#### 研究成果報告書 科学研究費助成事業



今和 6 年 4 月 5 日現在

機関番号: 12601

研究種目: 研究活動スタート支援

研究期間: 2020~2023 課題番号: 20K22301

研究課題名(和文)確率数値手法の実装理論構築

研究課題名(英文)Theory and implementation of probabilistic numerical methods

#### 研究代表者

河合 玲一郎 (Kawai, Reiichiro)

東京大学・大学院総合文化研究科・教授

研究者番号:20464258

交付決定額(研究期間全体):(直接経費) 1,300,000円

研究成果の概要(和文):確率モデルにおける計算資源の最適執行や反復計算の最適停止といった実装レベルにおいて必要不可欠な諸問題に主眼を置き、多岐に渡る確率数値解析の基盤理論構築、収束誤差解析、そして計算速度向上を目指した。研究内容は、モデルや問題設定に依存しない確率数値手法と、モデルベースもしくは問題設定毎の確率数値手法に分類される。その両体系において、モンテカルロ法、分散減少法、確率的勾配降下法、無限分解可能分布、マルチンゲール理論、マリアバン解析といった理論に基づいて、研究期間を通じて多大な成果をあげることができ、論文20編が査読付き国際専門誌において採択に至った。

研究成果の学術的意義や社会的意義 実用レベルで求められる確率モデルは年々際限なく大規模かつ複雑になり、数値計算に頼らざるを得ない問題設定が大多数を占めるにいたり、数値手法の効果的な実装理論、収束保証、誤差評価の需要は恒久的に高まっていた。本研究から得られた多岐に渡る確率数値解析の基盤理論構築、収束誤差解析、そして計算速度向上は、自然科学や社会科学のあらゆる分野で用いられる確率モデルにおける計算資源の最適執行や反復計算の最適停止といった実装レベルにおいて必要不可欠な諸問題に対して、大きく、また普遍的に寄与できると考えている。

研究成果の概要(英文):The focus centered on essential issues of stochastic models in numerical implementation, such as optimal execution of computational resources and optimal termination of iterative calculations. Specifically, the research aimed at establishing the foundational theory of probabilistic numerical analysis, convergence error analysis, and enhancing computational speed. The research content can be classified into two categories: probabilistic numerical methods independent of the model or problem setting, and those tailored to specific model based or problem setting specific approaches. Significant achievements were made in both realms throughout the research period based on theories such as Monte Carlo methods, variance reduction methods, stochastic gradient descent methods, infinitely divisible distributions, martingale theory, and Malliavin ănalysis. As a consequence, 20 articles were published in established peer-reviewed international journals.

研究分野: 確率数値解析

キーワード: 確率数値解析 確率過程 モンテカルロ法 統計力学 機械学習

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等に ついては、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 1.研究開始当初の背景

現実の世界で観察される諸現象を表現、解析、さらに将来予測等のために、数理モデル、特に確率要素の表現を目指した確率モデルが自然科学や社会科学のあらゆる分野で用いられる。そして、実用レベルで求められる確率モデルは年々際限なく大規模かつ複雑になり、数値計算に頼らざるを得ない問題設定が大多数を占めるに至った。それらの数値手法の効果的な実装理論、収束保証、誤差評価の需要はこれまで以上に高まっており、さらにいえば、今後も恒久的に高まり続けることは明らかであった。

### 2.研究の目的

数理モデル、特に確率要素の表現を目指した確率モデルにおける数値手法の開発とその理論分析が研究の主目的となる。具体的には、計算資源の最適執行や反復計算の最適停止といった実装レベルにおいて必要不可欠な諸問題に主眼を置き、その過程で多岐に渡る確率数値解析の基盤理論構築、収束誤差解析、そして計算速度向上を目指した。

# 3.研究の方法

自身の先行業績にて、問題設定に依存しない重点サンプリングや制御変量法をパラメトリックに構築し、収束保証下で分散が逐次減少されるモンテカルロ法の理論体系を確立した。本研究では、さらにそれらの実装を主眼に置いた理論発展を目指す。要求される専門知識という視点からは、たとえば無限分解可能分布、マリアバン解析といった極めて高度で厳密な確率論に基づいて数値手法の実装理論を構築することになり、典型的な実証研究とは一線を画す。

- (1) 計算コストを下げるために、分散減少法に関わるパラメータ探索は反復毎でなくバッチ処理で十分でないかという発想のもとに、本研究ではパラメータ探索の最適なタイミングやバッチサイズの理論構築を目指す。実装レベルでは反復を有限回数で停止せざるを得ないため、できる限り漸近手法に頼らない理論構築を目指す。
- (2) たとえば金融実務において日常的に適用される層化抽出法を先行業績の理論体系に加えることで、さらなる実用性向上を目指す。特に、分散が逐次減少されていく状況下で各層への動的予算最適分配スキームを理論的に導出する。
- (3) モンテカルロ法の骨格をなす中心極限定理はあくまで収束定理であり、厳密な誤差評価に直接用いることはできない。したがって、モンテカルロ法を実際いつ反復計算を停止すべきであるかという議論はほとんどなされてこなかった。ここでは、分散逐次減少型モンテカルロ推定における反復計算停止理論の構築を目指す。
- (4) 確定"ベクトル"を確率"ベクトル"の次元毎平均にて推定するベクトル版モンテカルロ法が存在する。最近の好例として、確率偏微分方程式の複数点を同時にモンテカルロ推定するという問題が挙げられる。ここでは、ベクトル版モンテカルロ法の分散減少法や反復計算停止理論の構築を目指す。
- (5) 単体上で定義される積分の数値計算は非常に重要かつ、難解な問題であることが知られている。この積分をモンテカルロ積分である解釈した上で、そのディリクレ分布内での測度変換を施せば効果的な重点サンプリングが可能であることを研究期間直前に発見した。ここから研究課題(1)-(3)のアイデアを導入することで、計算効率向上、そして現実的な実装を目指す。

# 4. 研究成果

研究開始当初は、「研究活動スタート支援」という枠組みの性質上、研究期間は一年半と極めて短かった。ところが新型コロナウィルス感染症の影響で共同研究者を訪問することがかなわなかったこともあり、研究期間が三年半へと延長となったおかげで、当初の想定よりもかなり多くの研究成果があげることができた。具体的には、対象期間中に理論的な成果、さらにそれらの応用結果も含め、関連研究論文 20 編が査読付き国際専門誌において採択に至った。

- (1) 分散減少法のパラメータ探索を反復毎でなくバッチ処理にて行なうアルゴリズムをできる限り一般体系的に構築し、総サンプル数とバッチサイズの関係を理論的に導出することに成功した。一連の成果は、ACM Transaction on Modeling and Simulation をはじめとする査読付き国際論文誌にて研究論文として掲載された。
- (2) モンテカルロ法のサンプル空間を層化した上で、さらに各層に重点サンプリング法と制御変量法を適用し、各層分散が逐次減少されていく状況下で、計算予算の動的最適分配スキームを理論的に導出することに成功した。一連の理論成果は、SIAM Journal on Scientific Computingをはじめとする国際論文誌にて掲載され、特に構造信頼工学分野における応用論文としてStructural Reliabilityをはじめとする査読付き国際論文誌にて掲載された。
- (3) 分散逐次減少型モンテカルロ推定における反復計算停止理論の構築には、マルチンゲール中心極限定理の Berry-Esseen を適用することを当然想定していたが、Berry-Esseen の既存結果は反復計算停止理論構築の文脈で要求されるレベルには達していない。これは今後の研究課題である。
- (4) ベクトル版モンテカルロ法において、分散減少法(具体的には、重点サンプリング法、制御変量法、層化抽出法)を適用する枠組みを開発した上で、そのパラメータ探索と最適停止の性質を明らかにすることに成功した。現在、一連の成果を複数の研究論文としてまとめている。さらに、ベクトル版かつ上記(3)のような分散逐次減少型に同時に対処するには、少なくとも多次元マルチンゲール中心極限定理の Berry-Essen が必要となるが、現時点では技術的に実装レベルには程遠く、今後の課題である。
- (5) 単体上で定義される積分計算をディリクレ分布内での測度変換を施したモンテカルロ法にて行う際に、パラメータ探索や最適停止の観点から計算効率を大幅に向上させることに成功した。一連の成果は、研究論文として Journal of Scientific Computing をはじめとする査読付き国際論文誌にて掲載された。
- (6) 最後に、反復計算停止理論構築の成否については、すでに述べたとおり中心極限定理の Berry-Esseen の精度に依存するところが大きく、現時点では実装レベルにおいて有効な状態 に昇華できていない。したがって、当該 Berry-Esseen 理論の改善も視野に入れて、今後の研究を行っていきたい。

# 5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計20件(うち査読付論文 20件/うち国際共著 18件/うちオープンアクセス 2件)

1. 著者名 Be Yue, Kasai Relichiro  2. 論文標題 Super- and subdiffusive positions in fractional Klein-Kramers equations  5. 飛行年 2022年  3. 確認名 Fhysica A: Statistical Mechanics and its Applications  6. 最初と最後の頁 128570 - 128570  - 28570 - 128570  - 2850 有無  7 - ブンアクセス  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  1. 著者名 Be Yue, Kasai Relichiro  2. 論文標題 Raman do plynomial bounds for ruin-related quantities in risk theory  3. 確認名 European Journal of Operational Research  2. 論文程題 Raman (デジタルオプジェクト識別子) 10.1016/j.ejor.2022.01.040  オープンアクセス  オープンアクセス  オープンアクセス  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  1. 著者名 2. 論文程題 Iterative Reak Approximation and Hard Bounds for Saitching Diffusion  3. 確認名 3. 確認名 3. 確認名 5. 発行年 2023年  1. 著者名 2. 論文程題 1. 表者名 2. 論文程題 1. 表者名 3. 確認名 5. 発行年 2023年  3. 確認名 5. 発行年 2023年  3. 確認名 5. 発行年 2023年  4. 差 2023年  3. 確認名 5. 発行年 2023年  4. 差 2023年  3. 確認名 2. 論文程題 2. 論文程題 2. 論文程題 2. 論文程題 2. 論文程題 2. 論文程題 3. 確認名 3. 確認名 3. 確認名 5. 発行年 2023年  4. 差 2. 論文程題 2. 論文程題 3. 確認名 3. 確認名 4. 差 3. 確認名 5. 発行年 2023年  4. 差 3. 確認名 5. 発行年 2023年  4. 差 3. 確認名 5. 発行年 2023年  3. 確認名 5. 無行子 2023年  4. 差 3. 確認名 5. 無行子 2023年  3. 確認名 5. 無行子 2023年  3. 確認名 5. 無行子 2023年  4. 差 3. 確認名 5. 無行子 2023年  4. 差 3. 確認名 5. 無行子 2023年  3. 確認名 5. 無行子 2023年  4. 差 2	〔雑誌論文〕 計20件(うち査読付論文 20件/うち国際共著 18件/うちオーブンアクセス 2件)	)
1	1 . 著者名	4
2. 論文標題 Super- and subdiffusive positions in fractional Klein-Kramers equations 3. 雑誌名 Physica A: Statistical Mechanics and its Applications 1.88570~128570 1.88632	—	_
Super- and subdiffusive positions in fractional Klein-Kramers equations   2022年   128570 - 128570 - 128570   128570 - 128570 - 128570   128570 - 128570	ne rue, Nawar Nerromro	300
Super- and subdiffusive positions in fractional Klein-Kramers equations   2022年   128570 - 128570 - 128570   128570 - 128570 - 128570   128570 - 128570	- AA NEW	- 7v /- /-
3. 熱誌名 Physica A: Statistical Mechanics and its Applications  6. 最初と最後の頁 126570 - 126570  月報論文の001 (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physa.2021.126570  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  1. 著名名 ie Yue, Kawai Reiichiro 2. 論文標題 Moment and polynomial bounds for ruin-related quantities in risk theory 3. 雑誌名 European Journal of Operational Research 2. 論文標題 10.1016/j.ejor.2022.01.040 2. 神スプンアクセス 3. 雑誌名 2. 神スプンアクセス 3. 雑誌名 2. 神スプンアクセス 3. 雑誌名 2. 神スプンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難  1. 著名名 3. 雑誌名 3. 雑誌名 1. 著名名 3. 雑誌名 1. 著名名 3. 雑誌名 1. 通名名 2. 神文理题 1 terative Weak Approximation and Hard Bounds for Switching Diffusion 3. 雑誌名 1. 通名名 1. 近日の7月15日また 4. 登 3. 雑誌名 5. 発行年 2023年 4. プンアクセス 1003 - 1036 1	2.論文標題	5.発行年
3 ・熱話名     Physica A: Statistical Mechanics and its Applications	Super- and subdiffusive positions in fractional Klein-Kramers equations	2022年
Physica A: Statistical Mechanics and its Applications   126570 - 126570 - 126570   126570 - 126570 - 126570   126570 - 126570 - 126570   126570 - 126570		
Physica A: Statistical Mechanics and its Applications   126570 - 126570 - 126570   126570 - 126570 - 126570   126570 - 126570 - 126570   126570 - 126570	2. 株社夕	6 是知と是後の百
接載論文のDOI(デジタルオプジェクト識別子)		
1. 1016/j.physa.2021.126570   有	Physica A: Statistical Mechanics and its Applications	126570 ~ 126570
1. 1016/j.physa.2021.126570   有		
1. 1016/j.physa.2021.126570   有		
1. 1016/j.physa.2021.126570   有	掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子)	査読の有無
1 . 著名名		
### 1 - 第名名   1 - 著名名   1 - 著名名   1 - 著名名   1 -	10.1010/ J. physa.2021.1203/0	[
### 1 - 第名名   1 - 著名名   1 - 著名名   1 - 著名名   1 -		E Charles
1 . 著名名 He Yue, Kawai Reiichiro 2 . 論文標題 Moment and polynonial bounds for ruin-related quantities in risk theory 3. 雑誌名 European Journal of Operational Research 3. 雑誌名 European Journal of Operational Research 超議論文のDOI (デジタルオブジェクト護別子) 10.1016/j.ejor.2022.01.040 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  1 . 著名名 Qiu Qinjing, Kawai Reiichiro 2 . 論文標題 Herative Weak Approximation and Hard Bounds for Switching Diffusion 3. 雑誌名 Journal of Theoretical Probability  相類論文のDOI (デジタルオプジェクト護別子) 10.1007/s10959-022-01185-x  オープンアクセス 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  1 . 著名名 Song Chenxiao、Kawai Reiichiro 2 . 論文標題 Adaptive stratified sampling for structural reliability analysis 3 . 雑誌名 Structural Safety  在 . 是 2023年  2 . 論文標題 Adaptive stratified sampling for structural reliability analysis 3 . 雑誌名 Structural Safety		· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
1 . 著名名 He Yue, Kawai Reiichiro 2 . 論文標題 Moment and polynonial bounds for ruin-related quantities in risk theory 3. 雑誌名 European Journal of Operational Research 3. 雑誌名 European Journal of Operational Research 超議論文のDOI (デジタルオブジェクト護別子) 10.1016/j.ejor.2022.01.040 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  1 . 著名名 Qiu Qinjing, Kawai Reiichiro 2 . 論文標題 Herative Weak Approximation and Hard Bounds for Switching Diffusion 3. 雑誌名 Journal of Theoretical Probability  相類論文のDOI (デジタルオプジェクト護別子) 10.1007/s10959-022-01185-x  オープンアクセス 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  1 . 著名名 Song Chenxiao、Kawai Reiichiro 2 . 論文標題 Adaptive stratified sampling for structural reliability analysis 3 . 雑誌名 Structural Safety  在 . 是 2023年  2 . 論文標題 Adaptive stratified sampling for structural reliability analysis 3 . 雑誌名 Structural Safety	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	該当する
### Yue, Kawai Relichiro 302  2 . 論文標題		
### Yue, Kawai Relichiro 302  2 . 論文標題	1	1 4 <del>*</del>
2 . 論文標題		_
Moment and polynomial bounds for ruin-related quantities in risk theory 2022年 3. 雑誌名	He Yue、Kawai Reiichiro	302
Moment and polynomial bounds for ruin-related quantities in risk theory 2022年 3. 雑誌名		
Moment and polynomial bounds for ruin-related quantities in risk theory 2022年 3. 雑誌名	2.論文標題	5 . 発行年
3 . 雑誌名 European Journal of Operational Research 1255~1271		
European Journal of Operational Research	woment and polynomial bounds for runn-related quantities in risk theory	20224
European Journal of Operational Research		
掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子) 1. 著者名 Qiu Qinjing, Kawai Reiichiro 2. 論文標題 Hatilata Care Toron		6.最初と最後の頁
掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子) 1. 著者名 Qiu Qinjing, Kawai Reiichiro 2. 論文標題 Hatilata Care Toron	European Journal of Operational Research	
10.1016/j.ejor.2022.01.040 有 国際共著 該当する  1.著者名 Qiu Qinjing, Kawai Reiichiro	zaropour de operational notation	
10.1016/j.ejor.2022.01.040 有 国際共著 該当する  1.著者名 Qiu Qinjing, Kawai Reiichiro		
10.1016/j.ejor.2022.01.040 有 国際共著 該当する  1.著者名 Qiu Qinjing, Kawai Reiichiro		本註の左征
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 該当する  1 . 著者名 Qiu Qinjing, Kawai Reiichiro 36  2 . 論文標題 Iterative Weak Approximation and Hard Bounds for Switching Diffusion 2023年  3 . 雑誌名 Journal of Theoretical Probability 6 . 最初と最後の頁 1003~1036  掲載論文のDOI (デジタルオプジェクト識別子) 6 . 最初の有無 7 . 本ープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 7 . ま者名 Song Chenxiao、 Kawai Reiichiro 10 . まずにはいいます。 10 . まずにはいいます。 2 . 最初を構題 4 . 巻 101  2 . 論文標題 7 . 発行年 2023年  3 . 雑誌名 5 . 発行年 2023年  3 . 雑誌名 5 . 発行年 2023年  3 . 雑誌名 5 . 発行年 2023年  3 . 雑誌名 6 . 最初と最後の頁 102292~102292  掲載論文のDOI (デジタルオプジェクト識別子) 6 . 最初と最後の頁 102292~102292		貧読の有無
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   該当する   1 . 著者名   2 . 論文標題   1 . 著者名   2 . 記文標題   5 . 発行年   2023年   3 . 雑誌名   3 . 雑誌名   3 . 4 . 2   2 . 記文序の	10.1016/j.ejor.2022.01.040	有
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   該当する   1 . 著者名   2 . 論文標題   1 . 著者名   2 . 記文標題   5 . 発行年   2023年   3 . 雑誌名   3 . 雑誌名   3 . 4 . 2   2 . 記文序の	• •	
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   該当する   1 . 著者名   2 . 論文標題   1 . 著者名   2 . 記文標題   5 . 発行年   2023年   3 . 雑誌名   3 . 雑誌名   3 . 4 . 2   2 . 記文序の	オープンアクセス	国際共著
1 . 著者名 Qiu Qinjing, Kawai Reiichiro       4 . 巻 36         2 . 論文標題 Iterative Weak Approximation and Hard Bounds for Switching Diffusion       5 . 飛行年 2023年         3 . 雑誌名 Journal of Theoretical Probability       6 . 最初と最後の頁 1003 ~ 1036         掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10959-022-01185-x       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 該当する         1 . 著者名 Song Chenxiao、Kawai Reiichiro       4 . 巻 101         2 . 論文標題 Adaptive stratified sampling for structural reliability analysis       5 . 飛行年 2023年         3 . 雑誌名 Structural Safety       6 . 最初と最後の頁 102292 ~ 102292         掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.strusafe.2022.102292       査読の有無 有		
Qiu Qinjing、Kawai Reiichiro  2 . 論文標題 Iterative Weak Approximation and Hard Bounds for Switching Diffusion  3 . 雑誌名 Journal of Theoretical Probability  6 . 最初と最後の頁 1003~1036  掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10959-022-01185-x  カープンアクセス  本・プンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難  1 . 著者名 Song Chenxiao、Kawai Reiichiro  2 . 論文標題 Adaptive stratified sampling for structural reliability analysis  3 . 雑誌名 Structural Safety  5 . 発行年 2023年  6 . 最初と最後の頁 102292~102292	オーノンアグセスとはない、文はオーノンアグセスが困難	該当りる
Qiu Qinjing、Kawai Reiichiro  2 . 論文標題 Iterative Weak Approximation and Hard Bounds for Switching Diffusion  3 . 雑誌名 Journal of Theoretical Probability  6 . 最初と最後の頁 1003~1036  掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10959-022-01185-x  カープンアクセス  本・プンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難  1 . 著者名 Song Chenxiao、Kawai Reiichiro  2 . 論文標題 Adaptive stratified sampling for structural reliability analysis  3 . 雑誌名 Structural Safety  5 . 発行年 2023年  6 . 最初と最後の頁 102292~102292		
2. 論文標題 Iterative Weak Approximation and Hard Bounds for Switching Diffusion  3. 雑誌名 Journal of Theoretical Probability  6. 最初と最後の頁 1003~1036  掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10959-022-01185-x  国際共著 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  1. 著者名 Song Chenxiao、Kawai Reiichiro  2. 論文標題 Adaptive stratified sampling for structural reliability analysis  3. 雑誌名 Structural Safety  5. 発行年 2023年  4. 巻 101  5. 発行年 2023年  6. 最初と最後の頁 101  6. 最初と最後の頁 102292~102292	1.著者名	4.巻
2 . 論文標題 Iterative Weak Approximation and Hard Bounds for Switching Diffusion       5 . 発行年 2023年         3 . 雜誌名 Journal of Theoretical Probability       6 . 最初と最後の頁 1003~1036         掲載論文のDOI (デジタルオプジェクト識別子) 10.1007/s10959-022-01185-x       査読の有無         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 該当する         1 . 著者名 Song Chenxiao、Kawai Reiichiro       4 . 巻 101         2 . 論文標題 Adaptive stratified sampling for structural reliability analysis       5 . 発行年 2023年         3 . 雑誌名 Structural Safety       6 . 最初と最後の頁 102292~102292         掲載論文のDOI (デジタルオプジェクト識別子) 10.1016/j.strusafe.2022.102292       査読の有無 有	Qiu Qiniing. Kawai Reiichiro	36
Iterative Weak Approximation and Hard Bounds for Switching Diffusion 2023年   2023年   3 . 雑誌名	ara arrijinga namar norromro	
Iterative Weak Approximation and Hard Bounds for Switching Diffusion 2023年   2023年   3 . 雑誌名	2	F 整体
3 . 雑誌名		
Journal of Theoretical Probability	Iterative Weak Approximation and Hard Bounds for Switching Diffusion	2023年
Journal of Theoretical Probability		
Journal of Theoretical Probability	3. 雑誌名	6 最初と最後の百
掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10959-022-01185-x 有 オープンアクセス  国際共著  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  1. 著者名 Song Chenxiao、Kawai Reiichiro 2. 論文標題 Adaptive stratified sampling for structural reliability analysis  3. 雑誌名 Structural Safety  超載論文のDOI(デジタルオプジェクト識別子) 10.1016/j.strusafe.2022.102292  直読の有無 有		
10.1007/s10959-022-01185-x 有 国際共著	Journal of Theoretical Frobability	1003 ~ 1036
10.1007/s10959-022-01185-x 有 国際共著		
10.1007/s10959-022-01185-x 有 国際共著		
10.1007/s10959-022-01185-x 有 国際共著	掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子)	査読の有無
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 該当する  1 . 著者名 Song Chenxiao、Kawai Reiichiro		有
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 該当する  1.著者名 Song Chenxiao、Kawai Reiichiro		[ F
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 該当する  1.著者名 Song Chenxiao、Kawai Reiichiro	ナープンマクセフ	国際共革
1 . 著者名 Song Chenxiao、Kawai Reiichiro  2 . 論文標題 Adaptive stratified sampling for structural reliability analysis  3 . 雑誌名 Structural Safety  5 . 発行年 2023年  6 . 最初と最後の頁 102292~102292  掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.strusafe.2022.102292		
Song Chenxiao、Kawai Reiichiro 101  2 . 論文標題 Adaptive stratified sampling for structural reliability analysis 5 . 発行年 2023年  3 . 雑誌名 Structural Safety 6 . 最初と最後の頁 102292~102292  掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子) 査読の有無 有	オーフンアクセスではない、又はオーフンアクセスが困難	該当する
Song Chenxiao、Kawai Reiichiro 101  2 . 論文標題 Adaptive stratified sampling for structural reliability analysis 5 . 発行年 2023年  3 . 雑誌名 Structural Safety 6 . 最初と最後の頁 102292~102292  掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子) 査読の有無 有		
Song Chenxiao、Kawai Reiichiro 101  2 . 論文標題 Adaptive stratified sampling for structural reliability analysis 5 . 発行年 2023年  3 . 雑誌名 Structural Safety 6 . 最初と最後の頁 102292~102292  掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子) 査読の有無 有	1.著者名	4 . 巻
2.論文標題 Adaptive stratified sampling for structural reliability analysis5.発行年 2023年3.雑誌名 Structural Safety6.最初と最後の頁 102292~102292掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.strusafe.2022.102292査読の有無 有		_
Adaptive stratified sampling for structural reliability analysis 2023年  3 . 雑誌名 Structural Safety 6 . 最初と最後の頁 102292~102292  掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子) 査読の有無 10.1016/j.strusafe.2022.102292	Sung Chematau, nawat retruittu	101
Adaptive stratified sampling for structural reliability analysis 2023年  3 . 雑誌名 Structural Safety 6 . 最初と最後の頁 102292~102292  掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子) 査読の有無 10.1016/j.strusafe.2022.102292		
3.雑誌名       6.最初と最後の頁         Structural Safety       102292 ~ 102292         掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子)       査読の有無         10.1016/j.strusafe.2022.102292       有	2.論又標題	5.発行年
3.雑誌名       6.最初と最後の頁         Structural Safety       102292 ~ 102292         掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子)       査読の有無         10.1016/j.strusafe.2022.102292       有	Adaptive stratified sampling for structural reliability analysis	
Structural Safety       102292 ~ 102292         掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子)       査読の有無         10.1016/j.strusafe.2022.102292       有	,	
Structural Safety       102292 ~ 102292         掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子)       査読の有無         10.1016/j.strusafe.2022.102292       有	3. 雑註夕	6 是初と是後の百
掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子) 査読の有無 10.1016/j.strusafe.2022.102292 有		
10.1016/j.strusafe.2022.102292 有	Structural Safety	102292 ~ 102292
10.1016/j.strusafe.2022.102292 有		
10.1016/j.strusafe.2022.102292 有		
10.1016/j.strusafe.2022.102292 有	掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子)	査読の有無
オープンアクセス 国際共著	10.1010/j.stfusate.2022.102292	月 月
オーブンアクセス   国際共著		
I = 10.0 / E	オーブンアクセス	国際共著
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 該当する	オープンアクセスではない、 又はオープンアクセスが闲難	該当する
The state of the s	The state of the s	W-1, 9

1.著者名	4 . 巻
He Yue、Kawai Reiichiro	98
2.論文標題	
Dimension dependent properties of subdiffusions in damping force fields from an inference	2022年
perspective	S 2471 2 1/2 5 7
3 . 雑誌名	6.最初と最後の頁
Physica Scripta	015006 ~ 015006
掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子)	査読の有無
10.1088/1402-4896/aca3d8	有
10.1000/1402-4050/aca300	Ħ
オープンアクセス	国際共著
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	該当する
1.著者名	4 . 巻
Song Chenxiao、Kawai Reiichiro	33
2. 論文標題	5.発行年
Batching Adaptive Variance Reduction	2023年
3.雑誌名	6.最初と最後の頁
ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation	1 ~ 24
· ·	
掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子)	査読の有無
10.1145/3573386	有
オープンアクセス	国際共著
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	該当する
1. 著者名	4 . 巻
	4 · 중 109
He Yue、Kawai Reiichiro、Shimizu Yasutaka、Yamazaki Kazutoshi	109
2 . 論文標題	5.発行年
	2023年
The Gerber-Shiu discounted penalty function: A review from practical perspectives	20234
3 . 雑誌名	6.最初と最後の頁
Insurance: Mathematics and Economics	1~28
modrance. mathematics and Economics	1 20
掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子)	査読の有無
10.1016/j.insmatheco.2022.12.003	有
オープンアクセス	国際共著
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	該当する
1 . 著者名	4 . 巻
Song Chenxiao、Kawai Reiichiro	72
2 . 論文標題	5.発行年
Adaptive radial importance sampling under directional stratification	2023年
3.雑誌名	6.最初と最後の頁
Probabilistic Engineering Mechanics	103443 ~ 103443
掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子)	本柱の左伽
	査読の有無
	<u> </u>
19 単以間 又 00 0 1 ( ) クラルオ フタエク ド i i i i i i i i i i i i i i i i i i	有
10.1016/j.probengmech.2023.103443	
	有 国際共著 該当する

1.著者名	4 . 巻
Chessari Jared、Kawai Reiichiro、Shinozaki Yuji、Yamada Toshihiro	20
2 . 論文標題	5.発行年
Numerical methods for backward stochastic differential equations: A survey	2023年
3.雑誌名	6.最初と最後の頁
Probability Surveys	486 ~ 567
掲載論文のDOI(デジタルオプジェクト識別子)	   査読の有無
10.1214/23-PS18	有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 該当する
1 . 著者名 Song Chenxiao、Kawai Reiichiro	4.巻 45
2 . 論文標題	5.発行年
Dynamic Finite-Budget Allocation of Stratified Sampling with Adaptive Variance Reduction by Strata	2023年
3 . 雑誌名 SIAM Journal on Scientific Computing	6.最初と最後の頁 A898~A932
掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子)	査読の有無
10.1137/21M1430996	有
t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	国際共著該当する
ク フファフ にん C はない、 人はカーフファフ に 人が 四共	以当りの
1 . 著者名	4 . 巻
Kawai Reiichiro	4 · 명 174
2 . 論文標題	5 . 発行年
A general approach to sample path generation of infinitely divisible processes via shot noise representation	2021年
3.雑誌名 Statistics & Probability Letters	6.最初と最後の頁 109091~109091
Statistics & Probability Letters	109091 ~ 109091
『『『最後の DOI(デジタルオブジェクト識別子)	査読の有無
10.1016/j.spl.2021.109091	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 Yuan Sida、Kawai Reiichiro	4.巻 18
2 . 論文標題	5.発行年
Numerical aspects of shot noise representation of infinitely divisible laws and related processes	2021年
3.雑誌名 Probability Surveys	6.最初と最後の頁 201~271
引載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子 )	   査読の有無
日東北端文 (プレス ) ファイ ( アンダルス ) ファイ ( 市戦力) J - ) 10.1214/20-PS359	有
	有   国際共著   該当する

	1 4 #
1.著者名	4 . 巻
He Yue、Kawai Reiichiro	31
2 - 50-47-1面目5	r 発仁在
2. 論文標題	5.発行年
Time-squeezing and time-expanding transformations in harmonic force fields	2021年
0 hb	C 目初1.目後の五
3.雑誌名	6.最初と最後の頁
Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science	093107 ~ 093107
	****
掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子)	査読の有無
10.1063/5.0054330	有
	同咖井茶
オープンアクセス	国際共著
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	該当する
	T
1. 著者名	4 . 巻
Qiu Qinjing、Kawai Reiichiro	182
2.論文標題	5.発行年
A decoupling principle for Markov-modulated chains	2022年
3.雑誌名	6.最初と最後の頁
Statistics & Probability Letters	109301 ~ 109301
掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子)	査読の有無
10.1016/j.spl.2021.109301	有
オープンアクセス	国際共著
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	該当する
1 . 著者名	4 . 巻
Yuan Sida, Kawai Reiichiro	53
2 . 論文標題	5.発行年
Asymptotic degeneracy and subdiffusivity	2020年
, mp. to the degeneracy and easiering	1020 1
고 사는 보선	6.最初と最後の頁
3、淮流石	
3.雑誌名 Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical	
Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical	095002~095002
Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical	095002 ~ 095002
Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical 掲載論文のDOI(デジタルオプジェクト識別子)	095002~095002 査読の有無
Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical	095002 ~ 095002
Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical 掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1751-8121/ab69a5	095002 ~ 095002 査読の有無 有
Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical 掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1751-8121/ab69a5 オープンアクセス	095002 ~ 095002 査読の有無 有 国際共著
Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical 掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1751-8121/ab69a5	095002 ~ 095002 査読の有無 有
Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical 掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1751-8121/ab69a5 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	095002~095002 査読の有無 有 国際共著 該当する
Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical 掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1751-8121/ab69a5 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 1.著者名	095002~095002 査読の有無 有 国際共著 該当する
Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical 掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1751-8121/ab69a5 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	095002~095002 査読の有無 有 国際共著 該当する
Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical 掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1751-8121/ab69a5 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  1 . 著者名 Kawai Reiichiro	095002~095002 査読の有無 有 国際共著 該当する 4 . 巻 483
Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical 掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1751-8121/ab69a5 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  1 . 著者名 Kawai Reiichiro 2 . 論文標題	095002~095002 査読の有無 有 国際共著 該当する 4 . 巻 483
Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical 掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1751-8121/ab69a5 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  1 . 著者名 Kawai Reiichiro	095002~095002 査読の有無 有 国際共著 該当する 4 . 巻 483
Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical 掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1751-8121/ab69a5  オープンアクセス	095002~095002 査読の有無 有 国際共著 該当する 4 . 巻 483 5 . 発行年 2020年
Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical 掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1751-8121/ab69a5 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  1 . 著者名 Kawai Reiichiro 2 . 論文標題 Adaptive importance sampling and control variates 3 . 雑誌名	の95002~095002  査読の有無 有  国際共著  該当する  4 . 巻 483  5 . 発行年 2020年  6 . 最初と最後の頁
Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical 掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1751-8121/ab69a5  オープンアクセス	095002~095002 査読の有無 有 国際共著 該当する 4 . 巻 483 5 . 発行年 2020年
Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical 掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1751-8121/ab69a5  オープンアクセス	の95002~095002  査読の有無 有  国際共著  該当する  4 . 巻 483  5 . 発行年 2020年  6 . 最初と最後の頁
Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical 掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1751-8121/ab69a5  オープンアクセス	1 095002 ~ 095002 査読の有無 有 国際共著 該当する 4 . 巻 483 5 . 発行年 2020年 6 . 最初と最後の頁 123608 ~ 123608
月載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1751-8121/ab69a5  オープンアクセス	でいる できる できる できる できる できる できる できる できる できる でき
Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical 掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1751-8121/ab69a5  オープンアクセス	1 095002 ~ 095002 査読の有無 有 国際共著 該当する 4 . 巻 483 5 . 発行年 2020年 6 . 最初と最後の頁 123608 ~ 123608
掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1751-8121/ab69a5  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  1 . 著者名 Kawai Reiichiro  2 . 論文標題 Adaptive importance sampling and control variates  3 . 雑誌名 Journal of Mathematical Analysis and Applications  掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jmaa.2019.123608	でいる できる できる できる できる できる できる できる できる できる でき
月載論文のDOI(デジタルオプジェクト識別子) 10.1088/1751-8121/ab69a5  オープンアクセス	でいる できる できる できる できる できる できる できる できる できる でき

	I . w
1.著者名	4 . 巻
Jiao Chunxi、Kawai Reiichiro	58
2.論文標題	5 . 発行年
Computable primal and dual bounds for stochastic control	2020年
3.雑誌名	6.最初と最後の頁
SIAM Journal on Control and Optimization	3709 ~ 3733
C. I. Control of Contr	0.00 0.00
掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子)	   査読の有無
10.1137/18M1232231	有
オープンアクセス	国際共著
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	該当する
カープラブと人にはない。人はカープラブラと大が四条	W 1 7 6
	I . w
1.著者名	4 . 巻
Song Chenxiao、Kawai Reiichiro	73
2 . 論文標題	5.発行年
······	
Monte Carlo and variance reduction methods for structural reliability analysis: A comprehensive	2023年
review	
3.雑誌名	6.最初と最後の頁
Probabilistic Engineering Mechanics	103479 ~ 103479
Troublitto Engineering meenantes	100410 100410
掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子)	査読の有無
10.1016/j.probengmech.2023.103479	有
オープンアクセス	国際共著
· · · · · · = · ·	
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	該当する
1.著者名	4 . 巻
Qiu Qinjing、Kawai Reiichiro	96
ara arriying, kanar kerromre	
2	F 36/- F
2.論文標題	5 . 発行年
A recursive representation for decoupling time-state dependent jumps from jump-diffusion	2024年
processes	
3 . 雑誌名	6.最初と最後の頁
Stochastics	1~41
STOCHASTICS	1~41
掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子)	査読の有無
10.1080/17442508.2023.2259534	有
	'3
オープンアクセス	国際共著
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	該当する
1 . 著者名	4 . 巻
• • • • • •	
Song Chenyian Kawai Rejichiro	98
Song Chenxiao、Kawai Reiichiro	98
Song Chenxiao、Kawai Reiichiro	
Song Chenxiao、Kawai Reiichiro 2 . 論文標題	98 5.発行年
Song Chenxiao、Kawai Reiichiro 2.論文標題	5.発行年
Song Chenxiao、Kawai Reiichiro	
Song Chenxiao、Kawai Reiichiro  2 . 論文標題 Sampling and Change of Measure for Monte Carlo Integration on Simplices	5.発行年 2024年
Song Chenxiao、Kawai Reiichiro  2 . 論文標題 Sampling and Change of Measure for Monte Carlo Integration on Simplices  3 . 雑誌名	5 . 発行年 2024年 6 . 最初と最後の頁
Song Chenxiao、Kawai Reiichiro  2 . 論文標題 Sampling and Change of Measure for Monte Carlo Integration on Simplices	5.発行年 2024年
Song Chenxiao、Kawai Reiichiro  2 . 論文標題 Sampling and Change of Measure for Monte Carlo Integration on Simplices  3 . 雑誌名	5 . 発行年 2024年 6 . 最初と最後の頁
Song Chenxiao、Kawai Reiichiro  2 . 論文標題 Sampling and Change of Measure for Monte Carlo Integration on Simplices  3 . 雑誌名 Journal of Scientific Computing	5 . 発行年 2024年 6 . 最初と最後の頁 64
Song Chenxiao、Kawai Reiichiro  2 . 論文標題 Sampling and Change of Measure for Monte Carlo Integration on Simplices  3 . 雑誌名 Journal of Scientific Computing	5 . 発行年 2024年 6 . 最初と最後の頁 64
Song Chenxiao、Kawai Reiichiro  2. 論文標題 Sampling and Change of Measure for Monte Carlo Integration on Simplices  3. 雑誌名 Journal of Scientific Computing  掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子)	5 . 発行年 2024年 6 . 最初と最後の頁 64 査読の有無
Song Chenxiao、Kawai Reiichiro  2 . 論文標題 Sampling and Change of Measure for Monte Carlo Integration on Simplices  3 . 雑誌名 Journal of Scientific Computing	5 . 発行年 2024年 6 . 最初と最後の頁 64
Song Chenxiao、Kawai Reiichiro  2. 論文標題 Sampling and Change of Measure for Monte Carlo Integration on Simplices  3. 雑誌名 Journal of Scientific Computing  掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10915-024-02461-0	5 . 発行年 2024年 6 . 最初と最後の頁 64 査読の有無 有
Song Chenxiao、Kawai Reiichiro  2. 論文標題 Sampling and Change of Measure for Monte Carlo Integration on Simplices  3. 雑誌名 Journal of Scientific Computing  掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10915-024-02461-0	5 . 発行年 2024年 6 . 最初と最後の頁 64 査読の有無 有
Song Chenxiao、Kawai Reiichiro  2. 論文標題 Sampling and Change of Measure for Monte Carlo Integration on Simplices  3. 雑誌名 Journal of Scientific Computing  掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10915-024-02461-0	5 . 発行年 2024年 6 . 最初と最後の頁 64 査読の有無 有

〔学会発表〕 計3件(うち招待講演 3件/うち国際学会 2件)
1.発表者名 Reiichiro Kawai
2. 発表標題 Stochastic approximation in adaptive Monte Carlo variance reduction
3.学会等名 KAFE-JAFEE International Symposium(招待講演)(国際学会)
4.発表年 2021年
1 . 発表者名 Reiichiro Kawai
2. 発表標題 Stochastic approximation in adaptive Monte Carlo variance reduction
3.学会等名 One World Virtual Seminar Series - Stochastic Numerics and Inverse Problems(招待講演)(国際学会)
4.発表年 2020年
1. 発表者名 河合玲一郎
2. 発表標題 確率制御問題の主双対最適パウンド計算法について
3.学会等名 大阪大学中之島ワークショップ金融工学・数理計量ファイナンスの諸問題2020(招待講演)
4.発表年 2020年
〔図書〕 計0件
〔産業財産権〕
[その他] https://researchmap.jp/raykawai https://sites.google.com/site/reiichirokawai/
UTokyo BiblioPlaza https://www.u-tokyo.ac.jp/biblioplaza/ja/J_00135.html

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
--	---------------------------	-----------------------	----

7.科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------