

航空貨物コンテナの最適詰め込みと
大都市災害における緊急物資の最適配送計画
Packing Optimization For Cargo Container
And a delivery plan of emergency supplies in metropolitan disaster

矢野 夏子

Yano Natsuko

(株)構造計画研究所

KOZO KEIKAKU ENGINEERING Inc.

斉藤 努

Tsutomu Saito

(株)構造計画研究所

KOZO KEIKAKU ENGINEERING Inc.

小玉 乃理子

Noriko Kodama

独立行政法人 防災科学技術研究所

National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention

和文概要 初めに、3次元詰め込み問題を取り上げる。対象問題は、箱の形状を持つ貨物を、1つ以上のコンテナもしくはパレットに積載する位置を自動的に決定する積み付け問題である。コンテナや貨物に関する様々な制約下で、積載体積が最大となるような積み付けプランを決定する。本講演では、詰め込みアルゴリズムを用いた反復局所探索法によって、効率的な積載プランを作成するアルゴリズムについて紹介する。次に、大地震時に、物資集積所(デポ)から避難所への配送計画の作成についての解法を述べる。配送計画は、多スタート挿入法を用い、一度に運べない場合の物資の自動分割及び、車両の複数回転も考慮する。デポは1箇所とする。緊急物資配送の特性から、目的関数は最大配送時間の最小化となる。

キーワード : 組合せ最適化 反復局所探索法 3次元箱詰め問題 コンテナ積み付け
災害、大地震、緊急物資、配送計画、多スタート挿入法、物資分割、複数回転

1 航空貨物コンテナの最適詰め込み：概要

貨物輸送において扱われる貨物は、パレットやコンテナに積み付けして輸送機・船舶に搭載される。パレットやコンテナへの積み付け作業は、従来経験に基づいて人手で行われている場合が多い。ところが、貨物には、上積み禁止や、積み込み向き、重心など、考慮すべき点が多い為、熟練者でないと、その詰め込みプランを検討するのは困難であり、試行錯誤を繰り返して作業を行っている。また、最近では、小口の貨物も増加しており、1つのコンテナを複数の荷主で使用することも増えており、積み付けプランの作成は、より複雑なものとなっている。

そこで、コンテナや貨物に関する様々な制約にも対応可能な、積み付けアルゴリズムを開発することで、効率的な積み付けプランを、自動的に作成することを実現する。これにより、熟練者に代わって短時間でプランを作成し、必要なコンテナ本数を把握することが可能となる。また、ムダな輸送器(パレット、コンテナ、トラックなど)を減らすこともできるようになる。

2 航空貨物コンテナの最適詰め込み：問題

2.1 構成

貨物情報、コンテナ情報が与えられた時に、コンテナに積載できる体積を最大化することを目的とした積載プランを作成する。

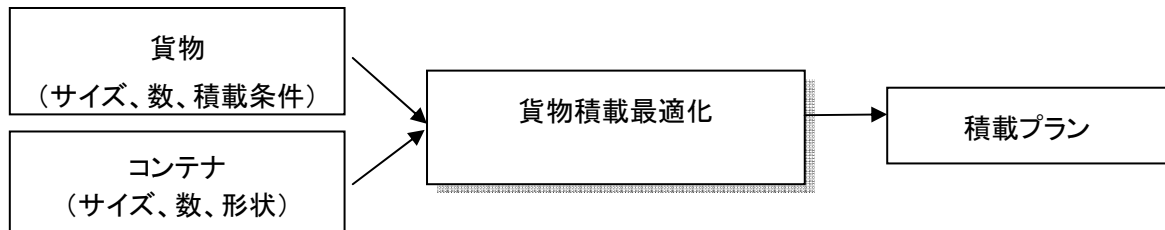


図 1 構成

2.2 システムへの条件

積み付けシステムへ求められる条件としては、主に以下のようなものが挙げられる。

- ① 複数コンテナへの同時積み付け
- ② 積み付け禁止エリアの考慮
- ③ 追加積み付けへの対応
- ④ 積み付け条件への対応

複数コンテナを対象とする際には、分散して積み付けないように、使用コンテナ数を最小化することも目的となる。④の積み付け条件について、以下に述べる。

2.3 積み付けの条件

コンテナへの貨物を積み付ける時には、段積み制約など様々な現実的な制約がある。積載プラン作成時には、そのような現場の制約を満たしたものでなければならない。貨物に関する主な条件には、

- ① 段積み制約(上積み禁止/平置きなど)
- ② 回転(XY 方向)の制約
- ③ 優先貨物
- ④ 重心位置

などがある。コンテナに関しても、単純な直方体ではなく、コンテナ内部にある突起や、積載禁止エリアを考慮しなければならない。また、いくつかの貨物の積み付け位置が指定される場合もある。

2.4 目的関数

目的関数は以下の最大化とした。

$$\text{積載体積} + \text{積載優先貨物の数} \times \alpha - \text{パレット枚数} \times \beta - \text{重心} \times \gamma$$

なお、貨物の回転に関する制約は、局所探索法へ適用することとし、その他の積み付けの条件は、積み付けアルゴリズムに加えることにした。

3 航空貨物コンテナの最適詰め込み：解法

3.1 詰め込みアルゴリズム (BLD 法)

詰め込みのアルゴリズムとして、BL 法 (bottom left algorithm) [1] を 3 次元に拡張した BLD (bottom left depth algorithm) 法を適用した。BL 法とは、「積載対象貨物に番号をつけ、その順に従って、なるべく下 (bottom)、同じ高さであればできる限り左 (left) に詰込む。という事を繰り返して積載する方法」である。

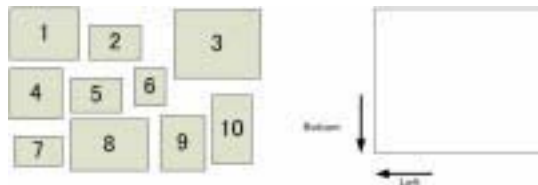


図 2 BL 法

BL 法の手順は以下の通り。

- ① 初期状態では、長方形の左下の 1 点が積載候補位置。貨物の左下の点を置く位置の候補を「積載候補点」と呼ぶ
- ② 候補点に貨物 1 を積載する。
- ③ すると、積載候補点は下図のように 2 点になる。優先度は AB の順
- ④ 2 点の候補点の優先順位は「AB」の順であるので、A の位置に貨物 2 を積載する。A に積載できない場合は、B に積載する。
- ⑤ すると、積載候補点は下図のように 3 点になる。優先度は CDB の順。
- ⑥ これを全ての貨物に対して、繰り返す。

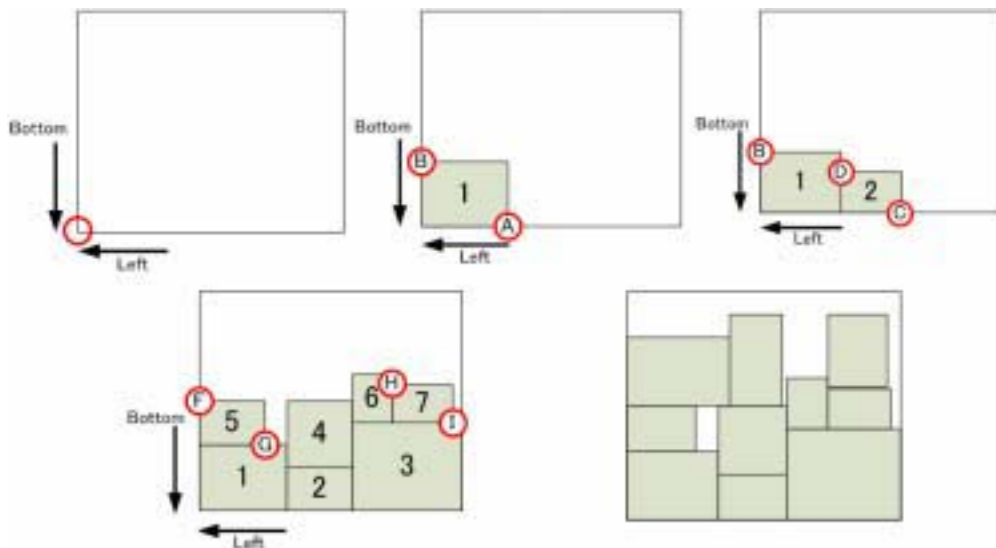


図 3 BL 法手順

これを 3 次元に拡張する。つまり、**BLD 法**は、「積載対象貨物に番号をつけ、その順に従って、なるべく下 (**bottom**)、同じ高さであればできる限り左 (**left**)、できる限り手前 (**depth**) に詰込む。という事を繰り返して積載する方法」となる。

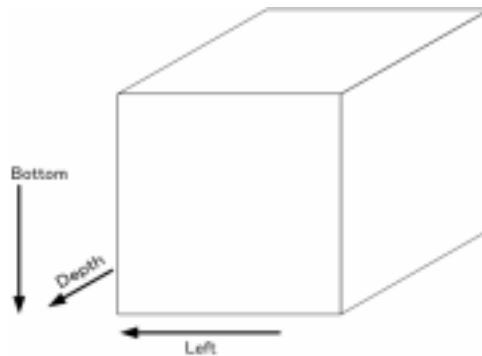


図 4 BLD 法

BLD 法の手順は以下の通り。

- ① 初期状態では、コンテナの積載候補点は、左下の 1 点のみ。
- ② その候補点に貨物を積載する。
- ③ すると、候補点は右図のように 3 点になる。優先度は **ABC** の順
- ④ これを全ての貨物に対して、繰り返す。

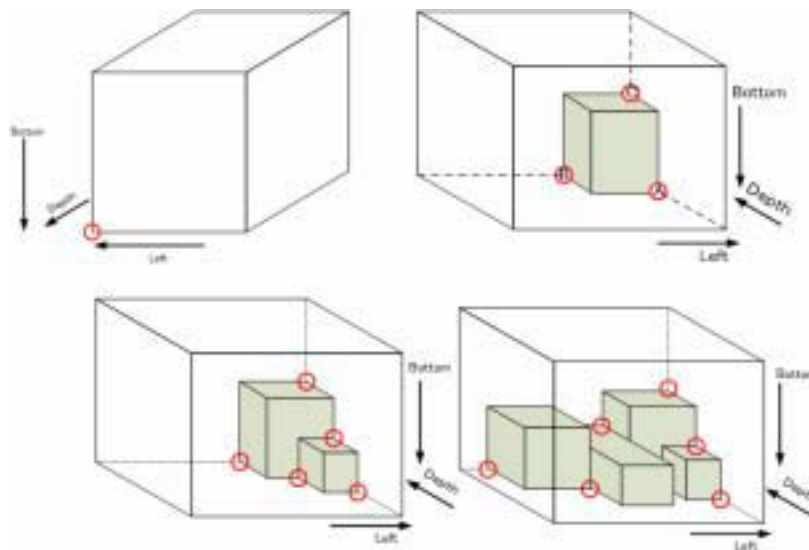


図 5 BLD 法手順

3.2 制約条件への対応

積載候補点へ貨物を積み付ける時に、以下の制約条件を考慮する。

- ① 段積み条件
- ② はみ出し可能量

3.3 BLD 法の改良

BLD 法では、貨物の並び順が解の良し悪しに大きな影響を与える。そこで、BLD 法の改良として、反復局所探索法を用いて、より良い並び順を探索することにする。また、貨物の XY 方向の回転についても探索を実施する。

基本フローは下図の通りである。ある貨物の並び順に対し、スワップ近傍操作（2つの貨物の順番を入れ替える）をする。また、貨物の指定した反復回数だけ、貨物の並び順(初期解)を変えてこの操作を繰り返す。

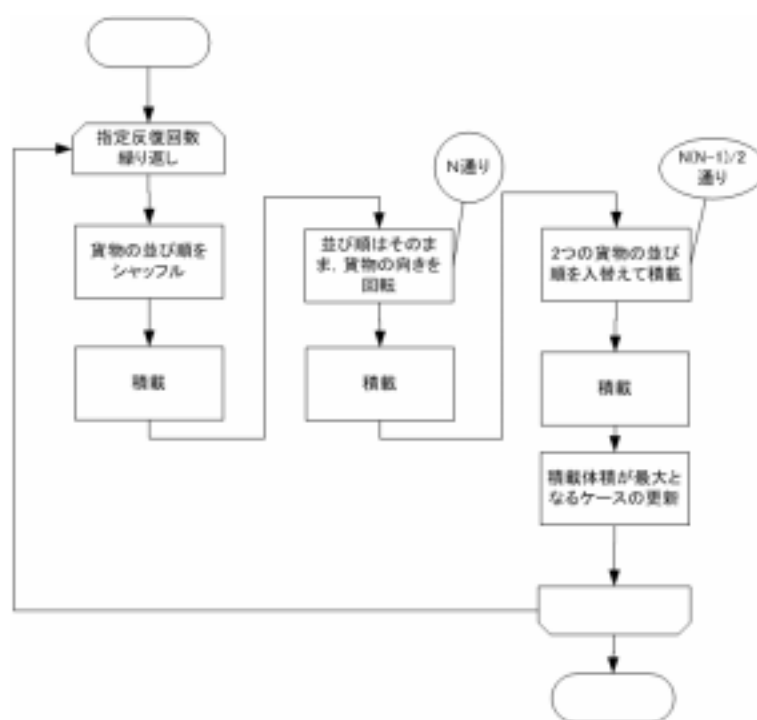


図 6 基本フロー

4 航空貨物コンテナの最適詰め込み：結果

最適化アルゴリズムの結果得られた積み付けの様子を下図に示す。BLD法により貨物が積み付けられていることがわかる。

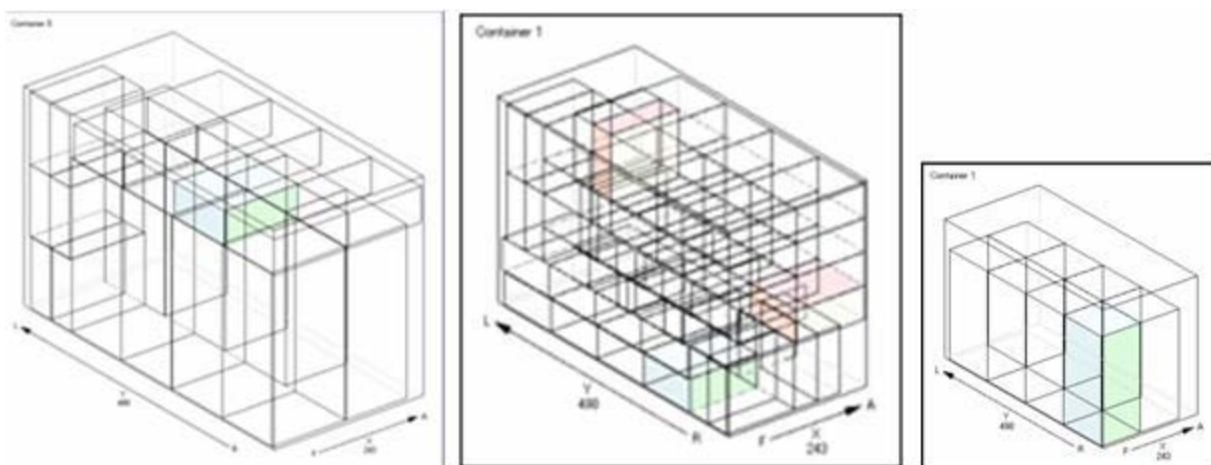


図 7 積み付け結果

5 航空貨物コンテナの最適詰め込み：まとめ

以上のように、航空貨物コンテナの最適詰め込みでは、BLD法と局所探索法を組み合わせた最適化アルゴリズムによって、効率のよい積み付けプランを作成することができた。上積み禁止などの制約や、コンテナの形状による制約もモデル化することができ、現場で使える積み付け結果を作成することができた。ただ、同種の貨物がばらばらの位置に積み付けるプランになりやすいなど、人が積みつける場合に比べて、作業しづらい点もあることもわかった。

6 大都市災害における緊急物資の最適配送計画：概要

危機管理意識が高まる中、大地震発生時の避難者支援の整備が望まれている。1995年の阪神・淡路大震災では、30万人の避難者を出し、2004年の中越地震では、10万人の避難者を出し、今も仮設住宅での生活を余儀なくされている方がいる。

首都圏や京阪神などの大都市圏において阪神・淡路大震災級の被害をもたらす大地震が発生した際の人的・物的被害を大幅に軽減する目的で、文部科学省が推進している大都市大震災軽減化特別プロジェクトを推進している。

防災科学技術研究所 川崎ラボラトリーでは、大都市大震災軽減化特別プロジェクトの一環として震災総合シミュレーションシステムの開発している。このシステムは、種々の地震災害シミュレーションや、人々の対応行動のシミュレーション結果から、自治体災害対応を支援する情報を提供するものである。

本論文は、大地震時に、物資集積所(デポ)から避難所への配送計画の作成についての解法を述べる。

7 大都市災害における緊急物資の最適配送計画：問題

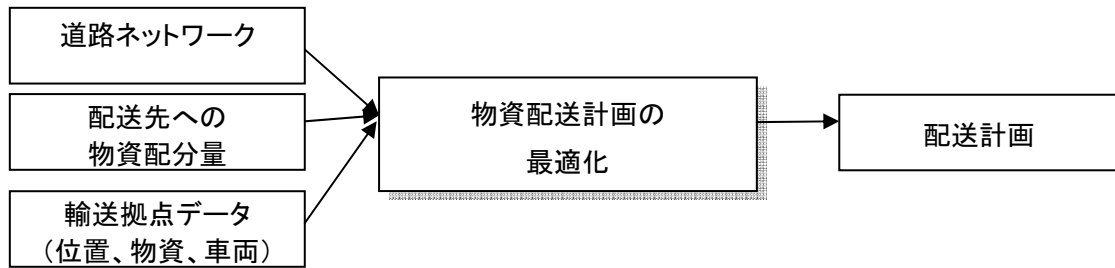


図 8 構成

道路ネットワーク、配送すべき物資配分量、デポ及び避難所の拠点情報、車両情報が与えられたときに、全物資を配送するのにかかる最大配送時間を最小化することを目的とする。

8 大都市災害における緊急物資の最適配送計画：解法

目的は、全車両を用いても、全物資を最短時間で運ぶことである。

ここでは、挿入法により、配送計画を作成する。(挿入法では、厳密な最適解が得られる保証はない。)

挿入法により、配送計画を作成する。また、精度を上げるために、挿入法をランダムに繰り返す多スタート法とする。ランダムさは、デポから避難所までの距離に入れる。

1 車両は複数往復が可能とする。積載制約は、重量のみとし体積は考慮しない。

移動手段は車両のみとする。船や鉄道は考慮しない。

車両はいつでも利用可能とする。ネットワークは時間経過により利用可否が変わらないものとする。

車両は、平均移動速度を持ち、道路リンクは移動速度係数を持つ。これらは、時間経過により値が変わらないものとする。

一度に配送できないときは、物資を分割する。また、1 往復で運べないときは、複数往復（複数回転）する。1 回転は、デポを出発してデポに戻るまでである。

単純に、最大配送時間を最小にしようとすると、以下のようなルートが作成されてしまう可能性がある。

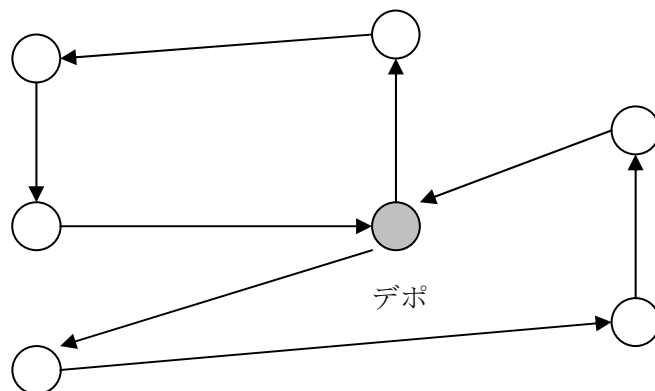
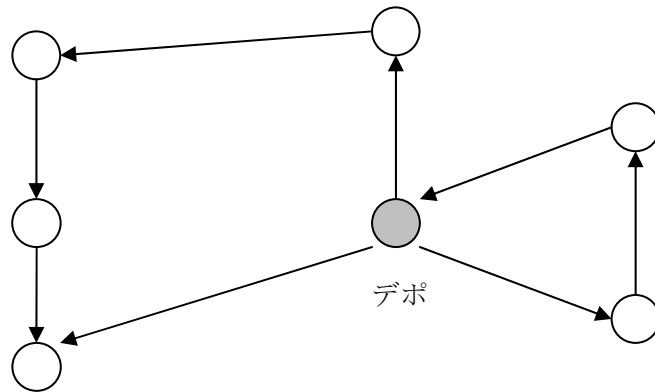


図 9 解 1

これは、最大だけを考慮して全体の配送時間を考慮しないためである。

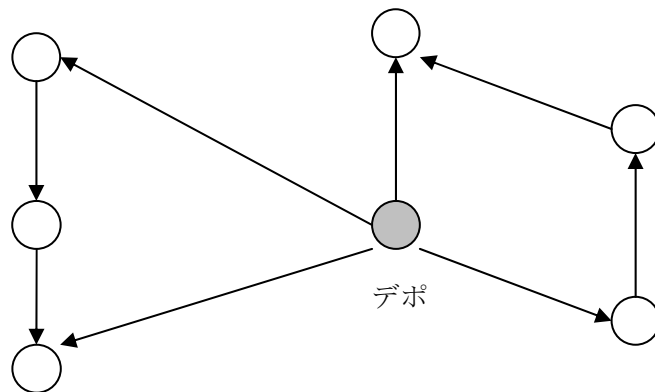
また、単純に全配送時間を最小にしようとすると、以下のようにばらつきが大きくなる可能性がある。



解 2

図 10 解 2

ばらつきを小さくするには、分散を小さくすればよい。そこで、各車両の配送時間の 2 乗和を最小にする方法が考えられる。ただし、単に 2 乗しただけでは、以下のような解はでない。



解 3

図 11 解 3

そこで、配送時間から基準値を引いた値の 2 乗和が最小になるように挿入することとする。こうすれば、上記のような解が得られる可能性がある。

また、車両の速度及び、最大積載量は考慮するものとする。(1 車両が 2 回転以上する場合もあるものとする。)

基準値は、現在の解の中で各車両の中で最小の配送時間とする。

同一避難所には、同一車両が同一回転で輸送するようにする。ある避難所の分配量が、車両の残り積載量より大きい場合は、物資を分割する。分割の仕方はいろいろな組合せが考えられるが、ここでは組合せは考えずに以下の尺度を用いる。

第1優先順位	： 分割をしないで輸送できること 分割しない方が望ましいため
第2優先順位	： Σ (配送時間ー基準値) 2 が小さいこと 最大配送時間を小さくするため
第3優先順位	： 一度の輸送量が多いこと 少しずつ運ぶと効率が悪い可能性があるため
第4優先順位	： 輸送車両の空き積載量が多いこと 空き積載量が多い方が自由度が大きいため

図 12 挿入場所決定の尺度

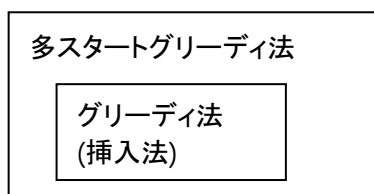


図 13 多スタートグリーディ法

多スタートグリーディ法(挿入法)の流れ

・ 指定した反復回数だけ以下を繰り返す。

デポから (仮想距離での) 遠い順に各避難所について繰り返す

該当避難所の未配送物資について繰り返す

残り積載量の多い順に各車両について繰り返す

該当車両で挿入可能な回転がない場合、空き回転を追加する

各回転について繰り返す

該当回転の挿入箇所について繰り返す

尺度を計算し、最適挿入箇所を更新する

最適挿入箇所に挿入し、必要なら物資を分割する

各反復で、挿入順序が異なるように、デポからの仮想距離は、以下のようにする。

$$\text{デポからの仮想距離} = \text{デポからの距離} \times 1000 \times e^{-\text{反復回数}} + (0-1 \text{ の間の}) \text{乱数}$$

反復による効果について

モデル

ここでは横須賀市を例に、1箇所の緊急物資受入港から、20箇所の避難所に3台の車両で配送する問題を考える。横須賀市内は丘陵や山地を切り開いて宅地等が造成されており、多数の急傾斜地が存在する。したがって、大地震の際には急傾斜地崩壊により道路網が寸断されること想定した上で、緊急支援物資の供給や、救助や消火といった緊急対応の方策を検討することが重要である。検討にあたっては、文部科学省の大都市大震災軽減化特別プロジェクトにおいて整備した、横須賀市の道路ネットワークをはじめとするデータベースを用いる。

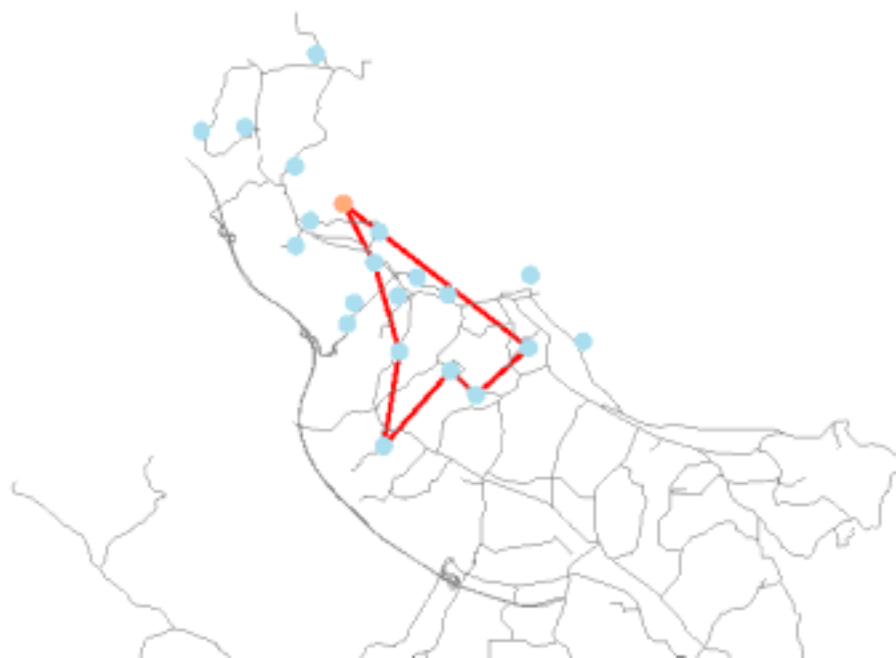


図 14 道路ネットワーク

結果

反復数を変えたときの結果を以下に示す。

表 1 反復回数ごとの結果

反復回数	計算時間(秒)	最大配送時間
1	8.6	0.424
100	8.6	0.410
1000	8.6	0.408
10000	9.2	0.408

反復回数が1回の場合が、改善前と同じと考えられる。

反復により解が改善されるのが確認できる。

全拠点間の最短路を計算するのに、8.6秒ほどかかっている。

グリーディ法1回は、0.00006秒ほどと考えられる。

各反復で解がどのように変わるかを以下に示す。

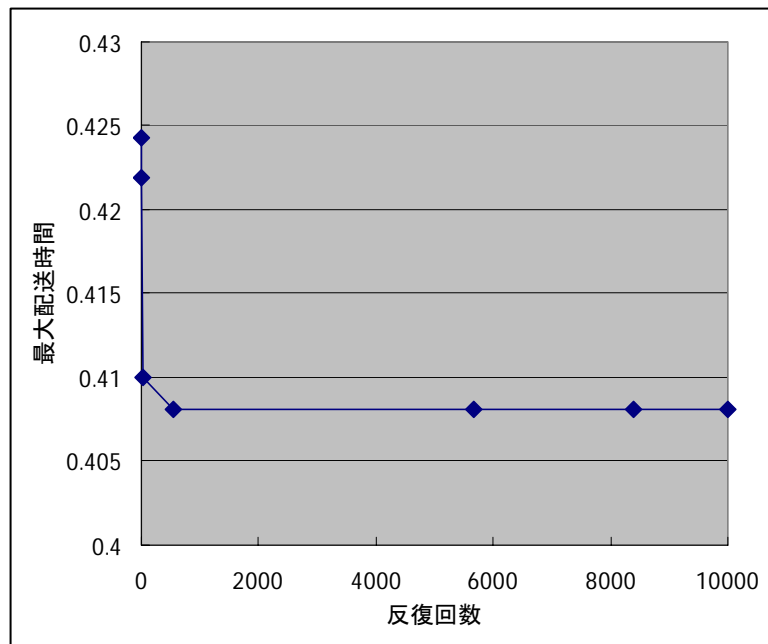


図 15 反復回数ごとの最大配送時間

反復回数は、数百回を超えると、結果はあまり変わらないようである。

9 謝辞

大都市災害における緊急物資の最適配送計画に関する研究は、文部科学省が推進している大都市大震災軽減化特別プロジェクトの一環として行ったものである。

参考文献

- [1] 今堀慎治、梅谷俊治、“切出し・詰込み問題とその応用 (2) —長方形詰込み問題—”、オペレーションズ・リサーチ、**50** (2005)、335—340。
- [2] 柳浦睦憲、茨木俊秀：組合せ最適化、朝倉書店
- [3] 久保幹雄：ロジスティクス工学、朝倉書店
- [4] 文部科学省研究開発局、防災科学技術研究所：大都市大震災軽減化特別プロジェクト III 被害者救助等の災害対応戦略の最適化 1. 震災総合シミュレーションシステムの開発 平成 18 年度成果報告書、2007。