

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 5 月 31 日現在

機関番号：34416

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2019

課題番号：15K00039

研究課題名(和文) 高速シミュレーション技法を援用したリアルオプションの実用化に関する研究

研究課題名(英文) A study on practical application of real option approach by the use of a fast simulation technique

研究代表者

兼清 泰明 (Kanekiyo, Hiroaki)

関西大学・環境都市工学部・教授

研究者番号：90217068

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：リアルオプション問題を確率制御理論の形で定式化し、その最適解を数値的に導出するプロセスにおいて、確率測度変換に基づく重点サンプリング法を組み入れることにより高速数値解法における新しい枠組みの構築を行った。この主題に加えて、実用上重要となるいくつかの問題における確率モデルの新たな構築を行い、本研究での提案スキームとの組み合わせにリアルオプション問題の最適解を定量的に導出し得ることを明らかにした。

さらに、社会インフラの保守管理問題に応用し、その有効性を確認した。また、鋼構造物の接着補修問題、トンネルあるいは橋梁の保守管理問題、水源揚水井の保守管理問題などへの応用について考察を与えた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の意義は、近年非常に盛んに研究されているリスク数量化の新しい試みをリアルオプション問題に取り入れた際に生ずる数値計算上の困難さを克服する新たなアプローチを構築したことにある。巨大地震リスクなどの発生損失の極めて大きなリスク管理問題では代替的リスク移転(ART)が非常に重要な役割を演ずるが、超低頻度かつ超巨大損失型のARTでは極めて微小な生起確率の精度良い評価を実現し、かつ確率制御問題の数値的最適解を導出する必要があり、こういった問題に対して新たに極めて有効な数値解析アプローチを確立できたことは極めて意義深いと考えられる。

研究成果の概要(英文)：A new framework has been constructed for describing a real option approach by the use of the stochastic control theory, where an original fast Monte Carlo simulation technique based upon a mathematical procedure of probability measure transformation is incorporated for effectively reducing numerical efforts. In addition to our main subject, some probabilistic models have been newly developed in consideration of application to practical problems in order to apply to our framework, which can be expected to lead to wide applicability in related fields.

Further, in order to verify an applicability of our approach, it has been applied to a maintenance problem for infrastructures including ART (Alternative Risk Transfer) as a risk management technique. The result shows that an optimal solution of the problem can be obtained with high accuracy with effectively reduced computing efforts.

研究分野：応用確率論，リスク工学

キーワード：リアルオプション 確率制御理論 高速モンテカルロ法 重点サンプリング法 リスク工学 保守管理
シミュレーション工学

1. 研究開始当初の背景

近年様々な分野において、リスクを経済的手法の援用を含めた様々な手法を駆使して制御するアプローチが広く研究されるようになってきている。リアルオプションはそういったアプローチにおいて極めて重要な役割を演ずると期待されているが、本研究の開始当初においては多くの解決すべき問題が内包されていた。

たとえば、ベースとなる確率モデルが金融工学において用いられているモデルに限定されているなど金融工学の模倣的性格が強すぎる点、あるいは、最適性を判断するための評価関数として非常に古典的な期待コストなどがなお広く用いられている点などが散見され、解析的な解に固執するという風潮も手伝って、実情に合わない定式化が多く見られてきた。特に、代替的リスク移転 (Alternative Risk Transfer = ART) の重要性が近年ますます増してきているが、これを巨大リスクを対象とする問題に適用する際の超微小確率の高精度推定に対する解決策がほとんど議論されてこなかった。

本研究は、このような研究上の問題点を改善する必要性の上に企画遂行されたものである。

2. 研究の目的

1節で述べた関連研究分野の背景を基に、リアルオプションに関する理論的研究を根本的に見直し、対象とする実現象に即した数理モデル化と、リスク評価に関する近年の研究動向を取り入れて、真の実用化に向けた研究を主目的とする。具体的な指針は以下の通りである。

- 対象プロジェクトのダイナミクスを、期間内に想定される種々の不確実要因を考慮して、汎用性を高めた確率システムで記述し、オプションの行使を確率システムに対する「制御」と位置付け、確率制御理論を適用することにより、オプションの最適な行使時期・行使方法を理論的に導出することに主眼を置く。
- 対象現象のモデル化を根本的に見直す。すなわち、対象とする不確実な現象のダイナミクスを、Black-Scholes モデルやそのマイナー修正に依存しすぎている現状から大きく踏み出し、(a) 適用対象のシステムの特徴をフルにモデルに取り入れること、(b) システムの駆動雑音をレビイ過程を機軸に一般化し、拡散過程に限定されすぎている確率モデルを大きく変更すること、の2点を基軸とする。
- 本研究の基本指針は、対象とするシステムが巨大化・複雑化した場合にも対処し得ることであるので、当然解析的な導出は難しくなる。既存研究の大部分は解析的な導出に固執するために、モデルを解析に都合のよいものに限定することが多く、この分野の研究の実用面への応用性を遮断してしまっている。この現状を打破する。
- 近年のリスク解析では、より安全性を高めた指標を評価関数に採用する傾向があるが、この場合リスクに関連する事象の生起確率を直接算出する必要が生ずる。また、リスク解析にARTを導入した場合にも同様の問題が生ずる。特に、対象とする事象が巨大地震のように極めて大きなリスクを内包する場合は算出対象の生起確率が極めて微小となるため、数値解析に膨大な計算時間が必要となり、さらにこれを確率制御ベースのリアルオプション手法に組み入れる場合には従来手法では事実上計算が不可能となってしまふ。この問題を克服するために、研究代表者が提唱してきている高速シミュレーションスキームを効果的に活用し、全く新しい数値解法の枠組みを構築す

る。

3. 研究の方法

- 対象とするプロジェクト全体の時間変動を記述する確率モデルを構成する。ただし、インフラの経年劣化現象などもプロジェクトの対象とし、できるだけ広範囲の現象を対象とする。次に、このプロジェクトに関して行使可能なオプションを、「確率制御」の形で導入する。構成する確率モデルの駆動雑音はレヴィ過程にまで拡張し得るようにしておく。これは対象を金融資産に限定しないために必要となる重要な拡張である。このアプローチの雛型は、研究代表者の本研究申請時点までの研究において基礎を既に与えているため、これを拡張する。
- リスクに対する対処法を、工学的手段を駆使することによるリスクの直接的低減、保険や証券化を利用するART、そしてそれらの残存リスクに対するリスクの保有、の3種の組み合わせから構成し得るものと考え、直接的低減とARTを導入した確率制御の形でリアルオプションの枠組みを構成する。次に、評価関数を最適化するような「最適制御」を導出するための基本方程式(Hamilton-Jacobi-Bellman=HJB 方程式)を、確率制御理論を援用して導出する。ただし、基本となる確率システムを拡張しているため、既存研究とは異なり、導出を根本的に再検討する必要がある。
- 導出したHJB 方程式を、数値的に解くスキームの基本原理を構築する。ここで、拡張した評価関数への対応、特にARTを導入した枠組みに対応するために、提案した確率測度変換を用いた高速シミュレーションスキームをHJB数値解手順の繰り返し演算の中に取り込むという新しい数値解法を構築し、これに並列演算技法を併用してさらに高速化を目指す。さらに、この数値解法原理を計算機上の実装し、その有効性を検証する。
- 実用的な問題への応用検証を通じて、その有効性を確認することを目指す。具体的には、社会インフラの整備・長期間維持管理問題、信用リスクの最適管理問題を取り上げ、これらに本研究の理論および数値解法スキームの適用を行う。こういった応用事例の他にも、工学等において実用的に重要で、かつ本研究の基本アプローチを適用し得る事例については積極的に応用研究を執り行う。

4. 研究成果

(4-1) リアルオプションの実用化に向けた高速シミュレーション技法を取り入れた新しい数値解法スキームの構築

まず、リスクに対する対処法として、リスクの直接制御、リスク移転、リスク保有、の3種が可能な状況を想定し、リスクを内包する対象を確率モデルで記述したうえで、リアルオプション問題を連続時間スキーム上の確率制御問題の形で定式化した。ここで評価関数中にはリスクの直接低減操作で除去しきれなかったリスクを保険あるいは証券化により移転する所作に付随するコストが取り入れられている。このような手順を模式的に示したのが図1である。

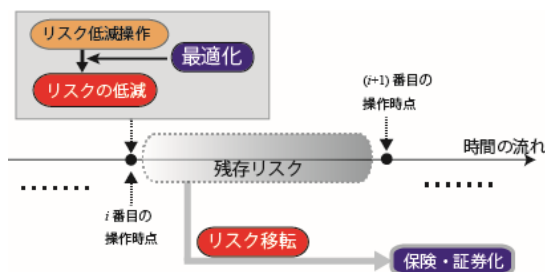


図1: リスク移転を考慮に入れたリアルオプションの構造

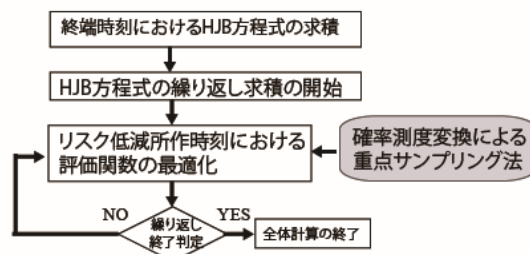


図2: 本研究における新しい数値解法スキームの概略

次に、確率制御理論を適用して最適制御を導くためのHJB方程式を導出し、評価関数の最適化操作が必要となる時点での評価関数の数値推定に、確率測度変換法による重点サンプリング法を取り入れた新しい数値解法スキームを構成した。この全体的な流れを図示したのが図2である。なお、このスキームに基づく数値計算においては、汎用並列コンピューティングアーキテクチャのCUDAを用いて計算全体に高速化を施した。

最後に、社会インフラの保守管理の重要な一例である寒冷地トンネル覆工コンクリートの劣化に対する保守管理問題に本提案手法を適用し、その有効性の検証を行った。ここで設定したモデルはレビイ過程が駆動する確率微分方程式をベースとしてある。具体的な数値結果は著作権の関係で発表論文（兼清他，“リスク最適制御の数値解法に対する重点サンプリング法の適用”，構造物の安全性と信頼性 Vol.9 (Proc. of JCROSSAR 2019) , pp.15-22) に譲るが、計算全体が大規模となるために繰り返し計算がかなり膨大となるものの、重点サンプリング法によるトンネル覆工コンクリートの破壊確率が非常に微小な場合の計算時間を劇的に短縮できることが功を奏し、パーソナルワークステーションレベルの計算マシンで十分に計算し得ることが確認できた。従来法では微小な破壊確率の数値推定を1回行うのにかなりの計算量が必要で、さらにそれが全体の繰り返し計算の中で多数回必要となるため、事実上数値計算が困難であったものを解析可能とできた点で実用的意義が極めて大きいと考えられる。

(4-2) リアルオプションの実用化に向けた確率モデルの構築に関する研究

本研究のアプローチには、リアルオプション手法を適用する対象の時間変動挙動を記述する確率モデルの構築が必須である。この観点からの研究成果の主なものを以下に列挙する。

- 寒冷地におけるトンネル覆工コンクリートの劣化に対する最適保守方策を論じるための損傷度時間不規則成長モデルを構築した。本モデルはレビイ過程が駆動する確率微分方程式をベースとするものであるが、劣化の時間進展データに2つの劣化特性が混在している点に着目した改良モデルを構築し、損傷度の確率分布のテイル特性を極めて精度よく推定し得ることを示すことができた。
- トンネル劣化問題と類似の手法を用いて橋梁の健全度の不規則低下を記述する確率モデルを新たに構築し、橋梁の最適保守方策を見出すための確率制御問題に適用し得ることを確認した。
- インフラ構造物の強度劣化を防ぎ長寿命化を計る手法として近年注目されている繊維強化複合材を用いた接着補修問題について、接着部の剥離発生のみを記述する確率モデルを提案した。また、このモデルに対する数値シミュレーションを行う上で数

値スキームの不安定性が生じることを明らかとし，多倍長精度計算手法の適用によりその困難さを克服し得ることを明らかとした．

- 原材料そのものの加工と，そのアッセンブリーによる製品組み立てが共存するような大規模生産母体における在庫管理の最適制御を対象として，レヴィ過程を用いた新しい在庫モデルの構築と，本研究の骨格をなす確率制御ベースのリアルオプションアプローチによる最適な在庫管理問題の考察を行い，本研究のアプローチがこのような対象にも有効であることを明らかとした．
- 水源揚水井の長期使用における劣化データが非常に大きいばらつきを示す点に着目して，レヴィ過程が駆動する確率微分方程式をベースとした新たな確率モデルを構築した．さらにリアルオプション手法の適用による揚水井の保守管理問題に本提案モデルを適用し得ることを理論的に明らかとした．

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計17件（うち査読付論文 10件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 兼清泰明, 東 平蔵, 檀 寛成, 須藤敦史, 丸山 収, 佐藤 京	4. 巻 巻設定なし
2. 論文標題 リスク最適制御の数値解法に対する重点サンプリング法の適用	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 構造物の安全性と信頼性 Vol.9 (Proc. of JCOSSAR 2019)	6. 最初と最後の頁 15-22
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 兼清泰明, 斎藤慎一	4. 巻 巻設定なし
2. 論文標題 都市機能健全度に基づく災害復興モデルの構築とその防災復興計画への応用	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 構造物の安全性と信頼性 Vol.9 (Proc. of JCOSSAR 2019)	6. 最初と最後の頁 103 - 110
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 兼清泰明, 楠見晴重, 久保潤平	4. 巻 巻設定なし
2. 論文標題 確率制御理論を援用した水源揚水井の最適洗浄方策に関する考察	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 土木学会第74回年次学術講演会講演概要集	6. 最初と最後の頁 論文番号VI-835
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 兼清泰明, 笠行健介, 石川敏之	4. 巻 75
2. 論文標題 接着剤の弾性特性の空間的ばらつきを考慮したCFRP板接着鋼板の確率論的解析	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 土木学会論文集, A2 (応用力学)	6. 最初と最後の頁 I_31-I_40
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.2208/jscejam.75.2_I_31	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 笠行健介, 兼清泰明, 石川敏之, 檀 寛成	4. 巻 74
2. 論文標題 多倍長精度計算を用いたCFRP接着鋼部材の数値解析	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 土木学会論文集 A2 (応用力学)	6. 最初と最後の頁 I_23-I_31
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hiroaki T.-Knaekiyo and Shinjiro Agata	4. 巻 13
2. 論文標題 Optimal control in an inventory management problem considering replenishment lead time based upon a non-diffusive stochastic differential equation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 J. of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing (JAMDSM)	6. 最初と最後の頁 JAMDSM0008
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 兼清 泰明, 笠行健介, 石川敏之, 檀 寛成	4. 巻 巻設定なし
2. 論文標題 多倍長精度計算を用いたCFRP 接着鋼部材の数値解析	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 第21回応用力学シンポジウム講演概要集	6. 最初と最後の頁 39-40
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 兼清 泰明, 笠行健介, 石川敏之, 檀 寛成	4. 巻 巻設定なし
2. 論文標題 CFRP板接着補修の数値解析に対する多倍長精度計算の適用	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 土木学会第73回年次学術講演会講演概要集	6. 最初と最後の頁 885-886
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 兼清泰明, 笠行健介, 石川敏之, 檀 寛成	4. 巻 巻設定なし
2. 論文標題 構造解析における多倍長精度計算の応用に関する考察	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本機械学会2018年度年次大会講演論文集 (CD-ROM)	6. 最初と最後の頁 論文番号G1000304
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 兼清泰明, 笠行健介, 石川敏之	4. 巻 73
2. 論文標題 空間変動型確率微分方程式を用いた CFRP板接着補修における不規則性解析	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 土木学会論文集 A2(応用力学)	6. 最初と最後の頁 I_11-I_22
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 H. T.-Kanekiyo, O. Maruyama, A. Sutoh, T. Satoh and H. Dan	4. 巻 巻設定なし
2. 論文標題 Random Deterioration Model for Bridge Integrity and Its Application to Optimal Maintenance Scheduling	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Safety, Reliability, Risk, Resilience and Sustainability of Structures and Infrastructure (Proc. of ICOSSAR 2017)	6. 最初と最後の頁 1019-1028
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 貴村祥光, 兼清泰明, 丸山 収, 須藤敦史, 佐藤 京, 檀 寛成	4. 巻 巻設定なし
2. 論文標題 橋梁の不規則劣化を記述する新しい確率モデルの提案	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 第30回記念信頼性シンポジウム講演論文集	6. 最初と最後の頁 43-48
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 兼清 泰明, 丸山収, 須藤敦史, 佐藤京	4. 巻 65
2. 論文標題 寒冷地トンネル覆工コンクリートの損傷度確率分布のテイル特性に関する考察	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 材料	6. 最初と最後の頁 275-281
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 高藤慎一, 兼清泰明, 丸山収, 須藤敦史, 佐藤京	4. 巻 -
2. 論文標題 寒冷地トンネル覆工コンクリートの劣化進行に対する保守方策--点検スケジュールの最適化に関する理論的考察--	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 第29回信頼性シンポジウム講演論文集	6. 最初と最後の頁 26-31
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 S. Saitoh and H. T.-Kanekiyo	4. 巻 No. 59
2. 論文標題 Pricing of a Weather Derivative for a Temperature Index Using Heating Degree Days	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Science and Technology Reports of Kansai University	6. 最初と最後の頁 101-110
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 兼清泰明	4. 巻 -
2. 論文標題 信頼性解析における確率分布裾野の特殊挙動について	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 日本材料学会第65期学術講演会講演論文集	6. 最初と最後の頁 183-184
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 兼清 泰明, 斎藤慎一, 丸山 収, 須藤 敦, 佐藤 京	4. 巻 8
2. 論文標題 地震デリバティブを援用したリスク移転方策の最適化に関する考察	5. 発行年 2015年
3. 雑誌名 構造物の安全性と信頼性 Vol.8 (Proc. of JCOSSAR 2015)	6. 最初と最後の頁 53-60
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計12件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 東 平蔵
2. 発表標題 リスク最適制御の数値解法に対する重点サンプリング法の適用
3. 学会等名 構造物の安全性と信頼性に関する国内シンポジウム(JCOSSAR 2019)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 兼清泰明
2. 発表標題 都市機能健全度に基づく災害復興モデルの構築とその防災復興計画への応用
3. 学会等名 構造物の安全性と信頼性に関する国内シンポジウム(JCOSSAR 2019)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 兼清 泰明
2. 発表標題 確率制御理論を援用した水源揚水井の最適洗浄方策に関する考察
3. 学会等名 土木学会第74回年次学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 笠行健介
2. 発表標題 多倍長精度計算を用いたCFRP 接着鋼部材の数値解析
3. 学会等名 第21回応用力学シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 兼清 泰明
2. 発表標題 CFRP板接着補修の数値解析に対する多倍長精度計算の適用
3. 学会等名 土木学会第73回年次学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 兼清 泰明
2. 発表標題 構造解析における多倍長精度計算の応用に関する考察
3. 学会等名 日本機械学会2018年度年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 兼清泰明, 笠行健介, 石川敏之
2. 発表標題 空間変動型確率微分方程式を用いたCFRP板接着補修における不規則性解析
3. 学会等名 土木学会第20回応用力学シンポジウム
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 兼清泰明, 笠行健介, 石川敏之
2. 発表標題 CFRP 板接着補修における不規則性の確率論的解析
3. 学会等名 土木学会第72回年次学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 貴村祥光, 兼清泰明, 丸山 収, 須藤敦史, 佐藤 京, 檀 寛成
2. 発表標題 橋梁の不規則劣化を記述する新しい確率モデルの提案
3. 学会等名 第30回記念信頼性シンポジウム(日本材料学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 兼清泰明
2. 発表標題 信頼性解析における確率分布裾の特殊挙動について
3. 学会等名 日本材料学会第65期講演会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 斎藤慎一
2. 発表標題 寒冷地トンネル覆工コンクリートの劣化進行に対する保守方策--点検スケジュールの最適化に関する理論的考察--
3. 学会等名 第29回信頼性シンポジウム
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 斎藤慎一
2. 発表標題 地震デリバティブを援用したリスク移転方策の最適化に関する考察
3. 学会等名 第8回構造物の安全性と信頼性に関する国内シンポジウム
4. 発表年 2015年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----