

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月31日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究（A）

研究期間：2008～2012

課題番号：20241038

研究課題名（和文） 情報化ネットワーク社会に向けた高度な専門的数理技術ライブラリの研究と開発

研究課題名（英文） Research and development of the advanced expert mathematical library for the information network society

研究代表者

水野 眞治（MIZUNO SHINJI）

東京工業大学・大学院社会理工学研究科・教授

研究者番号：90174036

研究成果の概要（和文）：

数理ファイナンス/金融工学に関連する数理技術、特に「最適化・オペレーションズ・リサーチ」「確率数値解析」「情報ネットワークセキュリティ」という3つの要素技術に関して理論的研究を行った。また、それらを実装したソフトウェアをインターネット上で公開した。さらに、金融数値計算を行うシステムの設計と構築を行った。その結果、高度な専門的数理技術を容易にアクセスできるようになった。

研究成果の概要（英文）：

We have carried out theoretical research into mathematical technology of finance and financial engineering including three main topics 'optimization and operations research', 'stochastic numerical analysis', and 'information network security'. We opened software of them to the internet. We also designed and developed a financial numerical calculation system. As a result, it makes possible to easily access our highly specialized mathematical technology.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	8,900,000	2,670,000	11,570,000
2009年度	5,200,000	1,560,000	6,760,000
2010年度	4,800,000	1,440,000	6,240,000
2011年度	4,800,000	1,440,000	6,240,000
2012年度	4,000,000	1,200,000	5,200,000
総計	27,700,000	8,310,000	36,010,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：社会・安全システム科学・社会システム工学・安全システム

キーワード：OR

1. 研究開始当初の背景

現代の社会においては、我が国のみならず世界中で高度数値技術が社会的・経済的に大きなインパクトを持つようになってきている。特にこの約10年間の金融技術の発達は顕著

であるが、それを基礎づけているのは、数理ファイナンス分野の研究の進展はもとより、最適化や確率数値解析、情報ネットワーク・セキュリティなどの知識・技術の高度化が貢献している部分が多い。特に最適化などの

オペレーションズ・リサーチや金融数値技術は、直接のユーザである金融産業に限らず、投資戦略・資金調達戦略・プロジェクト戦略など経営学やコーポレート・ファイナンスの話題を通じてあらゆる産業で不可欠なものになりつつある。したがって、そのような技術・知識を誰もが安全かつ容易にアクセス可能な形で整備していくことが、高度な情報社会基盤を形成するための必要条件になっていくと考えられる。

しかしながら、最適化や金融工学などの数理分野の理論研究は急速に進歩し、かつ適用領域が広範になってきており、実務の場だけでなく研究者の養成の現場である大学院においてすら、この全貌を把握するのは非常に困難になっている。よって、最適化や金融工学などの各要素技術の研究開発と同時に、その成果を誰もが低コストで利用可能な形で提供することが必要であり、同時に、社会/実務と学術研究の相互作用をダイナミックに行っていくための社会的 IT システムの設計・構築を行うことが急務である。

2. 研究の目的

数理ファイナンス/金融工学に関連する最適化技術、応用統計学、確率解析等の数値計算の最先端技術の開発を行う。オリジナルな研究が中心となるが、先端領域でのサーベイとその結果を計算機へ実装することも重要な活動と位置づける。そして、この分野の最先端の研究結果が、実務の現場や若い研究者/学生などに容易に利用できるようにするための IT インフラの設計と構築を行う。より具体的には、「最適化・OR (オペレーションズ・リサーチ)」「確率数値解析」「情報ネットワークセキュリティ」という3つの要素技術それぞれについて、次に述べる課題に取り組むことを目的とする。

(1) 最適化問題の扱い辛さを回避し、実務と最適化技術の連携を密にするためには、アルゴリズム別ではなく、アプリケーション別に用意されたソフトウェアがなければならない。そのため、数理ファイナンスや金融工学の分野において頻出する類型タイプの最適化問題を選出し、これらの個々の最適化問題を効率よく解くためのアルゴリズムの提案を行う。

(2) 数理ファイナンス/金融工学の最先端の結果は確率解析の理論的な難解さが応用面での最大の障害となる。そのため、常に最先端の研究のサーベイを行い、その結果を計算機プログラムとして整備・供給する。また、シミュレーション技術による確率微分方程式の弱近似解法、アメリカンオプションの計算方法、不連続な確率過程のシミュレーション

ン、高次元数値積分技術、信用リスク管理・住宅ローン担保証券評価などの注目度の高い研究に取り組む。

(3) 数値技術ライブラリを作成する場合には、ライブラリのコンテンツの品質管理、ユーザの認証、記事の改竄、記事やプログラムの編集、およびそれらを実現する為のプロトコル等を適切に設計しなくてはならない。そのためには、どのようなシステムが必要であり、どのような技術的課題に取り組む必要があるかを整理し、実際に個々の問題を解決する。

3. 研究の方法

(1) 実社会に現れる最適化問題を広くサーベイする。それらの問題群に対し、問題の構造や特性の詳細を調べることで、既存のどのような最適化問題に帰着させ、どのようなアルゴリズムを適用するのが効率的であるかを検討する。また、数理ファイナンスにおいて重要である不確実な要素(リスク)を考慮した最適化問題に対する応用統計的なアプローチに関するサーベイを行う。これらの結果をもとに、実問題毎に解決策を提案し、それらを実装したパッケージ群を開発する。そして、これらの技術の解説などを加えた上で、インターネット上で公開する。

(2) 実用に耐える計算機プログラムのライブラリ、その技術の解説、解説のためのソフトウェア(Toy code のソースなど)などからなる知識アーカイブとソフトウェアに関するライブラリのコンテンツ整備に着手し、そのために大学院生を作業メンバーとする「数理ファイナンス基本ライブラリ構築」のミニ・プロジェクトを実行する。その後、最先端の結果を実装する「数理ファイナンス先端ライブラリ開発」フェーズへと移行させていき、世界中でどこでも実用化されていない確率数値計算技術の一つでも二つでもライブラリ化することを目指す。

(3) インターネット技術を用いて、多くの研究者、実務家が自由に本研究課題で目指す数値計算ライブラリを利用すると、同時に利用者もまた主体的にライブラリの構築に貢献できるようなシステムの設計を検討する。そのために、ワークショップにおける情報収集や実務家へのヒアリングを通じて、ライブラリ構築のための情報システムおよび情報セキュリティに関する具体的な技術的課題のサーベイを行い、研究組織内でのネットワーク実験の設計およびテストを実行する。また、個々の要素技術の成果については、公開しながらの稼働という形で恒常的に行うことを目指す。

4. 研究成果

主な研究成果は次の通りである。

(1) 動的資産配分問題に対して、カーネル法を適用することにより、非線形な制御を可能とした。また、理論上有効だと言われている資産比が一定となる再分配戦略を研究対象として、多項式最適化を適用する、非線形な取引コストを組み入れる、大域的最適化を行う、といった複数の研究を行なった。さらに、近年盛んに研究されている CVaR をリスク尺度として用い、保険料を決定する最適化モデルや非凸型取引コストの下でのポートフォリオ選択問題に対する効率的な解法を開発し、そのアルゴリズムを実装した。

(2) 半正定値緩和を用いて、不確実的な要素（リスク）を考慮した最適化問題を解く枠組みを提案した。そして、半正定値計画問題を解く最適化ソフトウェアに改良を加え、そのマニュアルなどを整備した上で、ソースコードをインターネット上で公開した。また、センサーネットワーク問題の半正定値緩和に対して、問題特有の疎性を広範囲に利用することにより、効率良く近似解を求めるアルゴリズムを構築し、それを実装したソフトウェアを開発しインターネット上で公開した。

(3) 線形計画法は最適化の中でも最も基本的な技術である。これまで Danzig の単体法は最悪のケースでの計算量の解析が十分でないことが問題であった。今回の研究により、線形計画法を Dantzig のシンプレックス法や双対シンプレックス法で解くときの反復回数の上界を求めることに成功した。また、Klee Minty の問題を変形することにより、その上界がタイトであることを示した。また、様々な形式の線形計画問題に対する多面体の性質を導いた。

(4) 金利変化見通しと個別企業価値変動を考慮したトップダウン・アプローチによる信用ポートフォリオのリスク計算や相互作用型の格付変更強度モデルによる格付変更履歴データの分析を行った。また、コヒーレントなリスクメジャーや確率制御問題に対する近似スキームを研究・開発した。実務上重要である解約リスクやデフォルトリスクに関する様々な知見を得た。さらに、乱数マートンモデルを改良することにより、社債スプレッドの実証分析を行った。

(5) ファイナンスのライブラリの研究の礎となる確率微分方程式の楠岡近似を実現するソフトウェアライブラリについてまとめた。数理ファイナンスに関する計算ライブラリの中心となる確率微分方程式に対し、新し

い高次の弱近似スキームを考案し理論的解析を行った。

(6) 多様化・高度化する金融数値計算/数式処理の分野におけるニーズに応えるため、今まで別々のシステムとしてしか存在していなかった金融数値計算ライブラリと数式処理を統合したインフラ QuantOnline (数理ファイナンスにおけるオンライン数式処理システム) を構築し、インターネット上で公開した。

(7) 情報化ネットワーク社会にかかせない暗号化理論の研究を行い、各種の暗号法の強度について分析を行った。また、インターネット技術を用いて、多くの研究者や実務家が自由に本研究課題で目指す数値計算ライブラリを利用すると同時に利用者がまた主体的にライブラリの構築に貢献できるようなシステムについて知見を得た。

(8) 組合せ最適化問題の非負半正定値計画緩和は緩和の質は良いものの、解の精度に問題がある。面的縮小を適用することにより、解の精度を向上させる枠組みを提案した。また、近似的な内点法を行うことにより、計算時間の短縮に成功した。それに加え、応用統計学の基本的問題である判別問題に対し、2次関数や凸関数を利用したミニマックスアプローチを提案し、その手法の有効性を検証した。

(9) 充足可能解を列挙するシステムを開発し、特許を取得した。

以上の研究の集大成として、2012年11月には科研費シンポジウム「情報化ネットワーク社会に向けた高度な専門的数理技術ライブラリの研究と開発」を開催し13件の講演を企画した。77人の参加者があり、本研究テーマに関する最新技術の情報共有並びに意見交換が活発に行われた。2013年2月には情報・サービスイノベーション分野の公開シンポジウムを開催し、8件の講演を企画した。またこれらの研究成果を、5年間で合計75本の論文(査読付き論文57本)と1冊の図書にて発表した。また、学会やワークショップで合計96件の発表(招待講演21件)を行い、上記の研究成果を内外に周知したのに加え、さらに1件の特許を取得している。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計75件)

(1) T. Kitahara and S. Mizuno, A bound for the number of different basic solutions

generated by the simplex method, *Mathematical Programming*, 査読有, Vol.137, 579-586 (2013)

DOI:10.1007/s10107-011-0482-y

(2) Olivier Le Courtois and Hidetoshi Nakagawa, On Surrender and Default Risks, *Mathematical Finance*, 査読有, Vol.23, 143-168 (2013)

DOI:10.1111/j.1467-99965.2011.00487.x

(3) Y. Takano and R. Sotirov, A polynomial optimization approach to constant rebalanced portfolio selection, *Computational Optimization and Applications*, 査読有, Vol.52, 645-666 (2012), DOI:10.1007/s10589-011-9436-9

(4) T. Kitahara, T. Matsui, and S. Mizuno, On the number of solutions generated by Dantzig's simplex method for LP with bounded variables, *Pacific Journal of Optimization*, 査読有, Vol.8, 447-455 (2012)

(5) Y. Nakano, On approximating law-invariant comonotonic coherent risk measures, *Astin Bulletin*, 査読有, Vol.42, 343-353 (2012)

(6) S. Kim, M. Kojima, H. Waki, and M. Yamashita, "SFSDP": a sparse version of full semidefinite programming relaxation for sensor network localization problem, *ACM Transactions on Mathematical Software*, 査読有, Vol.38, article no.27 (2012)

DOI:10.1145/2331130.2331135

(7) M. Yamashita, K. Fujisawa, M. Fukuda, K. Kobayashi, K. Nakata, and M. Nakata, Latest developments in the SDPA Family for solving large-scale SDPs, *Handbook of Semidefinite, Conic and Polynomial Optimization*, M. Anjos and J.B. Lasserre (eds.), Springer, 査読有, Vol.166, 687-713(2012)

DOI:10.1007/978-1-4614-0769-0_24

(8) 水野 眞治, 北原 知就, Klee-Minty's LP and Upper Bounds for Dantzig's Simplex Method, *Operations Research Letters*, 査読有, Vol.39, 88-91 (2011)

DOI:10.1016/j.orl.2011.01.003

(9) R. Gu, K. Higa, and D.R. Moodie, A study on communication media selection: comparing the effectiveness of the media richness, social influence, and media fitness, *Journal of Service Science and Management*, 査読有, Vol.4, 291-299 (2011)

(10) Y. Takano and J. Gotoh, A nonlinear control policy using kernel method for dynamic asset allocation, *Journal of the Operations Research Society of Japan*, 査読有, Vol.54, 201-218 (2011)

(11) Y. Takano and J. Gotoh, Constant rebalanced portfolio optimization under nonlinear transaction costs, *Asia-Pacific Financial Markets*, 査読有, Vol.18, 191-211 (2011)

DOI:10.1007/s10690-010-9130-4

(12) A. Yoshii and K. Higa, Analysis of the peculiarity of the Japanese software development style in offshore software development, *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, 査読有, Vol.6, 46-50 (2011)

DOI:10.1002/tee.20605

(13) H. Nakagawa, Modeling of contagious downgrades and its application to multi-downgrade protection, *JSIAM Letters*, 査読有, Vol.2, 65-68 (2010)

DOI:10.2139/ssrn.1730802

(14) T. Kitahara and T. Tsuchiya, Proximity of weighted and layered least squares solutions, *SIAM Journal on Matrix Analysis and Applications*, 査読有, Vol.31, 1172-1186 (2010) DOI:10.1137/080725787

(15) S. Kim, M. Kojima and P. Toint, Recognizing Underlying Sparsity in Optimization, *Mathematical Programming*, 査読有, Vol.119, 273-303 (2009)

DOI:10.1007/s10107-008-0210-4

(16) Kouichi Itou, Dai Yamamoto, Jun Yajima and Wakaha Ogata, Collision-Based Power Attack for RSA with Small Public Exponent, *IEICE Transactions on Information and Systems*, 査読有, Vol.E92-D, 897-908 (2009) DOI:10.1587/transinf.E92.D.897

(17) S. Ninomiya and M. Ninomiya, A new higher-order weak approximation scheme of stochastic differential equations and the Runge-Kutta method, *Finance and Stochastics*, 査読有, Vol.13, 415-443, (2009) DOI:10.1007/s00780-009-0101-4

(18) 阿部正己, 尾形わかほ, プライバシー保護を考慮した RFID 方式の大規模システムへの適用, *電子情報通信学会論文誌*, 査読有, Vol.J91-A, 399-410 (2008)

(19) Syoiti Ninomiya and Nicolas Victoir, Weak approximation of stochastic differential equations and application to derivative pricing, *Applied Mathematical Finance*, 査読有, Vol.15, 107-121 (2008)

DOI:10.1080/13504860701413958

(20) T. Kitahara, S. Mizuno, and K. Nakata, Quadratic and convex minimax classification problems, *Journal of the Operations Research Society of Japan*, 査読有, Vol.51, 191-201 (2008)

〔学会発表〕(計 96 件)

- (1) 高野祐一, 確率計画法とその応用, 「電力システムと最適化」ワークショップ, 2013 年 3 月 28 日, 東京大学生産技術研究所 (東京)
- (2) 中野張, 確率制御問題の数値解法について, 金融工学・数理計量ファイナンスの諸問題 2012, 2012 年 12 月 1 日, 大阪大学中之島センター (大阪)
- (3) S. Mizuno and T. Kitahara, On the Number of Solutions Generated by the Simplex Method for LP, The Second Workshop on Optimization and Risk Management, 2012 年 10 月 4-5 日, Hong Kong Polytechnic University (香港)
- (4) S. Mizuno and T. Kitahara, An Upper bound for the Number of Different Solutions Generated by the Primal Simplex Method with Any Selection Rule of Entering Variables, The 21st International Symposium on Mathematical Programming (ISMP2012), 2012 年 8 月 22 日, Berlin Institute of Technology (ドイツ)
- (5) 小島政和, 多項式最適化問題の半正定値計画緩和, 日本オペレーションズ・リサーチ学会「最適化の理論と応用」研究部会, 2012 年 7 月 1 日, 筑波大学 (茨城)
- (6) H. Nakagawa and O. Le Courtois, On Surrender and Default Risk, The CREST and 4th Ritsumeikan-Florence Workshop on Risk, Simulation and Related Topics, 2012 年 3 月 10 日, 立命館アジア太平洋大学 (大分)
- (7) T. Kitahara and S. Mizuno, On the Number of Solutions Generated by the Simplex Method for LP, First ETH-JAPAN Symposium for Academic Exchanges, 2012 年 3 月 7-9 日, Eidgenossische Technische Hochschule Zurich (スイス)
- (8) 高野祐一, 後藤順哉, 動的資産配分のためのカーネル法を利用した非線形制御ポリシー, 日本オペレーションズ・リサーチ学会「計算と最適化の新展開」研究部会, 2011 年 12 月 17 日, 中央大学 (東京)
- (9) Y. Takano and J. Gotoh, A nonlinear control policy using kernel method for dynamic asset allocation, INFORMS 2011 Annual Meeting, 2011 年 11 月 13-16 日, Charlotte Convention Center (アメリカ)
- (10) S. Ninomiya, S. Kusuoka, and M. Ninomiya, The higher-order weak approximation algorithms for SDEs, The second workshop on numerical methods for solving the filtering problem and high order methods for solving parabolic PDEs, 2011 年 9 月 26-29 日, Imperial College (イギリス)
- (11) S. Ninomiya, S. Kusuoka, and M.

Ninomiya, Higher-order weak approximation algorithms for SDEs: some trials on barrier option problem and higher order algorithms, Stochastic PDEs, 2011 年 9 月 12-16 日, Eidgenossische Technische Hochschule Zurich (スイス)

(12) T. Kitahara and S. Mizuno, Klee-Minty's LP and upper bounds for Dantzig's simplex method, International Conference on Operations Research, 2011 年 8 月 30 日-9 月 2 日, University of Zurich (スイス)

(13) T. Kitahara and S. Mizuno, A bound for the number of different basic solutions generated by the simplex method, SIAM conference on Optimization, 2011 年 5 月 16-19 日, Darmstadtium Conference Center (ドイツ)

(14) Shinji Mizuno and Tomonari Kitahara, A Bound for the Number of Different Basic Solutions Generated by the Simplex Method, Plenary Talk at ICOTA8, 2010 年 12 月 10-13 日, 復旦大学 (中国)

(15) M. Kojima, Enclosing ellipsoids and elliptic cylinders of semialgebraic sets and their application to error bound in polynomial optimization, Modern Trends in Optimization and Its Application, Workshop II: Numerical Methods for Continuous Optimization IPAM, 2010 年 10 月 1 日, University of California (アメリカ)

(16) S. Ninomiya and M. Ninomiya, On an extension of a higher-order weak approximation method for SDEs, Workshop on numerical methods for solving the filtering problem and high order methods for solving parabolic PDEs, 2010 年 9 月 29-29 日, Imperial College (イギリス)

(17) H. Nakagawa, Modeling of contagious downgrades and its application to multi-downgrade protection, Sixth World Congress of the Bachelier Finance Society, 2010 年 6 月 24 日, Hilton Toronto (カナダ)

(18) Hidetoshi Nakagawa, Modeling of Contagious Downgrades and Its Application to Multi-Downgrade Protection, Quantitative Methods in Finance Conference (QMF) 2009, 2009 年 12 月 16 日, Amora Hotel (オーストラリア)

(19) Masakazu Kojima, Duality in the Positive Semidefinite Matrix Completion and Its Application to SDPs, The 20th International Symposium in Mathematical Programming, 2009 年 8 月 23-28 日, Chicago Marriott Downtown magnificent Mile and Gleacher Center (ア

メリカ)

(20) Syoiti Ninomiya, A higher-order weak approximation method of SDEs, Workshop: Computational Finance, 2009年8月10-12日, 京都大学 (京都)

(21) Hodaka Nakanishi and Kunihiko Higa, Regional activation and administrative reform model with Telework, EEE' 09-The 2009 International Conference on e-Learning, e-Business, Enterprise Information Systems, and e-Government, 2009年7月13-16日, Monte Carlo Las Vegas (アメリカ)

(22) H. Nakagawa, Modeling of contagious rating changes and its application to multi-downgrade protection, The 2nd International Financial Research Forum, 2009年3月20日, Pavillon Royal (フランス)

(23) S. Ninomiya, A higher-order weak approximation method of SDEs and the Runge-Kutta method, Conference on small time asymptotics, perturbation theory and heat kernel methods in mathematical finance, 2009年2月10-12日, Wolfgang Pauli Institute (オーストリア)

[図書] (計1件)

(1) 高橋 幸雄, 朝倉書店「確率論 (基礎数理論座2)」2008, 288頁

[産業財産権]

○取得状況 (計1件)

(1) 名称: 充足可能解列挙システム
発明者: 小島 政和, 宇野 毅明, 秋葉 博
権利者: 株式会社アライドエンジニアリング,
国立大学法人東京工業大学,
マツダ株式会社

種類: 特許

番号: 第4298333号

取得年月日: 2009年4月24日

国内外の別: 国内

[その他]

ホームページ等

「情報化ネットワーク社会に向けた高度な専門的数理技術ライブラリの研究と開発」

<http://quants.me.titech.ac.jp/index.html>

1

6. 研究組織

(1) 研究代表者

水野 眞治 (MIZUNO SHINJI)
東京工業大学・大学院社会理工学研究科・教授
研究者番号: 90174036

(2) 研究分担者

小島 政和 (KOJIMA MASAKAZU)
東京工業大学・大学院情報理工学研究科・名誉教授
研究者番号: 90092551

比嘉 邦彦 (HIGA KUNIHICO)
東京工業大学・イノベーションマネジメント研究科・教授
研究者番号: 50282877

二宮 祥一 (NINOMIYA SHOITI)
東京工業大学・イノベーションマネジメント研究科・教授
研究者番号: 70313377

尾形 わかは (OGATA WAKAHA)
東京工業大学・イノベーションマネジメント研究科・准教授
研究者番号: 90275313

中川 秀敏 (NAKAGAWA HIDETOSHI)
一橋大学・国際企業戦略研究科・准教授
研究者番号: 30361760

中田 和秀 (NAKATA KAZUHIDE)
東京工業大学・大学院社会理工学研究科・准教授
研究者番号: 00312984

中野 張 (NAKANO YUMIHARU)
東京工業大学・イノベーションマネジメント研究科・准教授
研究者番号: 00452409

北原 知就 (KITAHARA TOMONARI)
東京工業大学・大学院社会理工学研究科・助教
研究者番号: 10551260

高野 祐一 (TAKANO YUICHI)
東京工業大学・大学院社会理工学研究科・助教
研究者番号: 40602959

(3) 連携研究者

なし