

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6月3日現在

機関番号：14303

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2012

課題番号：22560066

研究課題名（和文） 加工食品の安全管理に対するアルゴリズム・サイエンスからのアプローチ

研究課題名（英文） Algorithmic Viewpoints of Reliance in Supplying Food Products

研究代表者

軽野 義行 (KARUNO YOSHIYUKI)

京都工芸繊維大学・工芸科学研究科・准教授

研究者番号：80252542

研究成果の概要（和文）：本研究では，加工食品の製造や流通のプロセスを対象として，製品の安全管理に関わる三種類の最適化モデル，組合せ食品袋詰めモデル，繰り返し型二部的経路計画モデルおよび中間経由地点の物流量を考慮した輸送計画モデル，を構築した．これらの最適化モデルに対して，計算の困難性を解析するとともに，厳密解を求めるアルゴリズムや精度保証のある近似解を求めるアルゴリズムを設計した．

研究成果の概要（英文）：In this study, we constructed three kinds of optimization models arising in production and distribution of food products, combinatorial food packing models, repetitive bipartite routing models, and transit vector transshipment models, in order to consider the reliance in supplying food products from algorithmic viewpoints. We analyzed the intractability of the optimization models, and designed exact, approximation and heuristic algorithms.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	800,000	240,000	1,040,000
2011年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2012年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	2,500,000	750,000	3,250,000

研究分野：計画工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎・工学基礎

キーワード：(1) アルゴリズム (2) 数理工学

1. 研究開始当初の背景

アルゴリズムが現代社会に欠かせない存在になっている，ということが少しずつ，しかし着実に認識されつつあった．アルゴリズムは微積分に次ぐ第二の科学上最重要の発明であるという主張の登場（デイヴィッド・パーリンスキ『史上最大の発明 アルゴリズム 現代社会を造りあげた根本原理』，2001

年，早川書房，林大訳），計算の複雑さの理論の発展に根幹的な貢献をした R.M.カーブ博士の2008年京都賞受賞，などがその証左と言える．

生産システム分野でも，自動化や多種少量化の浸透とともに，スケジューリングの重要性に対する現場の理解が進んでいた．近年，現場の理解が急速に進んだ背景として，理論

研究の活性化を見逃すことはできない。すなわち、最適化モデルとそれらのアルゴリズムに関する研究成果が、拡大と整理を繰り返されて来たことによって、現場で起こるさまざまな問題を、より洗練された見方で観察することが可能になってきた。問題の適切な理解が、効果的な解決策の発見に有益であるということは、予てより指摘されている通りである。

アルゴリズムの設計方法や評価方法に対する適切な理解が広く社会に貢献するとは言えるものの、一方で、まだその恩恵に与っていないとは思えない現実問題が多数残されていた。研究開始当初、テレビや新聞で頻繁に取り上げられていたのは、CO₂ 排出規制、医師や看護師の不足、食品の産地や消費期限の偽装といった社会問題である。

2. 研究の目的

本研究では、加工食品の製造プロセスや流通プロセスにおける問題のうち、製品の安全管理に関わるものを、アルゴリズム・サイエンスの観点から考察することとした。つまり、生産システム分野において、スケジューリング理論が担って来たのと同様の役割を果たし得る最適化モデルを構築すること、そして、それらのアルゴリズムを設計することを目的とした。長期的な将来には、代表的な最適化モデルが出揃うことが望まれるが、本研究では先行研究で明らかになりつつあったものからスタートした。

機械製品や電気製品とは異なり、一般的な感覚として、食品が工業製品であるという認識を持つことはやや難しい。しかしながら、製造プロセスの自動化や流通ネットワークの広域化などを念頭に置くと、やはり（一部の）食品は紛れもなく工業製品としての側面を強く持っている。機械製品や電気製品が人の命や身体に重大な危険を及ぼさないように配慮されているのと同様に、工業製品としての食品に対しても、人の命や身体に重大な危険を及ぼさないような配慮が望まれる。

食品の産地や消費期限の偽装は、製造や流通のプロセスにおける地道な効率化への努力が、社会貢献を果たしつつも最終的には収益にも結びつく、という認識（あるいは信念）が軽視された結果であると言える。目先の収益に惑わされる過ちは、過去に何度も繰り返された。もちろん、今も完全に無くなったわけではないが、生産システム分野ではすっかり有名になった「企業の究極の目的とは何か？」（ゴールドラット、『ザ・ゴール』、2001年、ダイヤモンド社、三本木訳）という問いかけに見られるように、判断に迷った際の指針作りのために、より明示的な示唆が与えられるようになってきている。

食品の産地や消費期限の偽装そのものに

ついては、情報技術の活用や監視体制の強化といった個別の取り組みはもちろん必要で重要なことではあるが、本研究の目的はどちらかと言えば、食品製造の安全管理に関わる問題の共通概念形成、基盤形成構築の足掛かりを得ることであったことをこの機会に再確認しておきたい。

3. 研究の方法

本研究の目的を達成するため、最初に、検討事項を製造プロセスに関するものと、流通プロセスに関するものにカテゴリ分けを試みた。本研究では、製造プロセスに関する項目として、大体の加工食品の製造プロセスが含んでいるパッケージング工程を取り上げることにした。流通プロセスに関する項目としては、情報のやり取りを追跡するための経路計画と、流通網内の物流量を定める輸送計画の二つを選んだ。

二つのカテゴリのそれぞれに、つぎのような実施細目を設定し、研究はそのリストに沿って進めた。

(1) 製造プロセス

①袋詰め最適化モデルの構築. 具体的には、長期滞留現象による製品の品質劣化を避けるための目的関数、表示通りの製品製造を行うための制約条件、さらに製造システムの構成上の制約条件、などの設定である。

②アルゴリズムの設計. 実際の問題例の規模が比較的小さいので、動的計画法に基づいた厳密アルゴリズムの設計を主体とする。余力があれば、さらに高速なヒューリスティック・アルゴリズムの設計も行う。

③アルゴリズムの実装と実験的性能評価. 設計したアルゴリズムをC言語で記述し、厳密アルゴリズムについてはその実行時間を、ヒューリスティック・アルゴリズムについては実行時間に加えて解の質を調べる。また、実機のスループットに対して、アルゴリズムの実行時間がボトルネックにならないかの検討を行う。

(2) 流通プロセス

①経路計画および輸送計画に関する調査. 具体的には、基本モデルと適用分野の確認、国内流通と国際流通の現状調査、などである。

②経路計画および輸送計画に関する最適化モデルの構築. 前者では、情報が単に上流から下流へ流れるようなモデルとするのではなく、各段階での情報の相互確認作業を念頭に置いたモデルにする。後者では、中間経由地点の物流量が考慮できるようなモデルにする。

③計算の複雑さ、近似困難性の解析. まず、いわゆる NP 困難であるかそうでないかを確かめておく。さらに、定数近似可能かどうか

について、大体の感触を得ておく。特に、輸送計画では、基本モデルが多項式的な計算手間で解けるだけに、流通プロセス特有の条件が計算の困難性に与える影響について、見通しが必要である。

④アルゴリズムの設計。経路計画モデルと輸送計画モデルの両方に対して、近似解を求めるアルゴリズムを設計する。輸送計画モデルに対しては、ヒューリスティック・アルゴリズムを採用する可能性が高い。

⑤アルゴリズムの理論的性能評価。経路計画モデルに対しては、離散数学の助けを借りることによって、定数近似保証が得られそうである。輸送計画モデルに対しては、パラメータ化最悪性能保証を調べることになるだろう。

⑥保管スケジューリングに関する調査。本研究ではどちらかと言えば、流通プロセスにおける広域的項目を取り上げるが、マテリアル・ハンドリング領域の項目についても、少し調査を進めておく。相互関係が明らかになれば、広域的な最適化モデルの精緻化にも結びつくかもしれない。

⑦アルゴリズムの実装と実験的性能評価。設計したアルゴリズムをC言語で記述し、実行時間と解の質を調べる。設計したアルゴリズムにとって苦手なインスタンスがあれば、その特徴を明らかにし、性能の改善に努める。本研究の目的からすれば、近似保証が得られただけで満足せず、出来るだけ最適解の性質に迫る。

以上のように、研究方法としては、理論的取り組みが大半を占める。なお、得られた成果については、論文掲載や学会発表など審査や議論を経たものを中心に、正確な情報発信を心掛けた。加えて、食品製造の安全管理に対する意見交換などを行うため、ミニ研究集会を企画した。

4. 研究成果

以下に、二つのカテゴリのそれぞれについて得られた成果の要約を述べる。

(1) 製造プロセス

①標準型自動食品袋詰めシステムの組合せ最適化モデルに対して、合計重量目的関数の最適値の上界を導き出した。これによって、動的計画アルゴリズムの計算手間及び実際の実行時間を改善することが出来た。特に実行時間については、将来に期待される実機の機械的な高速化にも耐えるレベルで短縮化できたと考えている。また、理論的な興味として、全種類の極小解を列挙するために必要な計算手間を明らかにした。

②標準型自動食品袋詰めシステムの組合せ最適化モデルに対して、合計重量目的関数の

最適値からの許容誤差をパラメータとして導入したヒューリスティック・アルゴリズムを設計した。実際の問題例の規模が比較的小さいので、規模が十分に大きい問題例に対して導出した実行時間の短縮率をそのまま実現することは出来なかったが、長期滞留現象の防止や合計重量の誤差の評価も併せると、ほぼ当初の狙い通りのアルゴリズムが設計できたと言える。

③二層式自動食品袋詰めシステムの組合せ最適化モデルを構築した。この方式のシステムは、長物野菜の結束などに用いられる。計量ホッパと補助ホッパという機能の異なる二種類のホッパの挙動を記述しなければならないが、幸いにも線形一次不等式系の最適化モデルを構築することが出来た。また、動的計画法に基づいて、疑似多項式的な計算手間で動作する厳密アルゴリズムを設計することも出来た。

④複選択型自動食品袋詰めシステムの組合せ最適化モデルを構築した。これは、一部の実機が採用している疑似複選択型袋詰めとの比較を行うためのモデルである。これについても、動的計画法に基づいた疑似多項式的な計算手間で動作する厳密アルゴリズムを設計した。計算プロセスにある種の対称性を発見したので、実装に際してはその性質を利用した。対称性を利用した場合、利用しない場合の実行時間からおおよそ40%の削減が達成された。実験的性能評価の結果、実機が疑似複選択型袋詰めを採用することで、製品の合計重量に関する品質が、大きく劣化することはないということが分かった。

(2) 流通プロセス

①二部グラフ群の順列が与えられたときの繰り返し型二部的経路計画モデルを構築した。ある二部グラフにおける経路の決定が、それ以降に引き続く二部グラフ群における経路の最適化に影響を及ぼす。このような連続性の制約の影響を軽減するために、交互全域木の性質を活用した近似アルゴリズムを設計した。最短経路の各二部グラフにおけるセグメントを、交互全域木から得られるハミルトン閉路の長さと比較することによって、近似アルゴリズムの精度保証が近似比2であることを証明した。

②繰り返し型二部的経路計画モデルにおいて、二部グラフ群の順列決定問題を同時に取り扱った。当初、この最適化モデルの近似困難性がよく分からなかったが、ユニバーサル・グラフという概念を導入して、定数近似可能であることを証明した。後に、その近似比は6から3に改良された。

③保管スケジューリングの新しい最適化モデルを構築した。また、ネットワーク・アルゴリズムを適用したヒューリスティック・ア

ルゴリズムを設計するとともに、パラメータ化最悪性能保証を導出した。後に、その最悪性能保証に対する（漸近的に）タイトなインスタンスを発見した。

④ 中間経由地点への物流量の割当を考慮した輸送計画モデルを構築した。目的関数は総輸送費用の最小化である。まず、この最適化モデルの NP 困難性に対して、オリジナルの証明を与えた。証明には三次元マッチングからの多項式的リダクションを用いた。また、最小費用流問題への帰着を用いることによって、多項式的な計算時間のアルゴリズムで解ける特殊なケースを発見した。

⑤ 中間経由地点への物流量の割当を考慮した輸送計画モデルに対して、定数近似困難性を証明した。証明にはギャップ導入リダクションと呼ばれる概念を用いた。また、最小重み完全マッチングのアルゴリズムを用いたヒューリスティック・アルゴリズムを設計した。パラメータ化最悪性能保証の解析および実験的性能評価によって、実用的な挙動を示す問題例とそうでない問題例を特徴づけた。

なお、意図したことではないが、流通プロセスにおける経路計画と輸送計画という二つの最適化モデルは、調査の結果、いずれも特別なケースが、プリント回路基板の製造プロセスに現れる別々のマテリアル・ハンドリングの最適化モデルとしても説明できることが分かった。現実的には、ロジスティクスとマテリアル・ハンドリングとは、互いに区別して使われる言葉である。しかしながら、最適化モデルのレベルで共通の性質を説明することができるのであれば、本研究が目指した安全管理に対する基盤形成の達成にも波及効果があるかもしれない。

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 7 件)

① Yoshiyuki KARUNO, Kazushi TAKAHASHI, and Atsushi YAMADA, Dynamic programming algorithms with data rounding for combinatorial food packing problems, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, Vol.7, No.2, 2013, 233-243, 査読有.

DOI: 10.1299/jamdsm.7.233

② Yoshiyuki KARUNO, Hiroshi NAGAMOCHI, and Aleksandar SHURBEVSKI, Constant factor approximation algorithms for repetitive routing problems of grasp-and-delivery robots in production of printed circuit boards, Journal of the Operations Research Society of Japan,

Vol.55, No.3, 2012, 181-191, 査読有.

http://www.orsj.or.jp/~archive/pdf/e_mag/Vol.55_3_181.pdf

③ Yoshiyuki KARUNO, Hiroshi NAGAMOCHI, and Aleksandar SHURBEVSKI, An approximation algorithm with factor two for a repetitive routing problem of grasp-and-delivery robots, Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics, Vol.15, No.8, 2011, 1103-1108, 査読有.

<http://www.fujipress.jp/finder/xslt.php?mode=present&inputfile=JACII001500080018.xml>

④ Shinji IMAHORI, Yoshiyuki KARUNO, Hiroshi NAGAMOCHI, and Xiaoming WANG, Kansei engineering, humans and computers : Efficient dynamic programming algorithms for combinatorial food packing problems, International Journal of Biometrics, Vol.3, No.3, 2011, 228-245, 査読有.

DOI: 10.1504/IJBM.2011.040817

⑤ Kougaku YAMASHITA, Yoshiyuki KARUNO, and Mingzhe LU, An inapproximability of transshipment problems with permutable transit vectors, Journal of the Operations Research Society of Japan, Vol.53, No.3, 2010, 220-234, 査読有.

http://www.orsj.or.jp/~archive/pdf/e_mag/Vol.53_3_220.pdf

⑥ Yoshiyuki KARUNO, Tomoaki TACHIBANA, and Kougaku YAMASHITA, Complexity of the transshipment problem with a permutable transit vectors, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, Vol.4, No.3, 2010, 664-672, 査読有.

DOI: 10.1299/jamdsm.4.664

⑦ Yoshiyuki KARUNO, Hiroshi NAGAMOCHI, and Xiaoming WANG, Optimization problems and algorithms in double-layered food packing systems, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, Vol.4, No.3, 2010, 605-615, 査読有.

DOI: 10.1299/jamdsm.4.605

[学会発表] (計 8 件)

① Yoshiyuki KARUNO, Pseudo-polynomial time algorithms for food mixture packing by automatic combination weighers, International Symposium on Scheduling 2013, July 18-20, 2013, Tokyo Academic Park (Tokyo).

② 軽野義行, 袋詰め食品とアルゴリズム, システム制御情報学会サステイナブル・フレキシブル・オートメーション研究分科会, 2013

年5月8日、大阪大学中之島センター（大阪府）。

③ 軽野義行，自動食品袋詰め作業の組合せ最適化モデルに関する研究，一般社団法人日本機械学会生産システム部門研究発表講演会2013，2013年3月12日，中央大学（東京都）。

④ Yoshiyuki Karuno，Duplex and quasi-duplex operations in automated food packing systems，2012 IEEE/SICE International Symposium on System Integration，December 17，2012，Kyushu University（Fukuoka）。

⑤ Kaname YUDA（Yoshiyuki KARUNO），Scheduling vehicles of minimizing the number of dispatched staff members，The sixth International Conference on Leading Edge Manufacturing in Twenty-first Century，November 8，2011，Omiya Sonic City（Saitama）。

⑥ Aleksandar SHURBEVSKI（Yoshiyuki KARUNO），Approximating cyclic routing problems of grasp-and-delivery robots in production of printed circuit boards，International Symposium on Scheduling 2011，July 3，2011，Osaka University Nakanoshima Center（Osaka）。

⑦ Yoshiyuki KARUNO，Network transformation heuristics for multi-story storage rack problems，International Symposium on Scheduling 2011，July 3，2011，Osaka University Nakanoshima Center（Osaka）。

⑧ 軽野義行，複選択型食品袋詰め問題に対する動的計画法，社団法人日本機械学会2010年度年次大会，2010年9月6日，名古屋工業大学（愛知県）。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

軽野 義行（KARUNO YOSHIYUKI）

京都工芸繊維大学・工芸科学研究科・准教授

研究者番号：80252542

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：