

荷物の壊れやすさを制約とした2次元BINPACKING問題

藤村 歩^{1,a)} 村田 佳洋^{1,b)}

概要: 近年, コロナ禍により通販の注文は増加の傾向にある。また, そのような状況から運輸業の需要は増加している。積み込みの機会が増えるほど, 商品をより多く持ち運ぶ為, 破損の危険性が増す。我々はそこで荷物の壊れやすさを考慮した積み込みの効率化に注目した。荷物の積み込みはBINPACKING問題の一種として取り扱うことが出来る。荷台を一定数格納できるBINとして取り扱い, 顧客の荷物を積んでいく。そこで本論文では, 荷物の壊れやすさを考慮した2次元BINPACKING問題を定義する。壊れやすい荷物の上に重い荷物を乗せた際, そのような荷積みは行えない特徴を持つ。また, “効率的でかつ, 壊れないように2次元的に積む”近似アルゴリズムを提案する。この手法は代表的なBINPACKING問題の解法である, First-Fit法を利用している。

キーワード: BINPACKING問題, 組み合わせ最適化, 壊れやすい

Two-dimensional BINPACKING problem that constrains the fragility of luggage

AYUMU FUJIMURA^{1,a)} YOSHIHIRO MURATA^{1,b)}

Abstract: Recently, Online shopping are on the rise due to the corona disaster. the demand for the transportation industry is increasing. Carrying more goods increases the risk of damage. We focused on improving the efficiency of stacking considering the fragility of luggage. Loading luggage can be treated as a kind of BINPACKING problem. Treat the stacking platform as a BIN that can store a certain number, and stack the customer's luggage. In this paper, we define a two-dimensional BINPACKING problem that considers the fragility of luggage. When a heavy stack is placed on a fragile stack, such loading cannot be performed. We propose an approximation algorithm that is “two-dimensionally stacked so as not to break and efficient”. This method uses the First-Fit method, which is a typical algorithm for the BINPACKING problem.

Keywords: BINPACKING Problem, Combination Optimization, Fragile

1. はじめに

近年, コロナ禍により商品を遠隔で購入する機会や地方から都会への就職率の増加など, 離れた地域での荷物の運送を行う機会が増えてきた。そのような背景もあり, 運輸業への需要は高まっているといえる。

現在, 物流分野では物を効率よく配送する計画の考案が必要不可欠となっている。この解決手法として配送計画問

題が研究されている。

また, 運送業における荷物の積み込みはBIN PACKING問題(以下, BP問題)の一種として取り扱うことが出来る。本論文では, 荷物を積み込む荷台をビン(以下, BIN)として取り扱う。

BP問題はNP困難な組み合わせ最適化問題として知られ, 利用可能なBINに様々な寸法の荷物を積むことで構成される。目的は荷物の寸法・重量・体積やBINの最大重量・寸法など, 様々な制約を考慮しつつ最小数のBINを使用してすべての荷物を積むことである。

BP問題の解法には代表的な手法にFirst-Fit法(以下,

¹ 広島市立大学

Hiroshima City University

a) fujimura19@sos.info.hiroshima-cu.ac.jp

b) yoshihi-m@hiroshima-cu.ac.jp

FF 法, ある荷物が出来る限りピツタリ積み込める場所を見つける手法)[9][16] と, Best-Fit 法 (以下, BF 法, ある場所に出来る限りピツタリ積み込める荷物を見つける手法)[1]がある. FF 法は, 2 次元において BIN の左下から順に積めていくので bottom-left 法とも呼称される.

BP 問題は過去数十年間に多様な制約と目的の下で広く研究されている. 同様に 2 次元で行う研究以外にも 3 次元で行う BP 問題もまた, 幅広く研究されている. また, 重さに関して考慮された BP 問題の解法は数多く存在するが, 荷物 1 つ 1 つに対して耐久の値を取り, それぞれの荷物が潰れないようにするという手法は著者の知る限り無い.

本論文では FF 法を改良した手法を使った近似アルゴリズムを提案する. これは, 荷物の壊れやすさを考慮した 2 次元 BP 問題を解く上で, 荷物が潰れてしまうような積み方を避けるための工夫を組み込んでいる.

2. 配送計画問題

配送計画問題とは, デポ (depo) と呼ばれる拠点から運搬車, または配送車が, 運搬先の位置, 移動時間, 移動距離, 作業時間, 並びに利用可能な運搬車台数などを最小化する運搬経路を求める問題であり, 様々な分野で応用されている. デポから配送先へ運送するイメージ図を図 1 に示す. 図 1 の矢印は顧客の配送先へ向わなければならないことを示す. 出発点をデポとし, このお届け先をすべて通り, 最終的にデポに帰ってくる際の最短経路を求める問題が配送計画問題である.

このデポ間の配送も重要である. 遠隔地のデポ間の配送は直接的に結ばれておらず, 一旦ベースに荷物が集約され, 一定の地域ごとのデポに配送される. そこに送られることで, ようやく顧客のもとへ配送される. ‘デポが出荷先に向かう荷物を地域別に分けるデポ’ であるベースでは各地域のデポに届けることを主目的としている.

ベースでは大量の荷物の分類と積み下ろしを行う必要がある. さらに各地域のデポがお届け先に届けるための時間も考慮し, 早急な配送が要求されるため, 通常の配送計画問題とは異なる特徴を持つ.

また, 多くの荷物が配送所から配送所への行き来を大量に行おうとする関係上, 荷物破損の危険性がある. よってこの問題を BP 問題として捉え, その荷物の壊れやすさとして耐久を定めた.

3. 問題定義

3.1 概要

本章では, デポベースにおける BIN への積み込み問題を定義する. デポでは, 配達先の荷物をトラックに 1 個 1 個積み替えることは効率が悪い. また, 運送業における人手の減少は積み込む荷物が多くなり, 作業員一人当たりの負担も問題となりうる. さらに, トラックのサイズは多種多

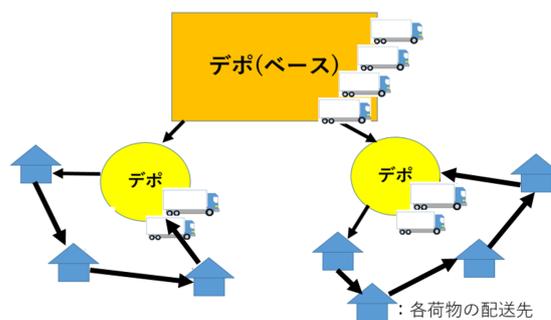


図 1 デポから配送先へ荷物を送る流れ

Fig. 1 Send packages from the depot to the delivery destination

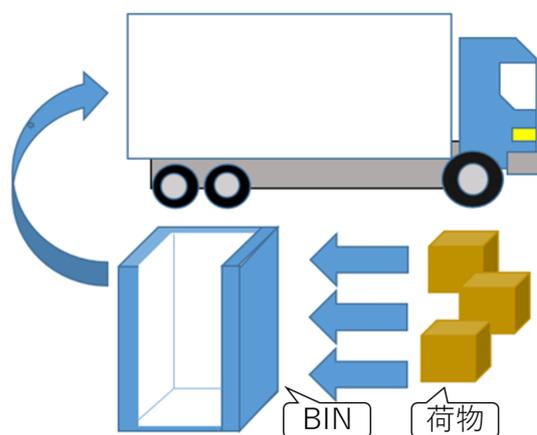


図 2 荷物をトラックに格納する流れ

Fig. 2 flow of stacking your luggage in the truck

様なので, 荷物は一定の大きさである荷台 (BIN) に積み, 荷台 (BIN) の数で調整すると管理しやすい.

そこで, デポではまず一定の大きさの BIN に荷物を積み, BIN 単位での管理をする. これによりまとまった量での積み替えができる利点がある.

荷物と BIN, 配送トラックの関係を以下の図 2 に示す. 配送トラックは決まった大きさの BIN を一定数格納できる. 図 2 の茶色の直方体群は荷物を表し, 青い容器物は BIN を表す.

さてここで, 効率よく BIN に積むことができれば, 必要な BIN の数を減らすことができる. 必要な BIN 数が減ると, それを手作業で運ぶ作業員の労力は減る. なおかつ, トラック台数を減らせることは, トラックの運転手の必要な人数が減り, 運輸業における問題の 1 つの人手不足の解消に役立つ.

こうして荷物が顧客へ配達されるまでに, 多くの荷物や配送所から配送所への行き来があるが, 荷物が破損してしまうと, その行き来も無駄になってしまい, 顧客からの不評を買ってしまいかねない (3.3 節で詳述).

そこでこの問題では, その壊れにくさを表す ‘耐久’ を各荷物それぞれに設定する. この耐久を超える重さが荷物にかからないような積み方を見つけなければならない.

3.2 BINPACKING 問題

BP 問題は NP 困難な組み合わせ最適化問題として知られ、利用可能な BIN に様々な寸法の荷物を積むことで構成される。目的は荷物の寸法・重量・体積や BIN の最大重量・寸法など、様々な制約を考慮しつつ最小数の BIN を使用してすべての荷物を積むことである。

BP 問題は過去数十年間に多様な制約と目的の下で広く研究されている [9]。同様に 2 次元で行う研究以外にも 3 次元で行う BP 問題もまた、幅広く研究されている [12]。また、重さに関して考慮された BP 問題の解法は数多く存在するが、荷物 1 つ 1 つに対して耐久の値を取り、それぞれの荷物が潰れないようにするという手法は著者の知る限り無い。

よって本論文では、荷物の壊れやすさを考慮した 2 次元 BP 問題を定義する。これは制約条件として、壊れやすい荷物の上に重い荷物を乗せた際に、下の荷物を壊してしまう（潰してしまう）と見なし、そのような荷積みは行えないという特徴を持つ。

BP 問題の解法には代表的な手法に FF 法や BF 法がある。

3.3 壊れやすさ

3.3.1 現場における壊れやすさ

荷物は、天然水などの飲料や紙類など非常に重いものから、コンタクトレンズや衣服類といった非常に軽いものがそれぞれ存在する。

それらすべてが一緒くたに流れてくるため、脆い荷物の上に重い荷物を置いてしまうと、脆い荷物が重さで潰れてしまう。

軽い荷物＝脆い荷物とは限らない。重い脆い荷物も、軽い丈夫な荷物も存在する。よって、重い荷物を負担の小さい BIN の下の箇所へ、軽い荷物を上の BIN の上の箇所へ置くことが難しい場合がある。

そんな状況でも寸法に収まる荷物を上下で重ねることが出来れば、荷物にかかる負荷がかかりにくい。たとえその荷物より重い荷物が上にかかっている場合でも、荷物が潰れることは少ない（状況による）。

基本的には、下側の荷物には上側のすべての荷物の重さがかかる。重さのモーメントがどうかかるか、また荷物の強度を厳密に考慮・計算することは難しい。

よって、各荷物の上下に接している荷物の耐久に関する計算が重要である。荷物とその荷物を含む BIN の荷物集合から、その荷物にかかる加重を計算する。

3.3.2 壊れやすさの考慮

本論文では、耐久を各荷物それぞれに設定することで、その荷物の耐久度を表す。

もしその耐久を超える重さが荷物にかかればその荷物は

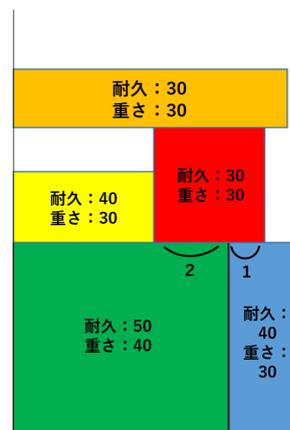


図 3 荷物の加重の分散

Fig. 3 Dispersion of luggage weight

重さに耐えきれず、荷物が潰れてしまう。

耐えきれない重さによって潰れてしまう積み方を禁じる制約条件を課す。

例として以下に図 3 を示す。

この図は、制約条件を満たしている荷積み組合せの 1 つである。

例えば赤の荷物（重さが 30、耐久が 30）は、下辺が 2 つの荷物の上辺と接している。本論文では接している面積比により、かかる重さの比率を計算する。緑の荷物（重さが 40、耐久が 50）には同様に接しているの青の荷物（重さが 30、耐久が 40）と比べて、2:1 の比率で接している。よって重さも合計 50 の重さが 2:1 でかかることになり、緑の荷物（重さが 40、耐久が 50）の荷物には合計で 50 の加重がかかる。

“耐久-加重” が非負であるのでこの荷積みは可能である。

3.4 重さ比重の簡単化

本論文では上辺と下辺で接する荷物という状況下のみで重さの計算を行う。上辺と底辺の接触だけを考慮し、ここでは荷物が傾いて寄りかかる場合等を考慮しない。

現実世界の荷積み問題は 3 次元的問題であるが、今回は簡単化のため 2 次元の問題として取り扱う。しかし、2 次元的な荷物の上辺と底辺の接触は、3 次元的な荷物の上面と底面の接触として容易に拡張可能である。

3.5 リアルタイム性の導入

現場では荷積みは手作業が手作業で行われている場合、時間も有限であるため、より難解となる。そこで今回はオンライン問題としても取り扱う。

オンライン環境では、次々と荷物があるが、次に来る荷物を正確に知ることはできない。しかし、現実世界ではある程度予測できることがある。

例えば、製造業や一般企業が同じ荷物を複数同時に購入することが珍しくなく、また特定個人が同じパターンで何度もまとめ買いすることもある。このような場合、いくつかが荷物が流れてきた段階で、どの程度続くか、次に何が来

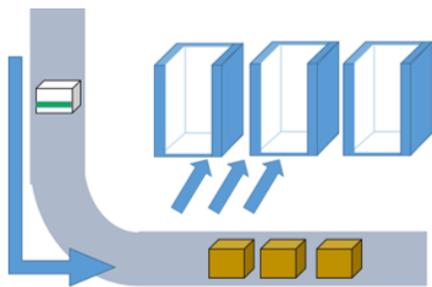


図 4 荷物がベルトコンベアから到着する様子
 Fig. 4 Luggage arriving from the conveyor belt

るかを予測できる場合がある。この予測を利用できれば、効率的に荷積みできる場合があると考えられる。

また、従来の BINPACKING 問題においては、すべての BIN を好きなタイミングで利用することができる。

しかし、実際の荷積み現場においては大量の BIN を置いておくスペースの確保は難しく、また可能な限り早く出荷したいという要求がある。

そこで本論文では、荷積みのために選択可能な BIN の数は有限であり、新しい BIN を利用しなければいずれかの BIN を出荷しなければならない（もはや新たに荷積みすることはできなくなる）とする。

4. 提案手法

4.1 概要

本研究では FF 法を元に作成した独自の手法を二点紹介する。1つ目はハイブリッドアルゴリズム、2つ目は改良 FF 法である。

これらを構成要素として、まず本問題の制約条件を適用した FF 法と BF 法を解説する。

4.2 2次元 First-Fit 法の特徴

2次元 First-Fit 法では、初めに荷物を積み込む順序を定める。そして、順序のまわって来た荷物を、できる限り最初の BIN でかつ、注目している BIN の底に近く、高さが同じであれば、より左に積み込むことを繰り返す手法である。だが、寸法・重さの2点の制約条件を満たさなければ荷物を積むことはできず、BIN を更新する。更新とは BIN を新しく用意したと見なし、既存の BIN の注目を止め、空の BIN に注目する。

図9に積み方の例を示す。1の荷物を積んだ後、2の荷物は BIN の底に接しながら積むことは寸法上出来ない。よって一番底に近く、寸法的に入る1の上に荷物が積まれる。

遺伝アルゴリズムやタブーサーチを用いたアルゴリズムでは、荷物を積み込む順序を多様に変えていく手法もある。

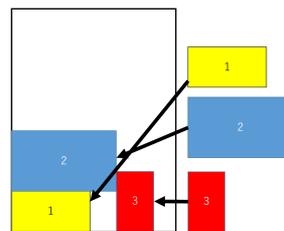


図 5 2次元 First-fit 法
 Fig. 5 First-fit method

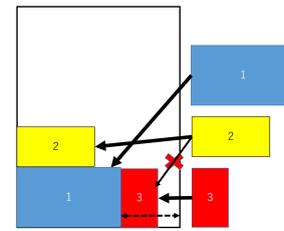


図 6 2次元 Best-fit 法
 Fig. 6 Best-fit method

しかし今回の壊れやすさを制約とした問題では、寸法とは別に重さによる制約条件が存在する。より頑丈な荷物をできるだけ下に置くことが、より重さの制約条件を満たすことが出来るので、耐久の昇順で荷物を積んでいくものである。注目している BIN 内に積める場所がなければ、次の BIN に注目する。

これは今回の問題に合わせ、寸法のみを昇順でソートする一般的な FF 法を改造したものである。また、これは後に説明する提案アルゴリズムの部品として使う。評価実験における比較手法の FF 法はこのアルゴリズムを使用している。

4.3 2次元 Best-Fit 法の特徴

BF 法は注目している隙間を最大限に利用できる荷物を探索し、積み込むことを繰り返す手法である。制約条件を持たない環境下では、この BF 法は FF 法より高い解の精度を持つことが知られている。

図10に積み方の例を示す。図9と同じ形状の荷物が3つあるとする。横幅の隙間の広さをもとにこの荷物群から積む荷物を決めていく。BIN の横幅をより隙間なく積める1の荷物をまず最初に積み、さらにその1の荷物の右部分にできた隙間により隙間なく積める荷物を探す。2は隙間以上の横幅を持つため不採用になり、隙間に収まる3の荷物が1の荷物の右部分には収まった。こうして右部分の隙間に入る荷物を探す。

しかし、今回は BF 法においても、寸法とは別に重さによる制約条件が存在する。探索を行い、積む荷物を採用するために、重さ制約を満たしていなければならない。

これも FF 法と同様、今回の問題に合わせ、寸法のみで荷積みの判定を行う一般的な BF 法を改造したものである。また、これも後に説明する提案アルゴリズムの部品として使う。評価実験における比較手法の BF 法はこのアルゴリズムを使用している。

4.4 ハイブリッドアルゴリズム

FF 法を使用して BIN に荷物を積んだ際、残った横幅が α (アルゴリズムのパラメータ、実験では 1/3) 以下となった時に BF 法の荷積みの手法へと切り替えるという特色があ

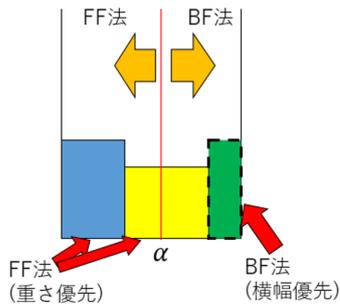


図 7 ハイブリッドアルゴリズムの特性
 Fig. 7 Characteristics of hybrid algorithm

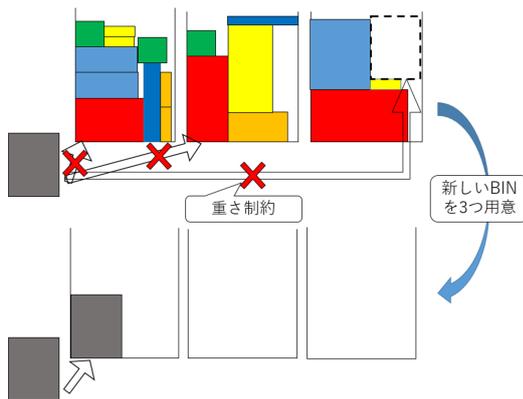


図 8 改良 FF 法の BIN の追加更新条件
 Fig. 8 Additional update conditions for BIN of the improved FF method

る。図 7 にその挙動の一例を示す。FF 法は耐久のある荷物を優先して積むこと、BF 法は隙間を埋めるような寸法の荷物を優先して積むことが利点である。この 2 つの利点を組み合わせたアルゴリズムがハイブリッドアルゴリズムである。

4.5 改良 FF 法

通常の FF 法はすべての BIN にいつでも荷積み可能であるときのアルゴリズムであるが、本研究の問題では荷積み可能な BIN の数に制限がある。

そこで、この制限下でうまく働くように BIN の更新法に工夫を加えた改良 FF 法を提案する。

ある荷物を 10 個連続で積むことが出来ない BIN があった場合や、積もうとしている荷物が“積みたい候補の BIN3 つ”すべてに積むことができない状況(図 8 の状況)という特殊条件でも BIN を更新するようになっている。

改良 FF 法は本問題を解くために BIN の更新条件がより精密になっているといえる。

5. 評価実験

提案したハイブリッドアルゴリズムと改良 FF 法での探索効率を調べるための評価実験を行った。この実験では

ランダムで生成された 1000 個の荷物の様々なインスタンスを用いて、それぞれの必要 BIN 数を求めた。比較手法には、本問題の制約条件を適用した FF 法と BF 法を使用した。

実験結果を表 1 に示す。様々なインスタンスに対し、それぞれの手法を使い BP 問題を解いた。数値は解くために必要な BIN の数である。値が小さい方が少ない BIN 数で荷積みを完了したということであり、良い解である。

提案する 2 つの手法は FF 法と BF 法のどちらにも平均必要 BIN 数を削減することが出来た。また、改良 FF 法が、ハイブリッドより僅かに下回った。

しかしインスタンスごとに調査すると、BF 法、ハイブリッドアルゴリズム、改良 FF 法のどれも最小を取る時があった。つまり、常に提案手法の性能が良いというわけではなかった。

中でも、改良 FF 法は最終的な BIN 数の平均が他の手法に比べ、最低でも 3.48 %削減出来ていることが確認できた。

表 1 様々なインスタンスにおける必要 BIN 数

	FF 法	BF 法	ハイブリッド	改良 FF 法
インスタンス A	49	43	46	46
インスタンス B	51	68	48	47
インスタンス C	53	48	48	50
インスタンス D	47	46	44	42
インスタンス E	60	56	56	55
...
平均 BIN 数	54.4	51	48.9	47.2

(必要 BIN 数, 単位: 個)

改良 FF 法により積まれた BIN のうち特徴的なものを紹介する。図 9, 図 10 は改良 FF 法によって荷物が BIN に積載され終わった結果の一例である。

図 9 は BIN の 3 分の 1 程でしか積むことが出来ていない。これは、この BIN に重さ制約の都合上、10 個以上積むことが出来ない状況になっていたか、積もうとしている荷物が“積みたい候補の BIN3 つ”すべてに積むことができない状況のどちらかに当てはまり、BIN のこの状態で更新してしまったものと推測される。改良 FF 法で解かれたインスタンス A の 34 個目の BIN であるので、合計 46 個分の BIN を利用している。これが最後の BIN であったということも考えづらい。

図 10 はうまく重さと寸法の制約条件をかいくぐり、多くの荷物を積載出来た BIN の一例である。しかし、荷物が上面と下面で接しているものの、少ししか接していないものもある。

6. まとめと今後の課題

本論文では、荷物の壊れやすさとリアルタイム性を考慮

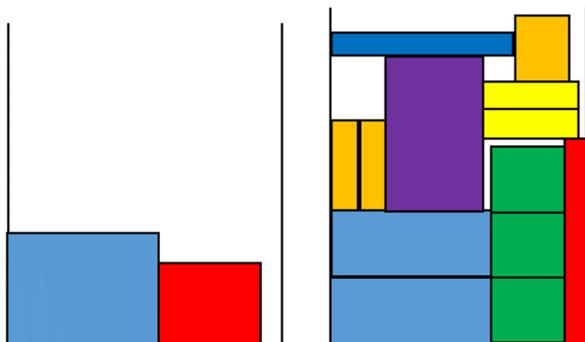


図 9 改良 FF 法の荷台 A 図 10 改良 FF 法の荷台 B

Fig. 9 BIN A of FF method Fig. 10 BIN B of FF method

した 2 次元 BP 問題を定義した。これは制約条件として、壊れやすい荷物の上に重い荷物を乗せた際に、下の荷物を壊してしまう (潰してしまう) と見なし、そのような荷積みは行えないという特徴を持つ。

また、FF 法と BF 法の両方の手法を使ったハイブリッドな近似アルゴリズム、FF 法をより、重さ制約の状況に適応した改良 FF 法の 2 つを提案した。どちらも、荷物の壊れやすさを考慮した 2 次元 BP 問題を解く上で、荷物が潰れてしまうような積み方を避けるための工夫を組み込んでいる。

様々なインスタンスを用いて荷積みの各手法の挙動を理解した。その結果、平均 BIN 数において、実装した改良 FF 法が最小の値 48 を記録できた。

今後の課題としては、配送において荷物の取り出しやすさも重要な要素であるため、取り出しやすさを考慮する等が挙げられる。また、実験結果において、上辺と底辺で接した荷物同士でしか重さ制約の計算を行っていないため、実際の現場 (現実の重力下) ではありえないような空白部分ができてしまっていた。その問題の解決のため、プログラムの簡単化のために省略したモーメント計算を導入すれば、さらに現実の問題に近い問題として取り扱うことが出来るだろう。

参考文献

[1] 田中勇真, 川島大貴, 今堀慎治, 柳浦睦憲, “3 次元箱詰め問題に対する構築型解法の効率的実現法” 情報処理学会, Vol.2013-AL-144 No16, 2013.
 [2] 日本銀行統計調査局 “日本銀行 時系列統計データ検索サイト” <http://www.stat-search.boj.or.jp>
 [3] 松井俊浩, 米口達也, “複数配送経路問題における経路比較指標の局所探索への影響の一検討” 情報処理学会 Vol.2019-ICS-195 No.4 3/18 2019.
 [4] 三橋一郎, 大山口通夫, 野呂耕三, “厳密解法と発見的手法の組合せによるサイズ可変瓶パッキング問題の解法” 情報処理学会, pp.275-282, 2009.
 [5] 宮武宏輔, 根本敏則, 林克彦, “宅配便ネットワークにおける「チーム集配」導入のための配送密度条件”, 交通学研究 第 59 号 pp.205-212. 2016.

[6] 向直人, 馮鈞, 渡邊豊英, “時間制約付き車両配送問題における顧客満足度に基づいた CVTPR-Tree 手”, 日本データベース学会 Letters, Vol.2, No.3, pp.5-8, 2003.
 [7] 野貴泰, 糸井川栄一 “犯罪多発地点の予測に基づく防犯パトロール経路に関する提案”, 地域安全学会論文集, No.31, pp.195-204, 2017.
 [8] B.Chazelle: “The bottom-left bin-packing heuristic: an efficient implementation”, IEEE Transactions on Computers, C-32, pp.697-707, 1983.
 [9] D.Liu, H.Teng: “An improved BL-algorithm for genetic algorithm of the orthogonal packing of rectangles”, European Journal of Operational Research, 141, pp.410-420, 1999.
 [10] E.Dube Leon R.Kanavathy “OPTIMIZING THREE-DIMENSIONAL BIN PACKING THROUGH SIMULATION”, Proceeding of the Sixth IASTED International Conference, pp.1-7.2006.
 [11] J.Kaabi, Y.Harrath, H.E.Bououdina, A.T.Qasim : “Toward Smart Logistics: A New Algorithm for a Multi Objective 3D Bin Packing Problem” Smart Cities Symposium 2018, page (5 pp.), 2018.
 [12] K.Bernhard, V.Jens, “Bin-Packing”. Combinational Optimization: Theory and Algorithms Algorithms and Combinatorics 21. Springer pp. 426-441, 2006.
 [13] P.Leon, R.Cueva, M.Tupia, and Goncalo Paiva Dias : “A Taboo Search Algorithm for 3D Binpacking Problem in Containers” Springer pp.229-240, 2019.
 [14] P.Healy, M.Creavin, A.Kuusik: “An optimal algorithm for rectangle placement”, Operations Research Letters, 24 pp.73-80 1999.
 [15] S.Eun, J.Jung, Y.Yun, S.Cha, “A mathematical Study on Weight Balancing in 2D Meshes and It’s Application to En gineering Problems”, IEEE, pp.70-72.2019.
 [16] S.Imahori, Y.Chien, Y.Tanaka, M.Yagiura: “Enumerating bottom-left stable positions for rectangles with overlap” 第 9 回情報科学技術フォーラム (FIT 2010) 講演論文集 (第 1 分冊), pp.25-30, 2010.