-48　財務ストレス関数でみた保険の効果（Ｆ県，楽観ケース）

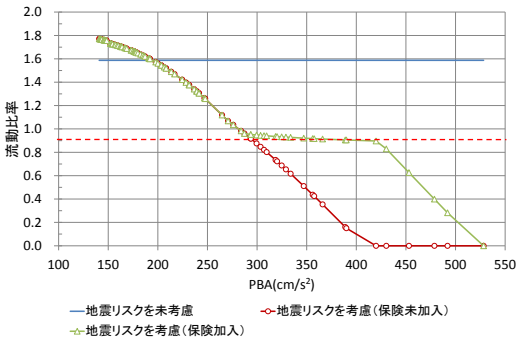


図-49　財務ストレス関数でみた保険の効果（Ｏ県，標準ケース）

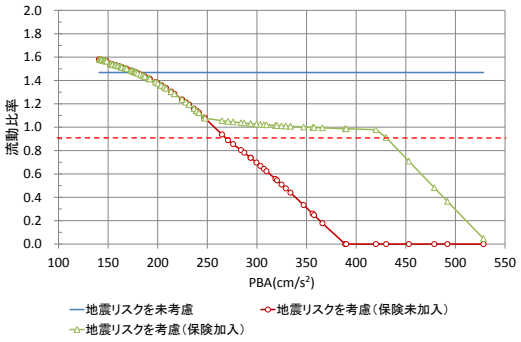


図-50　財務ストレス関数でみた保険の効果
（O県，悲観ケース）

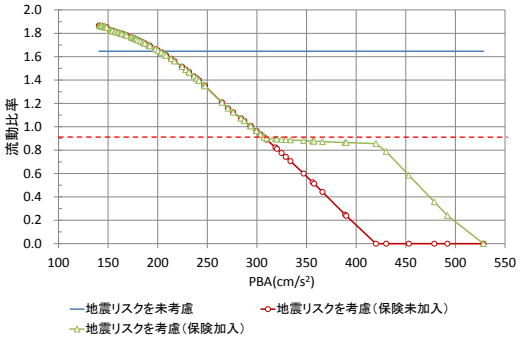


図-51　財務ストレス関数でみた保険の効果
（O県，楽観ケース）

図-46～図-51 のどのケースについても，保険に加入することで流動比率は著しい改善が見られる．これは保険金が損益計算書の特別利益として入ることで，貸借対照表の現金・現預金が一時的に増加した結果である．また，各図とも，保険未加入と加入が分かれる点があり，この点が保険金の支払が行われる点である．つまり，免責を超える損失が発生した点である．流動比率は地震動の増加と共に水平を維持し，その後低下する．この低下点は支払限度となる点である．この点を超える範囲は，当初設定した最悪地震を超えるシナリオ地震の範囲であり，必要資金は支払保険金を上回る．このため，流動比率は許容値（0.9 程度）を下回る結果となっている．

標準/悲観/楽観において，それぞれの免責は異なり，また保険純率も異なる．このため，どのケースを対象に保険設計をするかは，政策的判断に委ねられるものと考える．一方で，本研究で示した保険設計の考え方と保険効果の定量化は，判断の根拠を明示的に示す有益な情報となろう．

5. 結　語

空港の管理運営に関わる関係者の立場（人格別）によって負担すべき地震リスクは異なるものの，これを踏まえた地震リスクの評価方法は未整備である．このためコンセッションにおける空港運営権者と国との地震リスクの分担について，客観的な情報に基づく議論はできていない．そこで本研究は，①複数のシナリオ地震（マルチイベントモデル）を想定して，②構造信頼性理論に基づく確率論的地震リスク評価手法を体系化するとともに，③空港運営権者の財務影響分析，保険の仕組みや設計方法について整備すると共に，財務ストレス関数を提案した．さらに④ケーススタディとして標本空港を設定し，地震リスクの評価，財務分析，ならびに⑤保険の設計とその効果について具体的な検討を行った．特に保険の設計においては，各関係者が負担すべき地震リスクを定量化し，人格別の地震リスクを明示した．

①のマルチイベントモデルについてまとめると以下となる．

- マルチイベントモデルをベースとした地震危険度は，シナリオ地震とその地震によるリスクを明確に対応付けることができ，財務負荷や保険の設計，保険付保による財務の改善効果などを確認するのに有効であることが分かった．

②の構造信頼性理論に基づく確率論的地震リスク評価手法の体系化についてまとめると以下となる．

- イベントツリー解析，システムモデルに損傷確率，及び被害が生じた場合の影響（財物損失額，事業停止期間）を与えることで，地震損失関数が評価できる．地震損失関数，地震による財務負荷の評価を行うため，除去損，逸失利益及び再建費に対して評価し，その手順を示した．
- 地震損失関数にマルチイベントモデルによるイベントハザード曲線を考慮した，イベントリスクカーブならびにリスクカーブの評価方法を示した．
- 本報で整備した地震リスク評価手法は，評価プロセスや科学的バックグラウンドが明確であり，説明性に優れている．さらに構造物固有のリスクが把握できることから，ハード対策を含めたリスクマネジメントに有効である．

③空港運営者の財務影響分析の方法，財務ストレス関数や保険の仕組みや設計方法についてまとめると以下となる．

・ イベントハザード曲線から算出される地震動に応じた地震損失関数（損失率（除去損），損失率（逸失利益）及び損失率（再建費））を使い，各業績指標を評価するとともに，財務ストレス関数を求める方法を提案した．
・ コンセッション方式に基づく人格別の地震リスクの分担の考え方についてまとめた．
・ リスクカーブを使った支払保険金の仕組み，ならびにコマーシャルベースの地震再保険一般についてまとめた．
・ イベントリスクリストを使い，保険純率の最小化を目標とした保険の支払限度ならびに免責の設定方法を提案した．

④ケーススタディでは，同一の標本空港がＦ県，Ｏ県の 2 つの地域に所在するものとした．ケーススタディについてまとめると以下となる．

・ マルチイベントによる当該地点（Ｆ県，Ｏ県）について 100 個のシナリオ地震を整備した．
・ 人格別（運営権者，国）のイベントリスクカーブならびにリスクカーブから，地域による地震危険度の相違を把握できた．
・ 財務ストレス関数より，シナリオ地震ならびに地震動の双方の視点から，財務負荷の程度を把握できることが分かった．

⑤保険の設計とその効果についてまとめと以下となる．

・ 人格別（運営権者，国）に保険の付保範囲の検討を行い，人格それぞれの地震リスクの負担分をリスクカーブで示した．
・ 運営権の譲渡期間（30 年）において，国が負担しなければならない可能性を 1.0%と仮定し，リスクカーブから国と運営権者が負担すべきリスクを示した．その結果，Ｆ県では 798 百万円，Ｏ県では 1,064 百万円以上の損失が発生した場合，これを超える金額を国が負担することが分かった．
・ 運営権者の保険設計において，設定した保険金の支払限度ならびに免責から，発災時に支払われると予想される保険金を財務諸表に取り込み，保険加入の効果を財務ストレス関数で示した．その結果，流動比率の改善は保険金の支払限度ならびに免責を反映すると共に，改善の効果とシナリオ地震を明確に関連付けることができた．
・ 標本空港の財務状況は比較的良好であり，このため支払い保険金で必要資金を賄うことができた．しかしながら，財務状況の悪化や，頻度の高い巨大地震が懸念されるような地域では，支払い保険金だけでは必要資金を賄うことができないケースもある．このような場合には，代替的金融対策（キャットボンドなど）の検討が必要になると考える．本報で提示した保険設計の考え方やイベントリスクリスト（**表-12** など），財務ストレス関数（**図-46** など）は，対策の判断やその根拠を示す上で，極めて有益である．

今後の検討課題も幾つか残されているものと考える．まず，本研究で対象とした標本空港の財務状況は比較的健全であり，このため本評価結果は必ずしも一般性を有するものでない．健全な財務状況ではないケースや発災時必要資金より財物損失（保険対象）が小さいケースなど，ケーススタディを進める必要がある．また，金融対策に耐震補強などのハード対策を組合わせた，より合理的な空港の防災対策なども今後の検討課題である．そのためには，本報で整備した施設固有の地震リスク評価方法は耐震補強の優先順位やその効果の確認など，有用できるものと考える．

一方，空港の民営化の流れが加速する中，地震に代表される自然災害一般に対する備えは必ずしも十分ではない．特に発災時の救急救命，被災地への物資輸送など，インフラとしての機能が期待される空港では，事前のリスク評価（定量化）が不可欠である．しかしながら，地震リスク評価に関する指針やマニュアル，あるいはガイドラインなど，統一的な基準は整備されていない．また，地震リスク評価に関する市場は未開発であるため，現時点ではリスクを評価する技術者は十分育っていない．このような人材育成の観点からも，リスク評価に関する指針などの整備が望まれる．

なお，本報告書は，国土交通省国土技術政策総合研究所，株式会社篠塚研究所の２者で実施した共同研究の成果をとりまとめたものである．

謝辞

本研究を進めるにあたり，株式会社篠塚研究所の静間俊郎様，株式会社シオ政策経営研究所の中神啓介様，西崎英治様，株式会社日本空港コンサルタンツの清水啓様，熊澤将之様には貴重な助言をいただきました．また，関淳様，工藤均様には貴重な助言をいただきました．ここに深く感謝の意を表します．

参考文献

安中正, 山崎文雄, 片平冬樹（1997） 気象庁 87 型強震計記録を用いた最大地動及び応答スペクトル推定式の提案, 第 24 回地震工学研究発表会公演論文集, pp.161-164.

石田寛，水越薫（1998）：建物フラジリティ関数の評価手法に関する検討，1998 年度日本建築学会関東支部研究報告集，pp.65-68.

宇賀田健（2001）：シナリオ地震による日本全国の地震危険度評価，日本建築学会構造系論文集，第 541 号，pp.95-104.

国土交通省航空局（2014）：仙台空港特定運営事業基本スキーム

国土交通省航空局（2014）：仙台空港特定運営事業等 実施方針

桜井久勝，村宮克彦（2007）：倒産企業の財務比率の時系列特性，国民経済雑誌 196 巻 第 6 号.

地震調査研究推進本部（2012）:「今後の地震動ハザード評価に関する検討，ならびに付録」報告書.

静間俊郎，中村孝明（2009）：復旧曲線の理論的考察と BCP への利用，土木学会 第 1 回地震リスクマネジメントと事業継続シンポジウム，pp.231-236.

財団法人港湾空港建設技術サービスセンター（2008）：空港土木施設の設置基準・同解説

高橋康文（2012）：地震保険制度，一般社団法地震金融財政事業研究会，P.255.

中島由貴，中村孝明，中神啓介，西崎英治，清水啓（2013）：津波災害の初期段階における代替空港に関する検討，国土技術政策総合研究所資料第 718 号，P.23.

中島由貴，中神啓介，西崎英治，清水啓（2013）：空港の災害リスクの定量的評価手法に関する研究，国土技術政策総合研究所資料第 756 号，P.50.

中島由貴，中村孝明，中神啓介，西崎英治：（2014）：空港の確率論的リスク評価における財務影響分析に関する研究，国土技術政策総合研究所資料第 783 号

中村孝明，水谷守（1996）：地震時損傷確率の統計的評価手法に関する一提案， 土木学会第 51 回年次学術講演会 1-A, p.938.

中村孝明，長沼俊彦，静間俊郎，篠塚正宣（1998）：統計解析による道路橋脚の地震時損傷確率に関する研究，第 10 回日本地震工学シンポジウム論文集，Vol.3，pp.3165-3170.

中村孝明，飯塚崇文，藤井俊二，高山正春（1999）：兵庫県南部地震の被災データに基づく建築被害関数の推定 その１ 建物のフラジリティ曲線の評価，建築学会大会学術講演梗概集 B-2，pp.33-3.

中村孝明，境茂樹，吉川弘道（2011）：損傷相関を考慮した地震時システム性能評価に関する研究，日本建築学会構造系論文集，第 76 巻，第 661 号，pp.713-719.

能島暢呂（2009）：要素破壊の相関性を考慮したネットワーク最大フロー評価のシミュレーション，土木学会論文集 A1，Vol.65, No.1, pp.776-788.

林康裕，宮腰淳一，田村和夫（1997）：1995 年兵庫県南部地震の建物被害に基づく最大地震動分布に関する考察，日本建築学会構造系論文報告集，第 502 号，pp.61-68.

防災科学技術研究所: 地震ハザードステーション（J-SHIS）, http://www.j-shis.bosai.go.jp/

村尾修，山崎文雄（2000）：自治体の被害調査結果に基づく兵庫県南部地震の建物被害関数，日本建築学会構造系論文集，pp.189-195.

望月智也，中村孝明（2000）：多項反応モデルによる地震時損傷度曲線の統計的推定，土木学会，第２回リアルタイム地震防災シンポジウム論文集，pp.45-50.

山崎文雄，大西淳一，田山聡，高野辰雄（1998）：高速道路構造物に対する地震被害推定式の提案，第 10 回日本地震工学シンポジウム論文集，Vol.3，pp.3491-3496.

吉川弘道，大滝健，前田欣昌，中村孝明（2007）：地震リスク解析におけるフラジリティ曲線と地震損失関数,コンクリート工学会誌,Vol.45, No.10, pp.26-34.

Cornell, C. Allin（1968）: Engineering seismic risk analysis, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.58, No.5, pp.1583-1606.

FEMA（1985）：Earthquake Damage Evolution Data for California, ATC-13, p.492.

FEMA, HAZUS 99（1999）: Technical Manual Federal Emergency Management Agency, Washington DC.

Grossi, P.,（2000）: Earthquake Damage Assessment, Expert Opinion to Fragility Curves, 8th ASCE Specially Conference on Probabilistic Mechanics and Structure Reliability, PMC2000-123.

Mander,J.,B.,（1999）: Fragility Curve Development for Assessing the Seismic Vulnerability of Highway Bridges, Research Progress and Accomplishments

1997-1999, MCEER, University at Buffalo, The State University of New York.

Shinozuka, M.（1999）: Statistical Analysis of Fragility Curves, Asian-Pacific Symposium on Structural Reliability its Application, Taiwan,R.O.C.

Shinozuka, M, Feng, M., q., Kim, H., Uzawa, T. and Ueda, T.（2001）: Statistical Analysis of Fragility Curve, Technical Report submitted to MCEER under Federal Highway Administration Agency.

付録

付録Ａ　用語の定義

付録表-1　用語の定義

用語	内容
マルチイベントモデル	複数かつ多数のシナリオ地震で表現される地震ハザードモデルをマルチイベントモデルという．また，マルチイベントモデルに基づき，シナリオ地震別の地震動指標とその年超過確率（各シナリオ地震の発生確率の累積）を表した曲線をマルチイベントモデルによるイベントハザード曲線という．
地震ハザード	ある対象とする地点で，将来発生が予測されている地震動の強さと，それが発生する頻度（確率）を表したものを地震ハザード（地震危険度）という．地震ハザードを示す表現方法として，地震動指標（加速度や加速度応答スペクトルなど）とその年超過確率を表した地震ハザード曲線や，マルチイベントモデルによるイベントハザード曲線などがある．
シナリオ地震	活断層や海溝型の地震など，特定の名称でその発生が予想されている地震，あるいは震源が特定できないものの，周辺地域で発生が予想される背景地震などをシナリオ地震という．
ポートフォリオ地震リスク評価	散在する複数の地震リスクを評価することをポートフォリオ地震リスク評価という．なお，ポートフォリオ評価は，元来，相関がないか，あるいは逆相関の関係にある証券を分散投資することに関して評価をすることを意味する．
超過確率及び 年超過確率	確率変数がある値を超える確率が超過確率であり，年間当たりの超過確率を年超過確率という．なお，年超過確率の逆数は再現期間となる．
イベントツリー解析	地震（発端事象）により生じる被害（結果）までの全ての経路を表した樹形図をイベントツリー（事象樹木）と呼ぶ．イベントツリーにより示された結果の発生確率や結果による影響を，イベントツリーの各分岐に与えられた諸数値から四則演算などを用いて算出する解析をイベントツリー解析という．
損失の確率関数	離散確率変数の確率分布を表したものが確率関数である．特に離散確率変数が損失（人的損失，経済的など）で表された確率分布を損失の確率関数という．
損失期待値	損失の加重平均を損失期待値という．
予想最大損失	地震により予想される最大損失で，国内では一般的にリスクカーブやイベントリスクカーブの確率 1/475 に相当する損失額や損失率（復旧費／再調達価格）を予想最大損失（PML：Probable Maximum Loss）という．
リスクカーブ及び イベントリスクカーブ	損失額や損失率と超過確率の関係を表した曲線を総称的にリスクカーブというが，特に狭義の意味では，損失額や損失率を生じさせるシナリオ地震の超過確率を表したものをイベントリスクカーブという ．一方，損失額や損失率の超過確率を表したものをリスクカーブと呼ぶ．
イベントリスクリスト	対象施設に損失を及ぼす上位 10～20 程度のシナリオ地震，地震の発生確率及び累積確率（年超過確率），また，シナリオ地震による損失（損失期待値，PML）などを表形式のリストで表したものをイベントリスクリストという（リスクリストと略称することがある）．
フラジリティカーブ	地震時に構造物の応答がその構造物の耐力を超える確率（破壊確率や損傷確率と呼ぶ）を最大加速度や最大速度などの地震動指標（地震動強さを表す指標のこと）の大きさに応じて示した曲線をフラジリティカーブという．なお，フラジリティカーブは非超過確率関数である．
非超過確率関数	連続確率変数の確率分布を表したものを確率密度関数といい，確率関数や確率密度関数を累積したものが累積分布関数となる．累積分布関数は，確率変数がある値以下になる確率，すなわち，ある値を超過しない非超過な確率を表すため，非超過確率関数ともいわれている．
地震損失関数	地震時に構造物に生じる損失の期待値や 90%非超過値を地震動指標の大きさに示した関数を地震損失関数という．なお，期待値とは，確率を重みとして算出した確率変数の平均値，すなわち加重平均である．一方，90%非超過値は，その値以下の確率が 90%になる値である．
復旧曲線	地震発生後からの経過時間に対応して施設における機能の回復率（あるいは性能回復率）を表した曲線を復旧曲線という．

付録表-2　用語の定義（**付録表-1** の続き）

用語	内容
地震動指標	時刻歴波形から算出される，最大加速度，最大速度，SI 値，計測震度及び応答スペクトル（加速度，速度，変位）などの地震動強さを表す指標を地震動指標という．なお，気象庁震度階は計測震度から判定されるものである．
信頼性設計法	構造物の供用期間中に地震が発生した場合において，地震による構造物の応答がその構造物の耐力を超える確率が許容値以内に収まるように設計する手法を信頼性設計法と呼ぶ．
除去損（逸失資産）	有形固定資産（建物，機械及び装置など）を廃棄処分したときに掛った損失額を計上する科目を除去損という．除去する固定資産の簿価と，除去に必要な諸費用を損失額に含めて処理する．
逸失利益	不慮の事態が生じなかった場合に，利害関係者が本来取得しえたはずの財産上の利益の喪失を逸失利益という．例えば，地震により施設が復旧するために休業せざるをえなかったことによる所得の喪失は逸失利益に該当する．
再建費	損壊や損傷により使用できなくなった資産を元に戻すための復旧費用を再建費という．
財務諸表	株主などに報告するため，経営に伴う財務の状況を記録，計算，整理して経理内容を明確にしたものを財務諸表という．財務諸表には，貸借対照表，損益計算書，キャッシュフロー計算書，株主資本等変動計算書がある．
業績指標	財務諸表から算出される流動比率，当座比率，自己資本比率などの指標を業績指標という．各指標の詳細については以下で解説する．
流動比率	流動比率＝流動資産／流動負債で表され，企業における短期的な支払い能力がどの程度あるかを測る業績指標である（流動比率が高い程，資金繰りが円滑に行える）．
当座比率	当座比率＝当座資産／流動負債で表され，企業において現金化できる資産がどの程度あるかを測る業績指標である（当座比率が高い程，支払い能力が高い）．
自己資本比率	自己資本比率＝純資産／総資産で表され，企業において返済義務のある負債がどの程度あるかを測る業績指標である（自己資本比率が高い程，返済義務のある負債が少ない）．
財務ストレス関数	各シナリオ地震による地震動強さを横軸，縦軸を業績指標（流動比率，当座比率，自己資本比率など）を取った関数を財務ストレス関数という．財務ストレス関数は，地震損失関数を用いた財務影響分析を行うことで算出される．
保険の免責と 支払限度	保険で損失をカバーしてくれる範囲の下限値を免責（Deductible），上限値を支払限度（Limit）という．保険金の支払いは，実際の損失額が免責以下の場合はその損失を被保険者で保有し，免責以上支払限度以下では，実際の損失額から免責を差し引いた額が支払われる．支払限度以上の損失が発生した場合には，支払限度から免責を差し引いた額が支払われる．
代替的金融対策	地震保険以外のリスク移転策を代替的金融対策（ART：Alternative Risk Trnsfer）という．代表的な ART としては，キャプティブ保険，保険デリバティブ，キャットボンド，コミットメント・ライン及びコンティンジェント・デットがある．

付録Ｂ　マルチイベントモデルでの地震源の設定について

マルチイベントモデルでは，地震危険度を評価する対象施設が存在する地点について，被害をもたらすであろうシナリオ地震を全国規模で特定する．具体的には**図-A** に示すように，活断層地震やプレート境界で発生する地震を設定し，それぞれの断層位置，マグニチュード，発生確率を特定する．さらに活断層として現れない陸域（一部海域も含まれる）で発生する地殻内地震を設定する．この地殻内地震を背景地震と呼び，図のように網の目状に地震源を分布させ，それぞれの断層位置，マグニチュード，発生確率を特定する．図の点は震源の代表点を表している．これらシナリオ地震群を総称してマルチイベントモデルと呼ぶ．マルチイベントモデルは，背景地震を特定の震源としてモデル化するところに特徴がある．

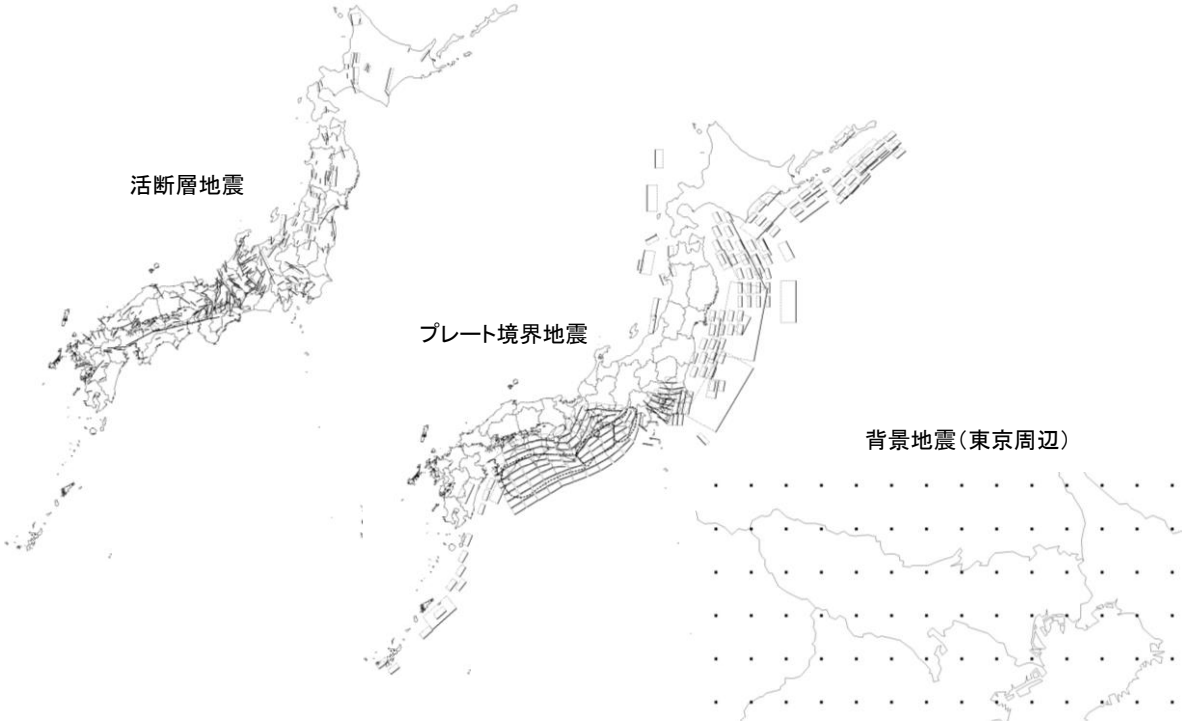
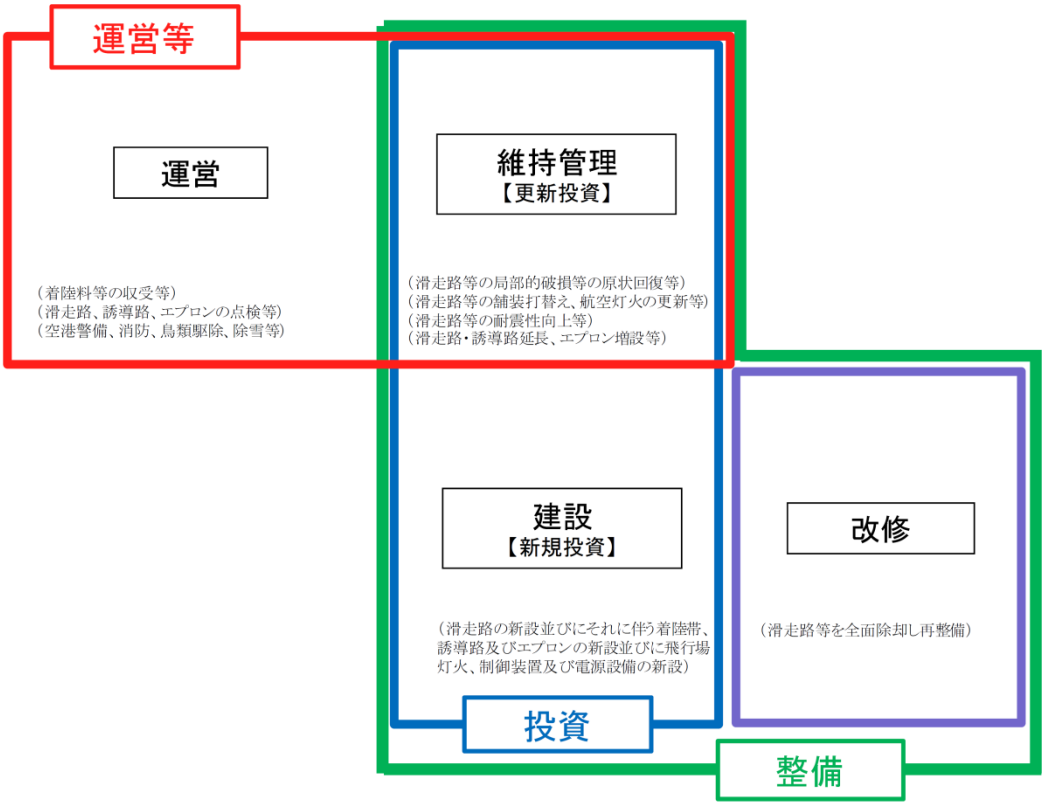


図-A　マルチイベントモデルの地震源

出典：中村孝明『実務に役立つ地震リスクマネジメント』（2013，丸善出版）

付録Ｃ　仙台空港特定運営事業等実施方針で示された維持管理の範囲

運営権者が空港基本施設等の運営権設定対象施設に対して行う維持管理の範囲として，以下が示されている．



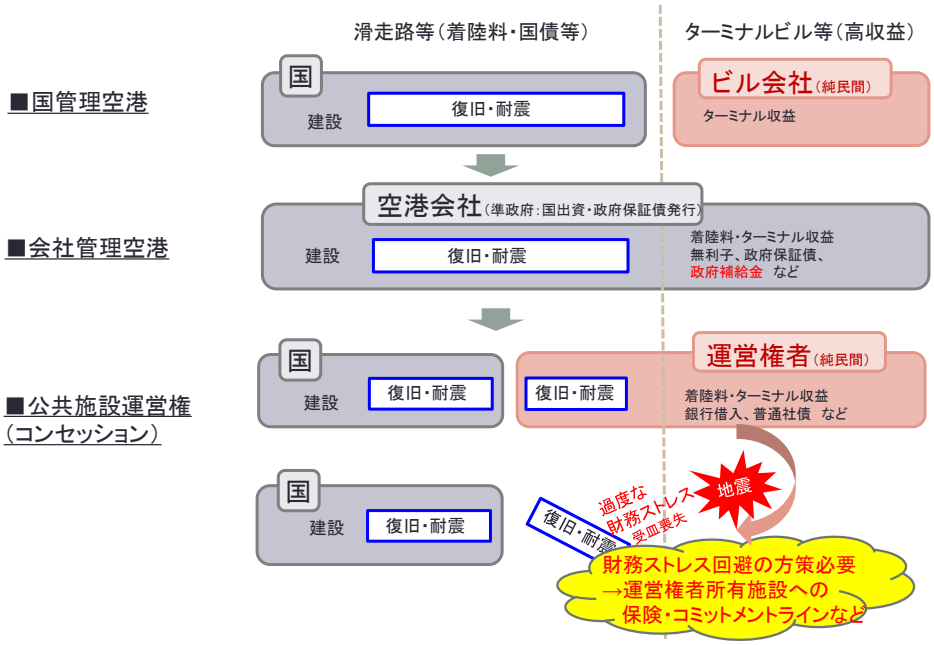
ＰＦＩ法並びに公共施設等運営権及び公共施設等運営事業等に関するガイドライン（以下「運営権ＧＬ」という。）に基づく用語の定義

- 運営等：運営及び維持管理をいう。（ＰＦＩ法第２条第６項）
- 維持管理：新設又は施設等を全面除却し再整備するものを除く資本的支出又は修繕（いわゆる増築や大規模修繕も含む）をいう。（運営権ＧＬ）
- 建設：新たな施設を作り出すこと（新設工事）をいう。（運営権ＧＬ）
- 改修：施設等を全面除却し再整備することをいう 。（運営権ＧＬ）
- 投資：更新投資は「維持管理」を、新規投資は「建設」をいう。（運営権ＧＬ）

出典：仙台空港特定運営事業等実施方針（2014 年，国土交通省航空局）pp.53.

付録Ｄ　空港運営の形態と耐震対策の受け皿

民活空港運営法（民間の能力を活用した国管理空港等の運営等に関する法律，平成 25 年 7 月）などの制定を機に，空港運営は運営権設定に伴う民間資金の活用を目的に，国管理，会社管理に加えコンセッション方式による民営化が進められている．下図に示す様に，会社管理型は，民航の需要変動や突発的な地震災害などが発生しても政府補給金により経営は維持されるが，コンセッション方式は土地や施設の所有権を国に残したまま，一定期間（30～50 年程度）の施設運営，維持及び管理などを民間企業に委ねるもので，その仕組み上地震災害時における諸損失の一部は運営権者の責務に帰す．このため地震災害時に，稀に債務の履行に支障を来し，場合によっては経営持続が困難な状況に至ることも考えられる．そこで経営持続を目標とした地震リスクマネジメントが求められている．



付録Ｅ　業績指標（自己資本比率，当座比率，流動比率）の算出式

本報で設定した標準空港における貸借対照表から，業績指標（自己資本比率，当座比率，流動比率）を算出する計算式は，以下の通り．

自己資本比率＝総資産／負債・純資産総額

当座比率　　＝（現金・現預金＋売掛金）／流動負債

流動比率　　＝流動資産／流動負債

貸借対照表　（単位：百万円）

	資産の部		負債の部		
	科目	金額	科目	金額	
①	流動資産	9,618	流動負債	6,060	③
②	現金・現預金	8,198	買掛金	250	
	売掛金	500	1年内返済予定の固定負債	3,700	
	繰越税金資産	120	未払金等	1,300	
	棚卸資産	600	前受金	600	
	その他	200	預り金	10	
	有形固定資産	23,650	その他	200	
	土地	150	固定負債	83,050	
	建物	18,000	長期借入金	81,000	
	設備機器	5,000	その他	2,050	
	その他	500	純資産の部		
	無形固定資産・投資等	110,535	純資産	54,693	④
	施設利用権	10	資本金	37,000	
	電話加入権	5	資本余剰金	400	
	公共施設等運営権	110,000	利益余剰金	17,288	
	投資・その他	520	当期純利益	2,288	
			繰越利益余剰金	15,000	
			評価・換算差額等	5	
	資産合計	143,803	負債・純資産総額	143,803	⑤

自己資本比率（④÷⑤）＝0.38

当座比率（②÷③）　　＝1.44

流動比率（①÷③）　　＝1.59

付録Ｆ　運営権者の所有物に関する保険の設定方法

運営権者の所有物に関する保険の設定について，イベントリスクリストからの保険の設定に用いる数値の読み取り，並びに設定した支払限度及び免責とリスクカーブとの関係については，以下の通り（Ｆ県，標準ケースの例）.

■イベントリスクリストからの読み取り

No.	震源名	M	PBA (cm/s²)	発生確率／1年	超過確率／1年	90%非超過値 損失率	90%非超過値 現金・現預金	90%非超過値 流動比率
1	（130.45，33.55）	M7.0	521	0.00001	0.00001	0.20	−7,485	—
2	（130.55，33.55）	M7.0	484	0.00001	0.00001	0.17	−5,548	—
3	（130.45，33.65）	M7.0	472	0.00001	0.00002	0.16	−4,882	—
4	警固断層帯南東部	M7.2	465	0.00062	0.00064	0.16	−4,527	—
5	（130.45，33.55）	M6.5	454	0.00001	0.00066	0.15	−3,896	—
6	（130.55，33.65）	M7.0	446	0.00001	0.00066	0.15	−3,496	—
7	（130.35，33.55）	M7.0	422	0.00001	0.00067	0.13	−2,204	—
8	（130.55，33.55）	M6.5	393	0.00001	0.00068	0.11	−642	0.13
9	（130.45，33.45）	M7.0	383	0.00001	0.00069	0.10	−165	0.21
10	（130.35，33.65）	M7.0	383	0.00001	0.00070	0.10	−148	0.21
11	（130.45，33.55）	M6.0	368	0.00003	0.00072	0.09	625	0.34
12	（130.45，33.65）	M6.5	367	0.00001	0.00074	0.09	669	0.34
13	（130.55，33.45）	M7.0	360	0.00001	0.00075	0.09	1,011	0.40
14	（130.65，33.55）	M7.0	349	0.00001	0.00075	0.08	1,601	0.50
15	（130.65，33.65）	M7.0	323	0.00001	0.00076	0.07	2,843	0.70
16	（130.55，33.65）	M6.5	322	0.00001	0.00077	0.07	2,883	0.71
17	（130.35，33.45）	M7.0	319	0.00001	0.00078	0.07	3,014	0.73
18	（130.45，33.75）	M7.0	303	0.00001	0.00079	0.06	3,746	0.85
19	（130.35，33.55）	M6.5	295	0.00001	0.00080	0.05	4,096	0.91
20	（130.55，33.75）	M7.0	289	0.00001	0.00081	0.05	4,314	0.95
21	（130.55，33.55）	M6.0	285	0.00003	0.00083	0.05	4,481	0.97
22	西山断層帯	M7.3	282	0.00010	0.00093	0.05	4,623	1.00
23	（130.25，33.55）	M7.0	281	0.00001	0.00094	0.05	4,673	1.01
24	（130.65，33.45）	M7.0	278	0.00001	0.00094	0.05	4,763	1.02
25	（130.25，33.65）	M7.0	265	0.00001	0.00095	0.04	5,346	1.12
26	（130.35，33.75）	M7.0	264	0.00001	0.00096	0.04	5,386	1.12
27	（130.45，33.65）	M6.0	261	0.00003	0.00098	0.04	5,531	1.15
28	（130.45，33.55）	M5.5	261	0.00006	0.00104	0.04	5,560	1.15
29	（130.45，33.45）	M6.5	258	0.00001	0.00106	0.04	5,713	1.18
30	（130.35，33.65）	M6.5	258	0.00001	0.00107	0.04	5,728	1.18

②最悪地震の現金・現預金
＝−4,527 百万円

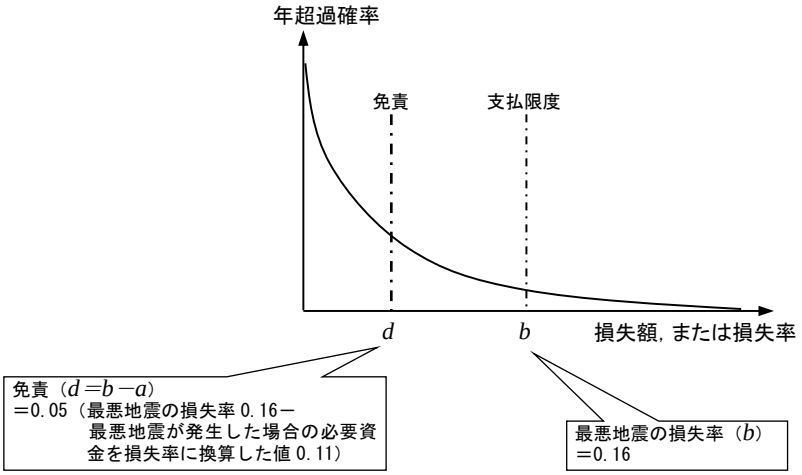
最悪地震が発生した場合の必要資金
（②−①）
＝8,623 百万円

最悪地震の損失率（b）
＝0.16

上記の必要資金を損失率に換算（a）
＝0.11（必要資金 8,623 百万円÷再調達価格 78,000 百万円）

①流動比率 0.9 前後の地震の現金・現預金
＝4,096 百万円

■設定した支払限度及び免責とリスクカーブとの関係



国土技術政策総合研究所研究報告
RESEARCH REPORT of NILIM
No. 55　　February 2015

編集・発行　©国土技術政策総合研究所

本資料の転載・複写のお問い合わせは
〒239-0826　神奈川県横須賀市長瀬3-1-1
管理調整部企画調整課　電話:046-844-5018