

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 10 日現在

機関番号：34416

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24500026

研究課題名(和文) 標的解法の改良と社会科学分野への応用

研究課題名(英文) Improvements of the target solution method and its application to social sciences

## 研究代表者

仲川 勇二 (Nakagawa, Yuji)

関西大学・総合情報学部・教授

研究者番号：60141925

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：経営科学の分野で世界最高峰の学術雑誌であるManagement Science誌(2014年Vol. 3)に仲川の離散最適化に関する新解法の論文が掲載された。最適化の分野での掲載は日本人として40年ぶりである。また、非凸問題が離散最適化で容易に解けることを利用して、金融工学の難問やゲノム科学の「次元の呪い」や「失われた遺伝率」と呼ばれよく知られた難問の解決に向けて、すでに顕著な成果が得られている。ゲノム科学の難問の克服は、高血圧、がん、統合失調症等の複雑な病気の治療を大きく前進させる可能性がある。

研究成果の概要(英文)：In the field of management science, INFORMS Management Science (MS) is the academic journal of the highest peak in the world. The Nakagawa et al. paper of a new method on discrete optimization has been published in MS (Vol. 3, 2014). The previous Japanese researcher in the field of optimization of MS is 40 years ago. Since the present discrete optimization method can solve non-convex problems easily, the method challenges to overcome difficult problem in financial engineering and genome science, which are called "curse of dimensionality" and "missing heritability". We have obtained already outstanding results. These results suggest that the potential to significantly advance exist in the treatment of complex diseases such as high blood pressure, cancer, and schizophrenia.

研究分野：計算機科学、経営科学

キーワード：離散最適化 非凸最適化 経営科学 金融工学 ゲノム科学

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 複数の制約条件式をもつ非線形整数計画問題に対して、複数の制約条件式を単一の制約条件式で代理させる代理制約法は、非常に計算効率の良い解法である。しかし、代理双対問題の最適解が原問題の実行可能解とならない(代理双対ギャップをもつ)ことが多く、厳密解をもたらさないことが多い。仲川は、この代理双対ギャップを閉じ、原問題の厳密解を求めることができる改良代理制約法を提案した(日本オペレーションズ・リサーチ学会論文誌 2003 年)。この仲川が開発した改良代理制約法等を用いた離散最適化ソフトウェア群 HOPE(Hybrid Optimization Process Equipment)は、多次元非線形ナップザック問題の厳密解を高速に求めることができるソフトウェア群である。このソフトウェア群 HOPE は、小規模問題の厳密解は得ることができていた。

(2) この改良代理制約法は画期的な解法で、IEEE Trans. Rel.に掲載された論文(2007 年)では、約 10 年間、厳密に解くことはもとより、良い近似解を見つけることも難しい“超難問”33 問に対して、1 秒以下で厳密解と保証された解を見つけることに成功した。この研究成果に対して、IEEE のレフェリーからは明らかな“breakthrough”があると高い評価を受けた。さらに、線形のナップザック問題の難問として知られる、イギリスの Beasley のテスト問題を用いた実験において、新たに開発した問題分割技術を用いた改良代理制約法は、商用で最も速いとされている ILOG 社の CPLEX V.9.5 との比較では、5 制約 250 変数、500 変数の両方の場合に対して、数十倍高速であることが分かった。

(3) この研究成果は、世界的に影響力の高い学術雑誌である INFORMS Management Science 誌へ投稿し、約 6 年間で 4 回の修正の後、エディタから高い評価を得て条件付き採録の状態であった。その採録条件の一つである最新の CPLEX V.12.2 との比較では、いまだに数十倍高速であることが分かっていた。IBM 社(2008 年 ILOG 社を買収)の CPLEX との比較は、過去十年近く行ってきたが、V.7.5(電子情報通信学会論文誌、2004)、V.9.5(Management Science 誌初期原稿)、V.11(電子情報通信学会論文誌、2008)、V.12.2(Management Science 誌最新原稿)と常に計算時間では優っていた。仲川が時々改良・修正する程度のソフトウェアが、十年近くの間、世界最高速と評価の高い商用ソフトウェアに計算速度で優っていることは、本研究の重要性及び有用性を雄弁に語っていると云えた。

## 2. 研究の目的

(1) 非線形ナップザック問題を厳密に解くために開発した改良代理制約法に基づく標的

解法を用いて、先進的な研究成果を国内外の論文誌で発表している。この標的解法を用いたソフトウェア群HOPEを改良し、より強力な最適化ソルバの開発を目指す。従来は、標的解法を用いて、単一目的および多目的最適化問題の厳密解法を主として開発してきたが、実用面から重要である近似解法としての利用も目指す。さらに、大規模問題を短時間で解くための問題分割法による並列コンピュータへの適用法の開発、インデックス連動ファンダ作成技術とその応用、及びマーケティングの分野をはじめ社会科学分野の問題全般への適用を試みる。

単一目的多制約非線形ナップザック問題に対する標的解法アルゴリズムとソフトウェアの改良と高性能化を目指す。

組み合わせ最適化問題のエントロピーを用いた困難度評価法に対する研究の一層の発展を図る。

多目的多制約非線形ナップザック問題の全てのパレート最適解(有効フロンティア)を厳密に列挙する標的解法アルゴリズムとソフトウェア(電子情報通信学会論文誌、2011)の改良と高性能化を目指す。

(2) 標的解法の非凸の非線形最適化問題への応用を目指す。金融工学、マーケティング分野、信頼性工学等の分野において、標的解法の応用は既に成功している。この成果を踏まえ、更に、広範囲の問題解決に挑戦する。

## 3. 研究の方法

(1) 現在、標的解法を広範囲の分野に応用して、世界トップレベルの成果が出ている。今後も研究を順調に進展させて注目に値する成果を得るために、複数の研究課題を並行して進めることが可能であり、より有意義な成果が得られる課題を優先する。具体的には、下記の課題を並行して取り扱う。

多目的最適化問題の理論面の研究  
二目的最適化に関して、標的となる関数は二つの目的関数にウエイトを乗じて作成する。規模が大きい問題の場合、このウエイトが少ずれると列挙すべき解の個数が極端に増えることがある。この目的関数のウエイトを計算する部分の改良を行う。

単一目的最適化の厳密解法の高速度化  
標的解法は、問題の中の変数の統合により変数の数を減らす部分(統合部)と変数の数が減らされてできた問題の実行可能な解を完全列挙する部分(列挙部)から成っている。この統合部から列挙部への切り替え時期が、計算時間に大きく影響することが分かっている。特に、エントロピーを利用した問題分割法を使ったときには、大きな影響のあることが分

かっている。この列挙部への切り替えのタイミングを考慮した解法へ改良する研究を行う。

#### 単一目的最適化の近似解法

標的値の設定の仕方について研究する必要がある。標的値が大きすぎると解の精度が悪くなり、小さすぎると計算時間が多くかかるという問題がある。余分な計算時間をかけずに、良い近似解を求めるためのアルゴリズムを開発する。

#### 標的解法の非凸の非線形計画問題への応用

標的解法をインデックスファンド問題に適用する際、大域的最適解を求めるためにCube Walk Method を用いている。このとき外部反復において、従来から非線形計画問題で用いられる手法（ステップサイズルールあるいは信頼領域法）を新たに適用して、計算の高速化を図る。

#### リスクを考慮した意思決定への応用

意思決定者が希望する領域のパレート最適解を効率的に求めることができる多目的最適化技術を既に開発している。この技術を、消費者側の利害を考慮した生産者側のリスク管理システムの構築に応用するための理論的準備を行う。

#### 金融工学、統計学、経営学への応用

インデックス連動ファンド作成技術は、既に平成17年に電子情報通信学会論文誌に掲載済みである。このインデックス連動ファンド作成技術をプラスアルファファンドの作成に応用し、重要な成果を得ている。このインデックスプラスアルファ作成技術を理論面での改良と経済統計学のロジットモデルへの応用を推進する。また、経営学分野への離散最適化技法の応用を推進する。

#### 4. 研究成果

本研究課題を行って、成果の進んだものを以下に述べる。

(1) 仲川は、世界で初めてエントロピー（平均情報量）を用いて、線形及び非線形の離散最適化問題の困難度を測る尺度を提案した。大規模で困難度の高い問題に対して、解法ソフトウェア HOPE においては、この尺度は問題分割法に利用した後、変数の数が減らされた問題の実行可能な解を完全列挙している。多くの計算機実験により、この HOPE は、商用の厳密解法の IBM 社 CPLEX やその他の著名な解法ソフトウェアよりも、計算速度、並びに解の精度に関して、明らかに優れていることが示された。

これらの研究成果が、経営科学分野で世界最高峰の学術雑誌である Management Science 誌 (Vol.60 (3), pp.695-707, 2014) に掲載された。Management Science 誌における、最適化分野での掲載は日本人として 40

年ぶりである。

(2) 多目的最適化は、経済学でのゲーム理論や金融工学、さらには社会科学全般や工学等広範囲の応用分野があり、重要な研究分野である。しかし、現在の最適化技術は近似解法に偏っており、厳密にパレート最適解を求めようとする取り組みは極めて少ない。

HOPE を発展させ、多目的離散最適化において厳密解法の実用化に向けての成果が出ている。

一様乱数を用いた計算機実験では、問題規模が大きくなると、パレート最適解は他の実行可能解が集中して存在する場所から離れていることが分かっている。このことは、従来活発に研究されてきたヒューリスティックな解法では、意思決定者が希望するパレート最適解を正確に求めることが困難であることを示している。また、商用で最高速と言われる CPLEX を用いて Management Science に掲載された Sayin と Kouvelis の解法（2005年）でさえも、300変数の二目的で、一制約の0-1ナップザック問題において、厳密にパレート解を列挙することに失敗している。しかし、HOPE は既に2000変数規模のパレート最適解を厳密に列挙することに成功している（20th Conference of the International Federation of Operational Research Societies (IFORS), 2014）。

(3) 既存の解法では解くことが困難なタイプの非線形で非凸の最適化問題を、仲川が提案した離散最適化解法で容易に解ける（電子情報通信学会論文誌 2005年掲載）ことがわかっている。この成果を利用して、金融工学の難問やゲノム科学の「次元の呪い (curse of dimensionality)」や「失われた遺伝率 (missing heritability)」と呼ばれ、よく知られた難問の解決に向けて、すでに顕著な成果が得られている。ゲノム科学の難問の克服は、高血圧、がん、統合失調症等の複雑な病気の治療を大きく前進させる可能性がある（9th International Statistics Day Symposium (ISDS), 2014）。

(4) 離散最適化技術を経済学、経営学に応用して、意思決定に利用する場合は、如何に意思決定者に最適化の結果を見せるかが重要である。特に、多目的問題で3目的以上の最適化の場合、複数の目的関数値と複数の制約条件の間で互いに競合する場合の意思決定に関して、可視化技術を工夫することで意思決定を支援する一つの手法を提案することができた（関西大学総合情報学部紀要「情報研究」, Vol.38, 2013）。

#### 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 5 件)

仲川勇二, 企業・社会におけるリスク分散と離散最適化 (pp. 215-239), 『東アジア経済・産業のダイナミクス』, 関西大学経済・政治研究所東アジア経済・産業研究班(編), 関西大学出版部, 2015. 査読無し

Yuji Nakagawa, Ross J.W. James, Cesar Rego, Chanaka Edirisinghe, Entropy-based Optimization of Nonlinear Separable Discrete Decision Models, Management Science, Vol.60(3), pp. 695-707, 2014. 査読有り

仲川勇二, ノーマン・D・クック, 上島紳一, 林武文, 井浦崇, 多数目的非線形ナップザック問題の応用と可視化, 関西大学総合情報学部紀要「情報研究」, Vol.38, pp. 1-12, 2013. 査読無し

仲川勇二, 企業・社会におけるリスク分散と離散最適化, 関西大学経済政治研究所『研究双書』, Vol.157, pp. 205-224. 2013. 査読無し

仲川勇二, 社会・企業・個人のリスク分散と持続可能性 -最適化研究の立場から-, 関西大学経済政治研究所『セミナー年報2012』, pp.59-68, 2013. 査読無し

〔学会発表〕(計 2 件)

Y. Nakagawa, S. Kimura, R. J. W. James, C. Edirisinghe, Complete Efficient Frontier of Bicriteria Nonlinear Separable Discrete Optimization Problems with multiple constraints, 20th Conference of the International Federation of Operational Research Societies (IFORS), Barcelona, 2014.

Y. Nakagawa, Non-convex Portfolio Optimization and Regression for Genome-wide Association Study, 9th International Statistics Day Symposium (ISDS), Antalya Turkey, May 2014.

〔図書〕(計 0 件)

〔その他〕

なし

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

仲川 勇二 (NAKAGAWA, Yuji)  
関西大学・総合情報学部・教授  
研究者番号: 6 0 1 4 1 9 2 5

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

檀 寛成 (DAN, Hiroshige)  
関西大学・環境都市工学部・助教  
研究者番号: 3 0 4 3 4 8 2 2

井垣 伸子 (IGAKI, Nobuko)  
関西学院大学・総合政策学部・教授  
研究者番号: 4 0 1 5 1 2 5 3

小野 晃典 (ONO, Akinori)  
慶応義塾大学・商学部・教授  
研究者番号: 2 0 2 9 6 7 4 2

伊佐田 百合子 (ISADA, Yuriko)  
関西学院大学・総合政策学部・准教授  
研究者番号: 0 0 3 5 1 8 6 7