

実データに基づく宅配便物流の地域集約方式による効率化の研究

Simulation Study with Real Data to Improve the Performance of Home Delivery Service Industry

黒瀬雄太^{1*} 寺野隆雄¹
Kurose Yuta¹ Terano Takao¹

¹ 東京工業大学 大学院総合理工学研究科 知能システム科学専攻
¹ Department of Computational Intelligence and Systems Science,
Tokyo Institute of Technology

Abstract: In logistics industry, long-distance transportation at night is currently employed. But, to deal with the increase in the number of buggages, they need to introduce the operation around the clock in order to shorten the delivery time. This paper quantitatively investigates what are the possible issues and the solutions for them by simulation approach. The main findings are as follows: First, the delivery around the clock is much more costly than that at night. Second, by introducing "gateway" among several bases, which can consolidate the buggages in local at first and then transport them to the other regions, shorter delivery time and lower delivery cost have been observed.

1 序論

電子商取引 (Electronic Commerce : EC) 市場の拡大に伴い、日本国内における宅配便取扱量は年々増加している [1][2]. この EC 市場関係の荷物は「お急ぎ便」や「当日配送」といった時間的制約を持つものが多く、また注文した商品を早く受け取りたいという顧客のニーズもますます高まっている. この時間的制約は宅配便事業者の信頼度に直接関わる問題であるため、各事業者は更なる輸送時間短縮の必要性に迫られている [3].

この問題に対応するため、宅配便事業者であるヤマト運輸株式会社 (以下、ヤマト) では、超大型物流施設を介して輸送時間を短縮する「ゲートウェイ (GW) 構想」を掲げ、現状では達成していない地域を越えた当日輸送の実現による輸送時間の短縮を試みているが、GW 構想の実現に際し、具体的な金額コストや輸送時間などの定量的な評価は行われていない [4][5].

これまでに輸送拠点内の効率的なレイアウトや宅配便配送ルート最適化、パレットの運用を考慮した輸送方法など、宅配便の幹線輸送以外の部分に着目した効率化に関する研究は行われている [6][7][8]. また、関連研究として、輸送効率の向上、コスト削減といった一般的な研究は数多く行われているが、本論文のよう

な特定のスケジューリング問題に対しては適応が難しい [9][10][11].

本論文では実データに基づくシミュレーションにより、はじめに現状の夜間みの幹線輸送を単純に 24 時間化した場合に発生する問題点を定量的に評価し、次に対処法として考えられる地域集約型 (GW) 方式の幹線輸送を用いた場合の金額コストや輸送時間などといった評価値の変化を検証することを目的とする.

2 シミュレーション

本章では輸送方式とシミュレータの説明やパラメータなどの各設定を行う. なお、説明で用いられる「BOX」はロールボックスパレットの略称であり、輸送拠点間で輸送される荷物の最小単位である. また、シミュレーションにおける 1 ステップ (step) を実時間の 30 分とする. なお、高速道路の夜間割引や、渋滞による所要時間に差をつけるため、「日中」と「夜間」を定義し、1 ステップ目を夜間の開始時間、25 ステップ目を日中の開始とし、以降 24 ステップごとに日中と夜間を繰り返す.

2.1 輸送方式

シミュレータの説明を行うにあたり、図 1 を用いて現在の輸送方式を説明する. ヤマトでは図 1 のような 3 層からなる多段階輸送方式を採用しており、送り主か

*連絡先: 東京工業大学 大学院総合理工学研究科 知能システム科学専攻

〒 226-8502 神奈川県横浜市緑区長津田町 4259 J2-1705

E-mail: kurose.y.aa@m.titech.ac.jp

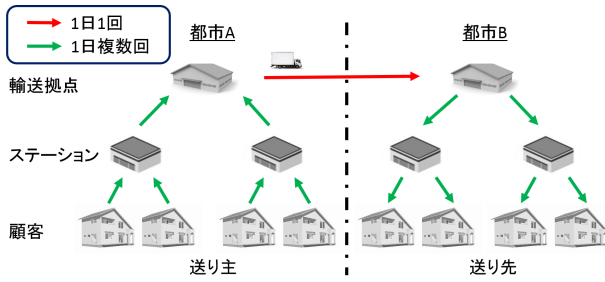


図 1: 現在の輸送方式

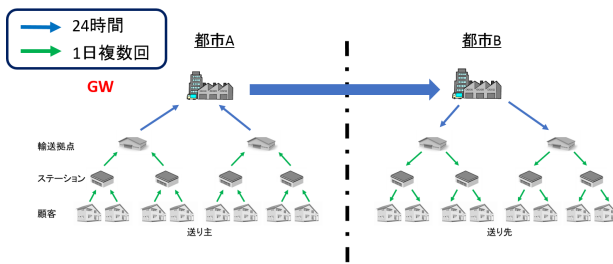


図 2: GW 構想での輸送方式

らの荷物はステーション、輸送拠点を通して送り先へと輸送される。各層を結ぶ輸送はそれぞれトラックの大きさや輸送頻度が異なり、顧客ステーション間およびステーション輸送拠点間は1日に複数回輸送が行われる。しかしながら、輸送拠点間の輸送にあたる幹線輸送は1日に1度夜間のみしか行われておらず、これにより現状では地域を越えた当日輸送は実現していない。

次に、図2を用いてGW構想での輸送方式を示す。GW構想での輸送方式は図1で示した3層の輸送方式のさらに上層に、GWという超大型物流施設を配置した4層からなり、輸送拠点間とGWおよびGW間は24時間輸送が行われる。これにより地域を越えた当日輸送が実現可能となる。

今回のシミュレーションでは、これらの輸送方式の変更に伴う金額コストや輸送時間を比較するため、対象となる輸送拠点から上の層のみに着目する。なお、図1で示した幹線輸送が夜間にのみ行われるモデルを「夜間モデル」、夜間モデルを単純に24時間化したモデルを「24時間モデル」、図2で示したGW構想での輸送方式を「GWモデル」とする。

2.2 シミュレーションの概要

出発地側の輸送拠点にBOXが発生してから目的地側の輸送拠点に到着するまでの幹線輸送のみに着目し、輸送拠点間の輸送の実データから平均輸送時間や金額コストといった評価値を導くモデルを用いたシミュレ

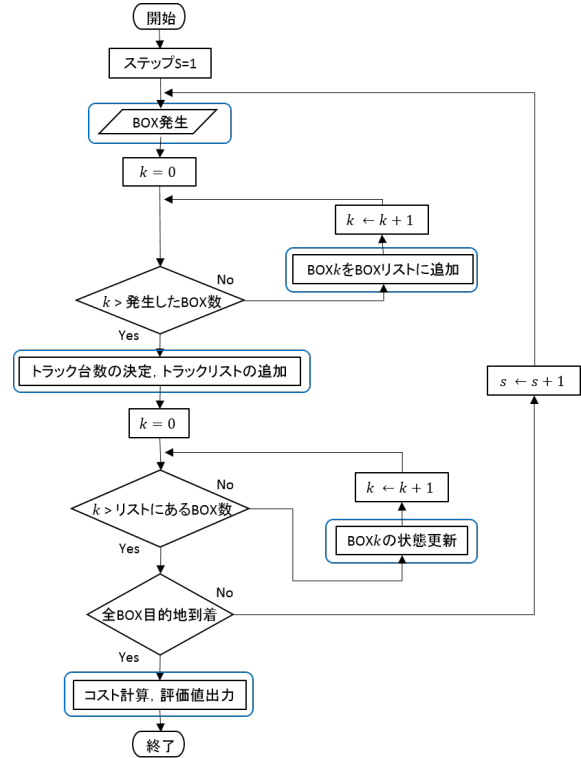


図 3: シミュレーションのフローチャート

ーションを実装する。内部では行列計算によりBOXを移動させ結果を得る。またBOXの輸送可能条件や経由方法をモデルごとに変更し実験を行う。

シミュレーションには輸送拠点をノードとした輸送拠点間の物流ネットワークを用いる。輸送拠点は全国に69カ所存在し、各輸送拠点間の距離および所要ステップ数はあらかじめ与えられている。

なお、輸送拠点間の距離および所要ステップ数は、実際の地図情報から配車計画用ソフト「Lyna2」[12]を用いて算出したデータを使用する。

2.3 フローチャート

本節では図3を用いてシミュレーションの主な流れを示す。

はじめに発側の輸送拠点にBOXが発生すると、BOXごとにBOXリストへ追加する。このBOXリストに「BOXの状態」を記録し、これを更新することでBOXの管理を行う。発生するBOXは実データに基づきステップごとに割り振ったものであり、出発地、目的地と発生時間が与えられている。

次に、BOXリストから各方面へのBOX数を算出し、その値から、トラックの台数を算出する。今回のシミュレーションでは、積載率が100%となればトラッ

クが発車可能となる。輸送拠点 i から輸送拠点 j へのトラック台数 T_{ij} [台] は、 i から j へ輸送予定の BOX 数を n_{ij} [BOX]、トラック 1 台あたりの最大積載 BOX 数を L [BOX] とすると次の式で表される。

$$T_{ij} = \lfloor n_{ij}/L \rfloor \quad (1)$$

これによりトラック台数が決定すると、各トラックをトラックリストへ追加する。トラックリストへは、発車するトラックごとに出発地、目的地、移動距離 d_{ij} [km]、稼働時間 t_{ij} [step] や積載率を記録する。次にトラック台数の決定に伴い、輸送 BOX を決定する。トラックへの積載可能 BOX 数 α_{ij} [BOX] は、式 (1) を用いて次の式で与えられる。

$$\alpha_{ij} = L \times T_{ij} \quad (2)$$

また式 (1) および式 (2) より、待機となる荷物数 W_{ij} [BOX] は次の式で与えられる。

$$W_{ij} = n'_{ij} - \alpha_{ij} \quad (3)$$

これらの値に応じて BOX ごとに、発車、待機を決定する。このとき、トラックへの積載は、前ステップで待機していた BOX から優先的に行われる。

発車となった BOX はその BOX の「現在の状態」を「移動中」に更新し、移動に必要なステップ数を与える。このステップ数を消化すると、目的地へ到着となる。なお、発車となる条件には上記の他に夜間モデルでの日中の待機や強制発車がある。強制発車は発車で済まずに待機となったステップ数が、最大待機ステップ数 β [step] となった場合に強制的にトラックを発車させるものであり、この場合、当該トラックを新たにトラックリストへ追加する。またこの場合、同一方面へ待機中の BOX (W_{ij} [BOX]) 全てが積載される。

ここまでの操作をステップごとに行い、発生した全 BOX の輸送が完了すると BOX リストおよびトラックリストから各評価値を出力すると共に金額コストの計算を行う。金額コストは、トラックごとにかかる人件費 C_P [円]、高速代 C_H [円] および燃料代 C_F [円] のみ考慮し、これ以外の固定費などの費用は考慮しない。なお、各費用は次の式で定義される。

$$C_P = t_{ij} \times w/2 \quad (4)$$

$$C_H = d_{ij} \times h \times r \quad (5)$$

$$C_F = d_{ij} \times 1/f \times g \quad (6)$$

ここで、 w [円/h] はドライバーの平均時給を表し、2 で割ってステップ単位とする。また、 h [円/km] は高速料金であり、 r は夜間のステップのみ適用される深夜高速料金割引である。また、 f [km/L] はトラックの燃費であり、 g [円/L] は軽油代を表す。式 (4)、式 (5)、式

(6) より、1 台ごとにかかる金額コスト C [円] は次の式で与えられる。

$$C = C_P + C_H + C_F \quad (7)$$

次に、出力する評価値を説明する。

- BOX 数 [BOX]
総 BOX 数を表す。
- トラック台数 [台]
輸送に要したトラック台数を表す。なお、同一トラックの複数回使用を考慮していないため、全て「のべ台数」である。
- 平均輸送時間 [step/BOX]
出発地側の輸送拠点に BOX が発生してから、目的地側の輸送拠点に BOX が到着するまでにかかる BOX あたりの輸送時間を表す。
- 平均積載率 [%/台]
トラック 1 台あたりの平均積載率を表す。
- トラック平均移動距離 [km/台]
トラックごとの平均の移動距離を表す。
- トラック平均稼働時間 [step/台]
トラックが出発地から目的地に到着するまでの所要時間のトラックあたりの平均を表す。トラックの移動時間のみを計測しているため、待機時間は含まれない。
- BOX キロ (合計)[百万 BOXkm]
物流業界でトラックの輸送コストの指標として広く用いられる「トンキロ」を基にしたコストである。トンとキロの積で与えられるトンキロと同様、トラックごとの、積載 BOX 数と移動距離の積で表され、全トラックの BOX キロの合計を表す。
- 金額 (合計)[百万円]
トラックごとに算出した輸送にかかる金額コストの合計を表す。

以上がシミュレーションの流れである。

2.4 条件設定

- GW
GW モデルでは、全輸送拠点をヤマトの地域に従い 9 地域に分割し、各地域に必ず 1 つ GW を配置した。各地域の GW の決定方法は、GW 同士の距離を短くするため、既存の輸送拠点のうち、他の全拠点との距離の総和が地域内で最も小さい輸送拠点を GW とした。具体的に例を示す

表 1: GW 管轄表

地域	GW 所在地	輸送拠点数	BOX 数
北海道	北海道	5	7225
東北	福島	6	14062
関東	神奈川	18	90049
北信越	長野	7	14936
中部	三重	7	23150
関西	滋賀	9	42532
中国	岡山	5	10151
四国	徳島	4	5249
九州	福岡	8	17076

表 2: 各文字の値

文字	定義	値
β	待機可能最大ステップ数	6
w	ドライバー平均時給 [円/h]	1804[13]
h	高速料金 [円/km]	40.6[14][15]
d	夜間割引 [倍]	0.7[16]
f_{10}	10t 車燃費 [km/L]	6.00[17]
L_{10}	10t 車最大積載 BOX 数 [BOX]	16
f_{20}	20t 車燃費 [km/L]	4.04[17]
L_{20}	20t 車最大積載 BOX 数 [BOX]	24
g	ガソリン代 [円/L]	72.7[18]

と、九州地方であれば福岡県のように各地域の門 (Gate) となる位置に GW を配置した。各地域の GW の配置及び管轄輸送拠点数、取扱い BOX 数を表 1 に示す。なお、同一地域内への輸送は直接目的地へと送られ、地域を越えた輸送には必ず出発地側、目的地側の GW をそれぞれ経由するものとする。

- **トラック**
GW モデルの GW 間の輸送のみ 20t トラックを使用し、それ以外の輸送はすべて 10t トラックを使用する。10t トラックの最大積載 BOX 数を L_{10} [BOX]、燃費を f_{10} [km/L] とし、20t トラックの最大積載 BOX 数を L_{20} [BOX]、燃費を f_{20} [km/L] とする。
- **パラメータ設定**
シミュレーションを行う上で必要なパラメータの定義と設定を行う。具体的な値は表 2 のとおりに設定した。なお、 w と g は経済産業省の統計値を用い、 h は国土交通省と全日本トラック協会の値から算出した。また、 r は NEXCO 中日本、 f は経済産業省より引用した。さらに、今回の実験では、日中の渋滞を表現するため、日中の時間表を夜間の 1.07 倍とした。なお、この値は国土交通省の統計値 [19] より、日中の混雑時と非混雑時の差から算出した。

表 3: 実データと夜間モデルの比較結果

	実データ	夜間モデル
BOX 数 [BOX]	164337	164337
平均輸送時間 [step/BOX]	-	34.4
トラック台数 (計)[台]	11197	11243
平均積載率 [%/台]	91.7	91.4
トラック平均移動距離 [km/台]	285.5	311.8
トラック平均稼働時間 [step/台]	10.2	9.7
BOXkm(合計)[百万 BOXkm]	49.7	49.7
金額 (合計)[百万円]	233.0	240.2

3 予備実験

3.1 シミュレータの精度確認

はじめに、実データから算出した各値と、現状と同じ幹線輸送方式にあたる夜間モデルのシミュレーション結果を比較し、作成したシミュレータの妥当性を検証した。実データと夜間モデルの比較結果を表 3 に示す。なお、実データの金額コストは実際の輸送データのトラックごとの稼働時間および輸送拠点間の距離データをもとに、2.3 で示した金額コストの式を用いた算出した。この比較結果から、金額の誤差が 3% 程度であるため、シミュレータの精度は十分であると考えられる。

3.2 夜間モデルと 24 時間モデルの比較

現状の幹線輸送方式を単純に 24 時間化した場合に発生する問題を定量的に評価するために、夜間モデルと 24 時間モデルの比較を行った。比較結果を表 4 に示す。夜間モデルでは発側の輸送拠点で夜間まで待機していた荷物が、24 時間モデルではすぐに発送されるようになったことにより、平均輸送時間が夜間モデルの半分以下に短縮された。しかしながら、トラックが積載率の低い状態で発車することになり、トラック台数が増加したため、金額コストが大幅に増加する結果となった。さらに、24 時間モデルではトラックの平均移動距離が 100 キロ近く長くなっており、ドライバーの負担も増大していることから、単純に現在のモデルを 24 時間化しただけでは当日輸送の実現は難しいことが判明した。

4 実験

4.1 24 時間モデルと GW モデルの比較

24 時間モデルと GW モデルの比較を行い、24 時間モデルで生じた問題点と各評価値の変化を検証した。比較結果を表 5 に示す。

表 4: 夜間モデルと 24 時間モデルの比較結果

	夜間モデル	24 時間モデル
BOX 数 [BOX]	164337	164337
平均輸送時間 [step/BOX]	34.4	12.0
トラック台数 (計)[台]	11243	19414
平均積載率 [%/台]	91.4	52.9
トラック平均移動距離 [km/台]	311.8	402.2
トラック平均稼働時間 [step/台]	9.7	12.5
BOXkm(合計)[百万 BOXkm]	49.7	49.7
金額 (合計)[百万円]	240.2	535.1

表 5: 24 時間輸送モデルと GW モデルの比較結果

	24 時間モデル	GW モデル
BOX 数 [BOX]	164337	164337
平均輸送時間 [step/BOX]	12.0	14.1
トラック台数 (計)[台]	19414	18602
トラック台数 (10t)[台]	19414	14964
トラック台数 (20t)[台]	0	3638
平均積載率 [%/台]	52.9	94.4
トラック平均移動距離 [km/台]	402.2	177.2
トラック平均稼働時間 [step/台]	12.5	5.6
BOXkm(合計)[百万 BOXkm]	49.7	61.0
金額 (合計)[百万円]	535.1	237.5

4.2 考察

表 5 のとおり、GW モデルでは、GW を経由するため 24 時間モデルより輸送時間が悪化した。しかしながら、平均輸送時間は 14.1[step/BOX](約 7 時間)であり、1 日あたり複数回の幹線輸送が可能であることから、GW モデルでも当日輸送は実現できると考えられる。さらに合計金額やドライバーの負担であるトラック平均移動距離を 24 時間モデルの半分に抑えることができたため、GW モデルは金額コストを抑えて 24 時間輸送を実現できることが定量的に評価された。

5 GW の有無による効率の検証

4 章では、全地域に GW を設け、24 時間輸送を全国規模で行った。本章では、GW による 24 時間輸送の地域を限定し、GW モデルと夜間モデルを組み合わせた場合に各評価値がどのように変化するかを検証した。なお、GW の有無を組み合わせた輸送方式を「GW 混合モデル」とする。

5.1 条件設定

GW 混合モデルでは表 1 で設定した GW のうち、取扱い BOX 数の少ない地域から順に GW を廃止し、GW 数を減らしていく。

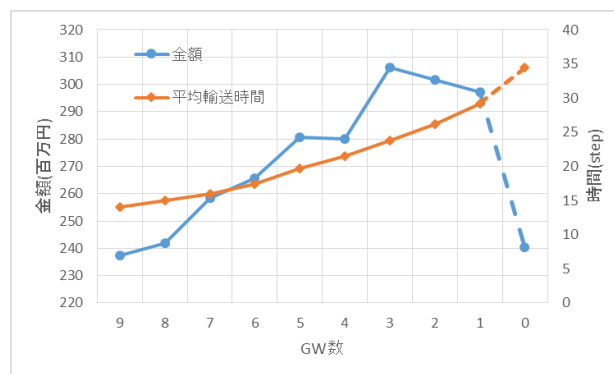


図 4: GW 混合モデルでの平均輸送時間と合計金額

GW のある地域とない地域間の輸送は、GW を有する地域の GW を介して送られるものとする。また、GW のある地域は 24 時間輸送可能、GW のない地域は夜間のみ輸送可能とする。トラックはこれまでと同様、GW 間の輸送のみ 20t トラックを使用する。

5.2 結果

GW の数を減らした際の輸送時間と金額コストの変化を図 4 に示す。なお、図 4 中の GW 数 0 は夜間モデルの結果と同じである。

図 4 からわかるように、GW 数を減らすと平均輸送時間、合計金額ともに高くなった。合計金額については、GW 数が 3 のときが最も高い結果となった。

5.3 考察

平均輸送時間がこのように上昇したのは、GW を廃止することにより夜間まで待機する荷物が増えるためであると考えられる。図 4 より、GW での輸送方式を採用する場合、地域を限定して行うよりも、全国に GW を設置して幹線輸送を行った方が効率が良いことがわかった。

6 結論

6.1 まとめ

シミュレーションにより、夜間のみの幹線輸送方式を 24 時間化した際に発生する問題を定量的に評価し、またその対処法として考えられる GW 方式を用いた場合での各評価値の変化を検証した。その結果、現状の幹線輸送方式をそのまま 24 時間化すると輸送時間が大幅に短くなるが金額コストが大幅に増加することがわ

かった。これは、従来の夜間モデルでは荷物を夜間までためることで集約し、効率的な輸送を行っていたが、24時間モデルでは従来の集約ができないためにより多くのトラックが必要となったためであると考えられる。しかしながら、これらの問題点の対処法として考えられるGW方式では、各地域ごとに荷物を集約して輸送することにより、ドライバーの稼働時間や金額コストを抑えつつ24時間輸送を行うことが可能であることが示された。また、GW方式での輸送の場合、地域を限定してGWを設けるよりも全国で行った方が輸送時間、金額コスト共に良い結果が得られることがわかった。

6.2 今後の展望

本研究では、次の2つの課題が残されている。

- GW配置の最適化

本研究では、各地方の既存の輸送拠点の1つをGWとしてシミュレーションを行った。そのため、GWを新設するとした場合での最適な立地や管轄については現状では考慮できていない。今後は、実際の地理的条件に基づき、GW新設の際の最適な立地を求めた後に各コストの検証を行うことで、より現実に近い値が得られると考えられる。

- 実トラック台数の算出

本研究では、トラックの台数は述べ台数とし、同一トラックの複数回使用については考慮しなかった。しかしながら、一度出発したトラックは、最終的に自身の輸送拠点に戻る必要があり、トラックの復路を考慮した上で金額等のコストを算出することがより現実的であると考えられる。

謝辞

本研究を進めるにあたり、終始多大なるご指導、ご教示を頂きました寺野隆雄教授、吉川厚連携教授に深く感謝致します。また、研究を進める上でのアドバイスだけでなく、論文の書き方や構成など、多くの御助言、御指導をして下さいました山口大学国際総合科学部の山田隆志准教授に深く感謝致します。さらに、物流業務に関してのデータを提供して下さいましたヤマト運輸株式会社様に深く感謝致します。産学連携の共同研究プロジェクトとして現場の知見や現状の問題点など、非常に有意義なご指摘を頂きましたヤマト運輸株式会社村上様に深く感謝致します。また、配車計画に関する基礎研究や最近の動向などで多大なるご協力を頂きました株式会社ライナロジクスの朴成浩社長、西田里華様に深く感謝致します。最後に本研究に当たりご支

援、ご協力を頂きました皆様にこの場を借りて心より御礼申し上げます。

参考文献

- [1] 国土交通省：平成25年度宅配便取扱実績関係資料
- [2] 経済産業省：平成26年度調査結果要旨，電子商取引実態調査
- [3] 林 克彦，根本敏則：ネット通販時代の宅配便，成山堂書店（2015）
- [4] ヤマト運輸株式会社
<http://www.kuronekoyamato.co.jp/top.html>（アクセス 2015/12/04）
- [5] 日本経済新聞：「3度目の革命」ヤマトHD，2000億円を投じ物流網強化（2013）
<http://www.nikkei.com/article/DGXNASFK04021U3A700C1000000/>（アクセス 2015/11/20）
- [6] 藤田，山本学，寺野隆雄：宅配便ドライバの動的ルートスケジューリング，計測自動制御学会第5回社会システム部会研究会資料 Vol. 5，pp. 77-84(2014)
- [7] 奥津規矢，山本学，寺野隆雄：宅配業務における仕分作業とレイアウト構築の効率化に関する研究，計測自動制御学会第5回社会システム部会研究会資料（2014）
- [8] 高橋朋康，吉川厚，寺野隆雄：パレットの運用効率を考慮した宅配便配送計画立案に関する研究，計測自動制御学会第8回社会システム部会研究会資料，pp. 173-178(2015)
- [9] 黒川久幸，大和裕幸，小山健夫：ハブ・アンド・スポーク型輸送方式に関する検討，日本造船学会論文集第184号，pp. 617-625（1998）
- [10] 徳永幸之，岡田龍二，須田熙：宅配輸送におけるセンター配置及び輸送ルート決定モデル，土木計画学研究・論文集 No.12，pp519-526（1995）
- [11] V. Pillac, M. Gendreau, C. Guret, and A. Medaglia, "A review of dynamic vehicle routing problems," Eur. J. ..., pp. 028, 2012.
- [12] 株式会社ライナロジクス
<http://lynalogics.com/>（アクセス 2015/12/19）
- [13] 経済産業省：毎月勤労統計調査（平成25年11月）結果確報
- [14] 国土交通省：報道発表資料
「新たな高速料金について」
- [15] 全日本トラック協会：5. 車種区分
<http://www.jta.or.jp/coho/hayawakari/5.kubun.html>（アクセス 2015/12/04）
- [16] NEXCO 中日本：深夜割引
<http://www.c-nexco.co.jp/etc/discount/etc/night/>（アクセス 2015/12/04）
- [17] 国土交通省：自動車燃費一覧，自動車の燃費基準値
- [18] 経済産業省：資源エネルギー庁，石油製品価格調査
- [19] 国土交通省：平成22年度交通センサス集計結果整理表