

LTLネットワーク設計問題

片山直登

1 はじめに

複数の発地と複数の着地の組み合わせをもつ輸送ネットワークでは、積替えターミナルにおいて荷物の積合せが行われ、積合せ貨物や混載貨物として輸送することが行われる。このような積合せ貨物輸送をLTL (Less Than Truck-Load) 輸送とよぶ。LTL輸送に関するネットワーク上では、積替えターミナルの選択、積替えターミナル間の路線の選択、路線上の輸送車の配置や貨物の輸送経路の選定などの計画を行うことが必要である。このようなさまざまな計画を行う問題をLTLネットワーク設計問題 (*LTLN*: LTL Network Design Problem) とよぶ。

LTLネットワーク設計問題については、数多くの研究が行われている。Crainic and Roy (1992) は集合被覆問題を用いた定式化と解法を示し、Crainic and Roy (1993) はLTL問題のレビューを行っている。Roy and Delorme (1989) はNETPLANとよぶモデルと事例分析を示し、Roy and Crainic (1992) は事例を用いた解説を行っている。Powell and Sheffi (1983, 1989), Powell (1986) はアド・ドロップ型のヒューリスティック解法を示している。Powell and Koskosidis (1992) は、勾配を用いたローカルサーチ法と最低便数制約に対するLagrange緩和法を提案している。Farvolden and Powell (1994) は、動的なモデルに対してアド・ドロップのための劣勾配に基づいた効率的な解法を示している。一方、Hoppe et al. (1999) は、容量制約のないネットワークデザイン問題のラベリング法とアド・ドロップ型のヒューリスティック解法を組合せた解法を開発している。片山直登 (2002) は、Lagrange緩和法を用いた解法を開発している。近年では、Jarrah et al. (2009) が大規模なLTLネットワークモデルに対して、スロープスケーリング法と積合せ計画に対して木生成法を用いた解法を示している。Erera et al. (2012) は、整数計画を用いた大規模近傍探索を用いた繰返し改善法を示している。

また, Crainic (2003) はサーベイを示している.

一方, ネットワーク設計問題は, ネットワーク上の施設・設備であるアークにかかる費用とものの移動にかかる費用を考慮して, 施設・設備などに対応するアークやノードを適切に選択することによりネットワークを形成し, かつモノの移動経路を決める問題である. LTL ネットワーク設計問題は, ネットワーク設計問題の特殊形と考えることができる. 一般的なネットワーク設計問題は NP- 困難な問題であることが知られている (Magnanti and Wong 1984). ネットワーク設計問題に関しては, 今日まで数多くの研究が行われており, Magnanti and Wong (1984), Wong (1984, 1985), Minoux (1989), Balakrishnan et al. (1997), Gendron et al. (1997), Costa (2005), 片山直登 (2008) および Yaghini and Rahbar (2012) などがサーベイを示している. また, ネットワーク設計問題において複数の容量をもつ問題に対しては Frangionia and Gendron (2009), 区分的線形費用をもつ問題に対しては片山直登 (2009) が研究を行っている.

LTL ネットワーク設計問題は, ネットワーク上のアークやノードの選択およびネットワーク上の多品種の流れの問題として取り扱うことができる. LTL ネットワーク上では, 最低サービス水準, 同一宛先の集約出荷, 輸送便の回送, 経由する積替えターミナル数など多くの条件を考慮しなければならないことに加え, これらを考慮した問題は大半の変数が離散変数である困難な組合せ最適化問題となる. 本研究では, LTL ネットワーク設計問題を対象として, サービス水準を考慮した LTL ネットワーク設計問題および離散容量をもつ LTL ネットワーク設計問題に対する定式化を示す. サービス水準を考慮した LTL ネットワーク設計問題に対しては, 区分的線形関数を用いた定式化, 拡張容量を用いた定式化, および木フローを用いた定式化を示す. また, 離散容量をもつ LTL ネットワーク設計問題に対しては, 複数容量を用いた定式化, 区分を用いた定式化, および木フローを用いた定式化を示す. さらに, 拡張容量を用いた定式化と複数容量を用いた定式化に対して最適化ソルバーを用いた数値実験を行い, 問題の定義や定式化による解の変化を考察する.

2 LTL ネットワーク設計問題

2. 1 LTL ネットワーク設計モデル

LTL ネットワーク設計問題では, モデル化の対象をどこまでとするかによって, 様々なモデルが提案されている. 一般的に, LTL ネットワーク設計問題は次のような問題から構成されている.

- 1) 積替えターミナルの選択
- 2) LTL 路線と路線便数の設定
- 3) TL 路線と路線便数の設定

- 4) 貨物輸送経路の設定
- 5) 輸送便の回送路線の設定
- 6) 時間空間の考慮

積替えターミナルの選択は、複数の候補ノードから積替えを行う基幹的なターミナルを選定することである。LTL 路線は LTL により混載輸送である LTL 輸送を行う積替えターミナル間の路線であり、同時にこの路線便の便数も決定することが必要となる。TL (Truck-Load) 路線は混載輸送を行わない路線であり、積合せをしない直送便に該当する。この路線便の選択と便数も決定することが必要となる。貨物輸送経路は発ターミナルから積替えターミナルを経由して着ターミナルに至る貨物の輸送経路であり、この経路はいくつかの路線便から構成される。輸送便の回送路線は、輸送便数の均衡を図るための輸送車の回送を行うものである。最後の時間空間は多期間モデルを考慮する際に発生するものであり、期と積替えターミナルの組合せをノードとして取り扱うことができる。

考慮すべき費用としては、次のようなものが挙げられる。

- 1) 輸送便に関する費用
- 2) 輸送量に関する費用
- 3) 積替えターミナルにおける処理費用
- 4) 回送便の回送費用

また、満たさなければならない制約として、次のようなものが挙げられる。

- 1) LTL 輸送便および TL 輸送便の輸送能力
- 2) LTL 輸送便および TL 便のサービス水準制約
- 3) 同一着地貨物の輸送経路のフロー木制約
- 4) 輸送便の回送制約
- 5) 積替え回数制約

LTL 路線および TL 路線上ではそれらの輸送便の輸送能力を考慮することが必要である。LTL 輸送や TL 輸送を行う場合には、開設した輸送便のサービス水準を維持するために、単位期間当りの路線の最低便数や最低輸送能力を設定することが必要となる。LTL のネットワーク上では、同一の着ターミナルをもつ貨物は、途中の積替えターミナルで集約されて同一着地宛の輸送便で輸送されることが一般的であるため、貨物の流れであるフローは着ターミナルを根とするグラフ上の根付き木の上で輸送されることになり、フロー木制約はこの条件を表している。輸送はトラックなどで行われるため、これらの回送路を含む巡回経路を定める必要がある。LTL 輸送便や TL 輸送便のみでこれらの巡回経路が設定できない場合には、回送路線を設定することが必要となる。積替え回数制約は、貨物輸送経路で経由する積替えターミナル数である。多数のターミナルを経由して頻繁に積替えると個々の貨物の輸送時間が増大するため、積替え回数または積

替えターミナルの経由回数を考慮することが必要である。

これらの組合せである LTL ネットワーク設計問題は、大規模で複雑な混合整数計画問題や整数計画問題となる。制約としては、同一着地貨物の貨物の輸送経路のフロー木制約、輸送能力制約、積替え回数制約および輸送便の回送制約を考慮し、輸送便および輸送量に関する費用を最小にする LTL ネットワーク設計問題を対象とする。なお、時間空間は陽的には考慮していないが、時間とターミナルの組合せをノードに対応させることで考慮することができる。

LTL ネットワーク設計問題 *LTLD* は、ネットワーク設計問題として表現することができる。発・着ターミナルや積替えターミナルをネットワーク上のノードとして表現し、ターミナル間の路線をアークとして表現する。さらに、発・着ターミナル間の貨物の流れをフローとして扱い、その移動量を需要と表現する。また、貨物輸送が発生する発・着ターミナル間の組を OD ペアとし、発ターミナルを始点、着ターミナルを終点とよぶことにする。アーク容量はターミナル間の路線上の輸送能力、アークのデザイン費用は路線便の輸送能力に関する固定費用、フロー費用は貨物量に比例して発生する変動費用とする。

図 1 に、対象とする LTL ネットワークの概念図を示す。丸は発・着ターミナル、四

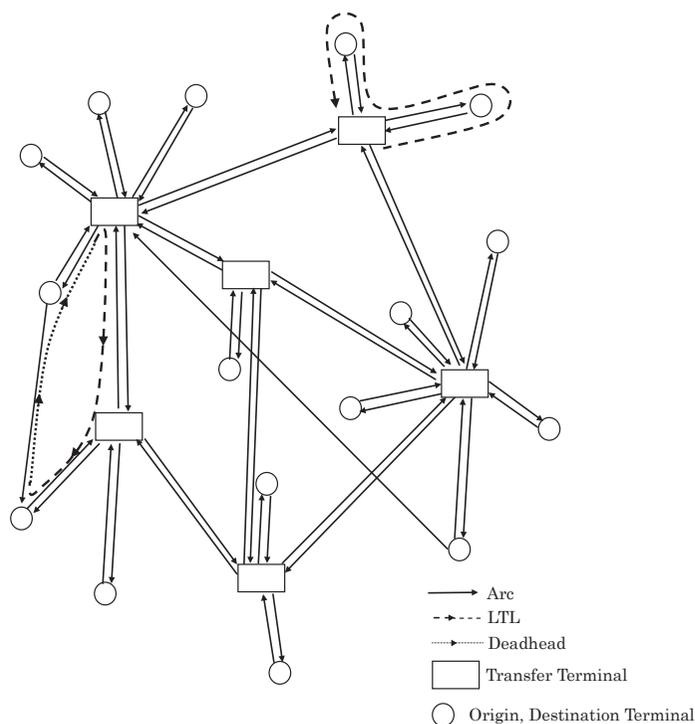


図 1 LTL ネットワーク設計問題

角は積替えターミナル，破線はトラックなどの巡回路を表す．図2に，木フローと分割フローを示す．上図では，終点を同一にするフローは木上を移動しているため，木フローとなる．下図では，終点を同一にするフローが途中のノードで分離しているため分割フローとなり，木フローではないためフロー木条件を満たさない．図3に，積替え回数制約を満たすフローを示す．ここでは，積替え回数の上限を2回としたものであり，積替え回数が3回のフローは実行可能なフローとはならない．図4に，輸送便の回送制約を示す．破線は回送便であり，輸送便と回送便を併せて同一のトラックなどが巡回することを表す．

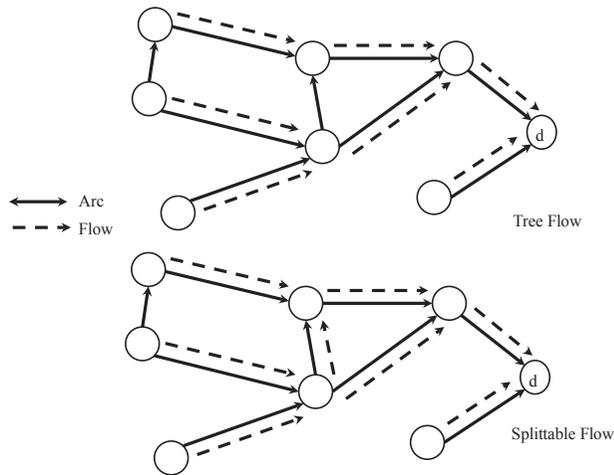


図2 木フロー

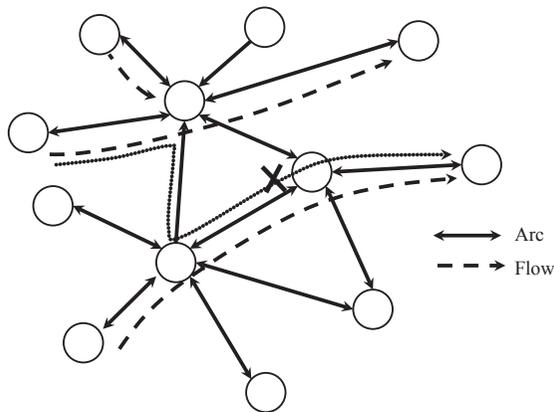


図3 積替え回数制約

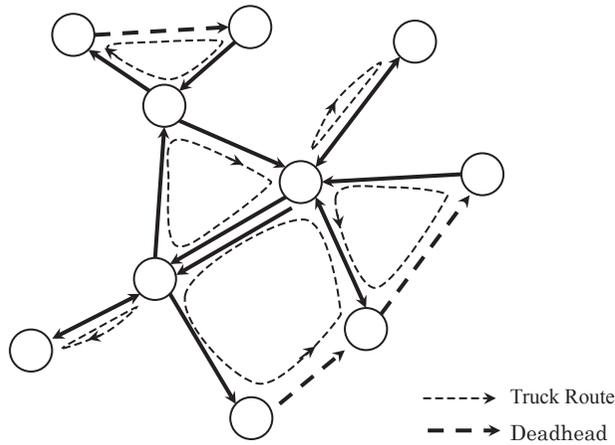


図4 輸送便の回送制約

2. 2 LTLD の前提条件, 記号および問題の定義

はじめに, *LTLD* の前提条件を示す.

- ・ ノード集合が与えられている.
- ・ 向きをもつアーク集合が与えられている.
- ・ アークには, 単位期間当たりの処理量の上限値であるアーク容量が与えられている.
- ・ アーク容量には下限値が与えられ, 下限値以上では連続的または離散的に設定された上限まで増加することができる.
- ・ アークには, アーク容量により与えられる非負のデザイン費用が与えられている.
- ・ 始点と終点をもつ OD ペアからなる OD ペア集合が与えられている.
- ・ アークには, OD ペアごとの全需要に対する非負のフロー費用が与えられている.
- ・ OD ペアごとの需要が与えられている.
- ・ OD ペアごとに経路するノード数の上限値が与えられている.
- ・ 同一のノードを終点とする OD ペアの需要は, 各始点から終点を根とする木上を移動する.
- ・ LTL 路線, TL 路線および回送路線はともにモデル上ではアークとして取り扱い, 区別はしない.

続いて, *LTLD* の定式化で使用する記号の定義を示す.

- ・ N : ノード集合
- ・ A : アーク集合
- ・ D : 終点集合
- ・ O^d : ノード d を終点とする OD ペアの始点集合
- ・ T^d : ノード d を終点, O^d に含まれるノードを始点としたフローが流れるアークで構

成される木集合

- ・ N_n^+ : ノード n を終点とするアークの終点であるノード集合
- ・ N_n^- : ノード n を始点とするアークの始点であるノード集合
- ・ S_{ij} : アーク (i, j) 上の区分集合
- ・ c_{ij}^{od} : アーク (i, j) 上における OD ペア (o, d) の全需要に対する非負のフロー費用
- ・ f_{ij} : アーク (i, j) のアーク容量の下限值に対する非負のデザイン費用
- ・ g_{ij} : アーク (i, j) の最大拡張アーク容量に対する非負のデザイン費用
- ・ C_{ij} : アーク (i, j) のアーク容量の下限值
- ・ E_{ij} : アーク (i, j) の最大拡張アーク容量
- ・ q^{od} : OD ペア (o, d) の需要
- ・ R^{od} : OD ペア (o, d) のフローが, その始点と終点を除いて経由するノード数の上限値
- ・ Δ_{ij}^t : 木 t にアーク (i, j) が含まれるとき 1, そうでないとき 0 を表す定数
- ・ δ_{ij}^{to} : 木 t 上において, OD ペアの始点 o から終点へのパスにアーク (i, j) が含まれるとき 1, そうでないとき 0 を表す定数
- ・ x_{ij}^{od} : OD ペア (o, d) のフローがアーク (i, j) 上を流れるとき 1, そうでないとき 0 であるアークフロー変数; 0-1変数
- ・ z_t^d : 終点を d とするフローが木 t 上を移動するとき 1, そうでないとき 0 であり, フロー木条件および積替え回数条件を満たす木フロー変数; 0-1変数
- ・ ξ_{ij}^{ods} : アーク (i, j) 上の OD ペア (o, d) の区分 s におけるフロー量を表す区分フロー変数; 連続変数
- ・ y_{ij} : アーク (i, j) を選択するとき 1, そうでないとき 0 であるデザイン変数; 0-1変数または整数変数
- ・ y_{ij}^d : 終点を d とする木がアーク (i, j) 上を含むとき 1, そうでないとき 0 である木変数; 0-1変数
- ・ w_{ij} : アーク (i, j) の拡張デザイン変数; 0 から 1 の連続変数
- ・ t_{ij}^s : アーク (i, j) 上のフロー量が区分 s に含まれるとき 1, そうでないとき 0 である区分デザイン変数; 0-1変数

3 サービス水準を考慮した問題の定式化

サービス水準を考慮した LTL ネットワーク設計問題 $LTL S$ では, 開設した LTL 路線のサービス水準, すなわち開設した路線上に一定数以上の輸送能力を提供がすることが必要となる. このため, アーク容量は LTL 路線のサービス水準の最低値を表し, フロー量がアーク容量を超えた場合, 付加的なアーク拡張容量と拡張デザイン費用が発生する. アーク拡張容量は追加的な輸送便の能力に対応するため, 現実的には週 3 便や月

2便のように単位期間当たりで考えるとデザイン変数は小数の離散値をとることになるが、このモデルでは連続数と仮定している。この節では、*LTLS*に対して区分的線形関数による定式化、拡張容量による定式化および木フローによる定式化を示す。

3. 1 区分的線形関数を用いた定式化

図5に、区分的線形関数による定式化におけるアーク容量、アークフロー量とデザイン費用の関係を示す。アーク (i, j) の容量 C_{ij} は最低サービス水準に対応する容量である。フロー量が C_{ij} 以下の場合には、固定的なデザイン費用 f_{ij} が発生する。一方、フロー量が C_{ij} を超えた場合には、フロー量に従って f_{ij}/C_{ij} の変動的なデザイン費用が発生する。このような関係を固定費用と線形の変動費用を区分的線形関数で表現することができる (Powell 1986, 片山直登2002)。サービス水準を考慮した問題 *LTLS* の区分的線形関数を用いた定式化 *LTLSP* を示す。

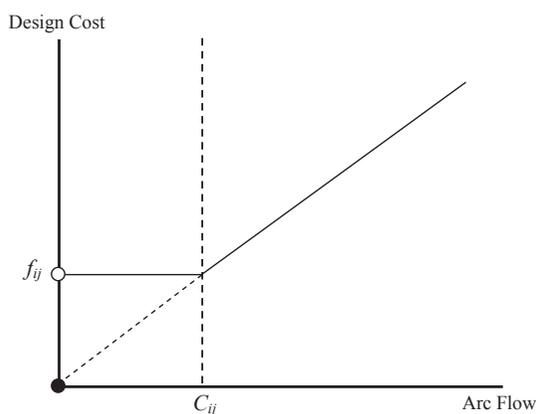


図5 区分的線形関数

(*LTLSP*)

$$\min \sum_{(i,j) \in A} \sum_{d \in D} \sum_{o \in O^d} c_{ij}^{od} x_{ij}^{od} + \sum_{(i,j) \in A} \max\{x_{ij}/C_{ij}, 1\} f_{ij} y_{ij} \quad (1)$$

subject to

$$\sum_{i \in N_n^+} x_{in}^{od} - \sum_{j \in N_n^-} x_{nj}^{od} = \begin{cases} -1 & \text{if } n = o \\ 1 & \text{if } n = d \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad \forall n \in N, o \in O^d, d \in D \quad (2)$$

$$x_{ij} = \sum_{d \in D} \sum_{o \in O^d} q^{od} x_{ij}^{od} \quad (i, j) \in A \quad (3)$$

$$\sum_{i \in N_n^+} y_{in} - \sum_{j \in N_n^-} y_{nj} = 0 \quad \forall n \in N \quad (4)$$

$$x_{ij}^{od} \leq y_{ij}^d \quad \forall (i, j) \in A, o \in O^d, d \in D \quad (5)$$

$$y_{ij}^d \leq y_{ij} \quad \forall (i, j) \in A, d \in D \quad (6)$$

$$\sum_{j \in N_n^+} y_{nj}^d \leq 1 \quad \forall n \in N, d \in D \quad (7)$$

$$\sum_{(i,j) \in A} x_{ij}^{od} \leq R^{od} + 1 \quad o \in O^d, d \in D \quad (8)$$

$$x_{ij}^{od} \in \{0, 1\} \quad \forall (i, j) \in A, o \in O^d, d \in D \quad (9)$$

$$y_{ij}^d \in \{0, 1\} \quad \forall (i, j) \in A, d \in D \quad (10)$$

$$y_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall (i, j) \in A \quad (11)$$

(1)式は目的関数であり、フロー費用とデザイン費用の総和を最小化する。第一項はフロー費用であり、フロー量に比例して発生する。第二項はデザイン費用であり、フロー量がアーク容量 C_{ij} 以下であれば固定費用 f_{ij} が発生し、フロー量がアーク容量を超えた場合はフロー量に比例するデザイン費用 f_{ij}/C_{ij} が発生する。(2)式はフロー保存式であり、ノードに流入するフロー変数値と流出するフロー変数値の差が、OD ペア (o, d) の始点であれば -1 、終点であれば 1 、その他のノードであれば 0 であることを表す。この式は、各 OD ペアについて、必ず始点から終点まで需要が移動することを保証する。(3)式は、OD ペアに関するアークフロー量と、アーク上の全体のアークフロー量の関係式である。(4)式は、アーク均衡条件である。左辺はノードを終点とするデザイン変数値の和、右辺はノードを始点とするデザイン変数値の和であり、これらが一致することを表す。これは、輸送便の回送を含む輸送便の均衡であり、ノードでの出入数が一致することにより巡回することを表す。(5)から(7)式は、終点を同じにするフローがフロー木条件を満たすことを表す。(5)式は、アーク (i, j) における OD ペア (o, d) に関する強制制約式である。この式は、アーク (i, j) が選択されるときには OD ペア (o, d) のアークフロー変数値が最大で 1 となり、アーク (i, j) が選択されないときには 0 となることを表す。(6)式は、アーク (i, j) 、終点 d に対するフローに関する強制制約式である。この式は、アーク (i, j) が選択されるときには終点 d の木変数値が最大で 1 となり、アーク (i, j) が選択されないときには 0 となることを表す。(7)式は、木変数により木が構成されることを表すもので、ノードから出る木変数は最大で 1 であることを表

す。(8)式は、積替え回数制約であり、OD ペア (o, d) のフローが流れるアーク数が積替え回数の上限 + 1 以下であることを表す。これは、フローが経由するノード数が積替え回数 R^{od} 以下となることを表す。(9)式はアークフロー変数の0-1条件、(10)式は木変数の0-1条件、(11)式はデザイン変数の0-1条件である。

3. 2 拡張容量を用いた定式化

最低サービス水準に対応する固定部分の容量と最低サービス水準を超える部分の容量に対応する拡張容量を用いて、アーク容量を表現することができる。図6に、拡張容量による定式化におけるアーク容量、拡張アーク容量、アークフロー量およびデザイン費用の関係を示す。アーク (i, j) のアーク容量 C_{ij} は最低サービス水準に対応する容量であり、拡張アーク容量は C_{ij} を超えるアークフロー量に対応する容量である。拡張アーク容量の最大値を E_{ij} とし、 C_{ij} を超えるアークアークフロー量に対応して拡張アーク容量は0から E_{ij} まで設定される。

最低サービス水準を考慮した問題 $LTLSE$ の拡張容量を用いた定式化 $LTLSE$ を示す。

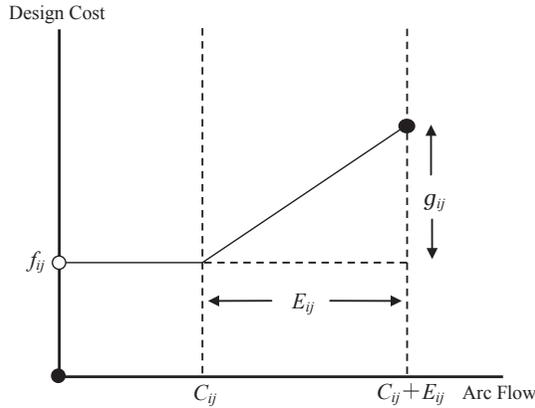


図6 拡張アーク容量とアークフロー量

($LTLSE$)

$$\min \sum_{(i,j) \in A} \sum_{d \in D} \sum_{o \in C^d} c_{ij}^{od} x_{ij}^{od} + \sum_{(i,j) \in A} f_{ij} y_{ij} + \sum_{(i,j) \in A} g_{ij} w_{ij} \quad (12)$$

subject to

$$\sum_{i \in N_n^+} x_{in}^{od} - \sum_{j \in N_n^-} x_{nj}^{od} = \begin{cases} -1 & \text{if } n = o \\ 1 & \text{if } n = d \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad \forall n \in N, o \in O^d, d \in D \quad (13)$$

$$\sum_{d \in D} \sum_{o \in O^d} q^{od} x_{ij}^{od} \leq C_{ij} y_{ij} + E_{ij} w_{ij} \quad \forall (i, j) \in A \quad (14)$$

$$\sum_{i \in N_n^+} (y_{in} + w_{in}) - \sum_{j \in N_n^-} (y_{nj} + w_{nj}) = 0 \quad \forall n \in N \quad (15)$$

$$x_{ij}^{od} \leq y_{ij}^d \quad \forall (i, j) \in A, o \in O^d, d \in D \quad (16)$$

$$y_{ij}^d \leq y_{ij} \quad \forall (i, j) \in A, d \in D \quad (17)$$

$$\sum_{j \in N_n^+} y_{nj}^d \leq 1 \quad \forall n \in N, d \in D \quad (18)$$

$$\sum_{(i,j) \in A} x_{ij}^{od} \leq R^{od} + 1 \quad o \in O^d, d \in D \quad (19)$$

$$w_{ij} \leq y_{ij} \quad \forall (i, j) \in A \quad (20)$$

$$x_{ij}^{od} \in \{0, 1\} \quad \forall (i, j) \in A, o \in O^d, d \in D \quad (21)$$

$$y_{ij}^d \in \{0, 1\} \quad \forall (i, j) \in A, d \in D \quad (22)$$

$$y_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall (i, j) \in A \quad (23)$$

$$0 \leq w_{ij} \leq 1 \quad \forall (i, j) \in A \quad (24)$$

(12)式は目的関数であり、フロー費用およびデザイン費用の固定費用と拡張容量に対するデザイン費用の変動費の総和を最小化する。(14)式は、容量制約式である。この式は、アーク (i, j) が選択されるとき、左辺はアーク上を移動するフロー量の合計であり、これが右辺のアーク容量とアーク拡張容量の和以下であることを表す。また、アークが選択されないときはフロー量の合計が0であることを表す。(15)式は、アーク均衡条件である。左辺はノードを終点とするデザイン変数値と拡張デザイン変数値の和であり、右辺はノードを始点とするデザイン変数値と拡張デザイン変数値の和であり、これらが一致することを表す。(20)式は、デザイン変数と拡張デザイン変数の関係式である。この式は、拡張デザイン変数値が1のときは最大で1、デザイン変数値が0のときは0となることを表す。(24)式は拡張フロー変数の連続条件と上限である。

3. 3 木フローを用いた定式化

前節までに示した二つの定式化では、アーク上のフロー量を変数とし、フロー木は制約条件として表している。ここでは同一の終点をもつ OD ペア全体のフローを表す木フロー変数を用いて、問題を表現する。木フロー変数はフロー木条件を満たしているため、制約としてのフロー木条件は必要としない。また、積替え回数条件も同様である。ただし、木フロー変数の数は膨大なものとなる。最低サービス水準を考慮した問題 *LTLS* の木フローを用いた定式化 *LTLST* を示す。

(*LTLST*)

$$\min \sum_{(i,j) \in A} \sum_{d \in D} \sum_{o \in O^d} \sum_{t \in T^d} \delta_{ij}^{to} c_{ij}^{od} z_t^d + \sum_{(i,j) \in A} f_{ij} y_{ij} + \sum_{(i,j) \in A} g_{ij} w_{ij} \quad (25)$$

subject to

$$\sum_{t \in T^d} z_t^d = 1 \quad \forall d \in D \quad (26)$$

$$\sum_{d \in D} \sum_{t \in T^d} \sum_{o \in O^d} \delta_{ij}^{to} q^{od} z_t^d \leq C_{ij} y_{ij} + E_{ij} w_{ij} \quad \forall (i, j) \in A \quad (27)$$

$$\sum_{i \in N_n^+} (y_{in} + w_{in}) - \sum_{j \in N_n^-} (y_{nj} + w_{nj}) = 0 \quad \forall n \in N \quad (28)$$

$$\sum_{t \in T^d} \Delta_{ij}^t z_t^d \leq y_{ij} \quad \forall d \in D, (i, j) \in A \quad (29)$$

$$w_{ij} \leq y_{ij} \quad \forall (i, j) \in A \quad (30)$$

$$z_t^d \in \{0, 1\} \quad \forall t \in T^d, d \in D \quad (31)$$

$$y_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall (i, j) \in A \quad (32)$$

$$0 \leq w_{ij} \leq 1 \quad \forall (i, j) \in A \quad (33)$$

(25)式は目的関数であり、フロー費用、デザイン費用の固定費用と拡張容量に対するデザイン費用の変動費の総和を最小化する。ここで、 $\sum_{t \in T^d} \delta_{ij}^{to} z_t^d$ はアークフロー x_{ij}^{od} に一致し、第一項はフロー費用を表す。(26)式は、OD ペア (o, d) の木フロー変数値の合計が1、すなわちノード d を終点とするフローは単一の木上のみで流れることを表す。(27)式は、アーク (i, j) が選択されるときはアーク上を移動するフロー量の合計がアーク容量とアーク拡張容量の和以下であり、アークが選択されないときは0であることを表す容量制約式である。(29)式は、アーク (i, j) における終点を d とするフローに関する強制制約式である。左辺はアーク (i, j) を通る木フロー量の和であり、アーク (i, j)

が選択されるときに高々 1 であり，そうでないとき 0 となる．(3)式は木フロー変数の 0-1 条件である．

$LTLST$ は， $\sum_{d \in D} |T^d|$ 個である指数個の木フロー変数をもつ問題となる．木フロー変数である 0-1 変数が指数個と膨大なものとなるので，小規模な問題であってもこの定式化を直接解くことは困難である．実際には，逐次，必要な木フロー変数を生成して問題を解く列生成法が用いられる．この列生成法をうまく適用すれば，アークフローによる定式化の場合よりも，陽的に使用する変数の数を抑えることができる．

4 複数容量をもつ LTL ネットワーク設計問題の定式化

LTL ネットワーク設計問題の多くの問題では，デザイン変数が 0-1 の離散変数であり，同一アーク上の一種類のアーク容量，たとえば一台の路線便を開設することが前提となる．また，サービス水準を考慮した問題では，サービス水準以上の容量の場合は連続的に拡張できることを前提としている．しかし，複数台数の設置，すなわちデザイン変数が非負の離散値をとることがより一般的である．この節では，アークが複数容量をもつ LTL ネットワーク設計問題 LTM を取り扱う．アークが複数容量をもつ LTL ネットワーク設計問題におけるアークフロー量とデザイン費用の関係を図 7 に示す．アーク容量およびデザイン費用はアークフロー量に従って，階段状に変化する．

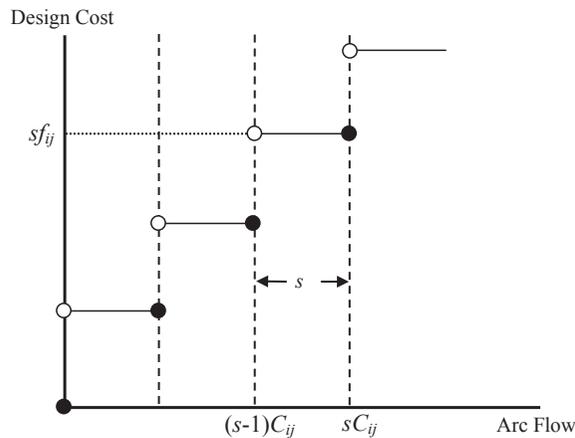


図 7 複数容量とアークフロー量

4. 1 整数変数を用いた定式化

複数容量をもつ LTL ネットワーク設計問題に対する定式化は、単に0-1デザイン変数を整数変数に置き換えたものとなる。デザイン変数を整数変数に置き換えた整数変数を用いた定式化 *LTLMI* を示す。

(*LTLMI*)

$$\min \sum_{(i,j) \in A} \sum_{d \in D} \sum_{o \in O^d} c_{ij}^{od} x_{ij}^{od} + \sum_{(i,j) \in A} f_{ij} y_{ij} \quad (34)$$

subject to

$$\sum_{i \in N_n^+} x_{in}^{od} - \sum_{j \in N_n^-} x_{nj}^{od} = \begin{cases} -1 & \text{if } n = o \\ 1 & \text{if } n = d \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad \forall n \in N, o \in O^d, d \in D \quad (35)$$

$$\sum_{d \in D} \sum_{o \in O^d} q^{od} x_{ij}^{od} \leq C_{ij} y_{ij} \quad \forall (i, j) \in A \quad (36)$$

$$\sum_{i \in N_n^+} y_{in} - \sum_{j \in N_n^-} y_{nj} = 0 \quad \forall n \in N \quad (37)$$

$$x_{ij}^{od} \leq y_{ij}^d \quad \forall (i, j) \in A, o \in O^d, d \in D \quad (38)$$

$$y_{ij}^d \leq y_{ij} \quad \forall (i, j) \in A, d \in D \quad (39)$$

$$\sum_{j \in N_n^+} y_{nj}^d \leq 1 \quad \forall n \in N, d \in D \quad (40)$$

$$\sum_{(i,j) \in A} x_{ij}^{od} \leq R^{od} + 1 \quad o \in O^d, d \in D \quad (41)$$

$$x_{ij}^{od} \in \{0, 1\} \quad \forall (i, j) \in A, o \in O^d, d \in D \quad (42)$$

$$y_{ij}^d \in \{0, 1\} \quad \forall (i, j) \in A, d \in D \quad (43)$$

$$y_{ij} \in \text{Integer} \quad \forall (i, j) \in A \quad (44)$$

(44)式は、デザイン変数の整数条件である。

4. 2 区分を用いた定式化

複数容量をもつ問題は区分的線形をもつ問題の特殊系であるため、区分的線形をもつ問題の定式化 (Croxtton et al. 2007, 片山直登2009) を用いることができる。区分は階段

状の区間を表し、区分 s は s 番目の区間に対応する。複数容量をもつ問題 $LTLM$ の区分を用いた定式化 $LTLMD$ は次のようになる。

($LTLMD$)

$$\min \sum_{(i,j) \in A} \sum_{s \in S_{ij}} \sum_{d \in D} \sum_{o \in O^d} c_{ij}^{od} \zeta_{ij}^{ods} + \sum_{(i,j) \in A} \sum_{s \in S_{ij}} s f_{ij} t_{ij}^s \quad (45)$$

subject to

$$\sum_{i \in N_n^+} x_{in}^{od} - \sum_{j \in N_n^-} x_{nj}^{od} = \begin{cases} -1 & \text{if } n = o \\ 1 & \text{if } n = d \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad \forall n \in N, o \in O^d, d \in D \quad (46)$$

$$q^{od} x_{ij}^{od} = \sum_{s \in S_{ij}} \zeta_{ij}^{ods} \quad \forall o \in O^d, d \in D, (i, j) \in A \quad (47)$$

$$\sum_{i \in N_n^+} \sum_{s \in S_{ij}} t_{in}^s - \sum_{j \in N_n^-} \sum_{s \in S_{ij}} t_{nj}^s = 0 \quad \forall n \in N \quad (48)$$

$$x_{ij}^{od} \leq y_{ij}^d \quad \forall (i, j) \in A, o \in O^d, d \in D \quad (49)$$

$$y_{ij}^d \leq \sum_{s \in S_{ij}} t_{ij}^s \quad \forall (i, j) \in A, d \in D \quad (50)$$

$$\sum_{j \in N_n^+} y_{nj}^d \leq 1 \quad \forall n \in N, d \in D \quad (51)$$

$$\sum_{(i,j) \in A} x_{ij}^{od} \leq R^{od} + 1 \quad o \in O^d, d \in D \quad (52)$$

$$(s-1)C_{ij} t_{ij}^s \leq \sum_{d \in D} \sum_{o \in O^d} \zeta_{ij}^{ods} \leq s C_{ij} t_{ij}^s \quad \forall s \in S_{ij}, (i, j) \in A \quad (53)$$

$$0 \leq \zeta_{ij}^{ods} \leq q^{od} t_{ij}^s \quad \forall o \in O^d, d \in D, s \in S_{ij}, (i, j) \in A \quad (54)$$

$$\sum_{s \in S_{ij}} t_{ij}^s \leq 1 \quad \forall (i, j) \in A \quad (55)$$

$$x_{ij}^{od} \in \{0, 1\} \quad \forall (i, j) \in A, o \in O^d, d \in D \quad (56)$$

$$y_{ij}^d \in \{0, 1\} \quad \forall (i, j) \in A, d \in D \quad (57)$$

$$t_{ij}^s \in \{0, 1\} \quad \forall s \in S_{ij}, (i, j) \in A \quad (58)$$

(45)式は目的関数であり、フロー費用および区分ごとのデザイン費用の総和を最小化する

る。(47)式は、OD ペア (o, d) に関してアークフロー量と区分フロー量の和が一致することを表す。(48)式は、アーク均衡条件である。左辺はノードを終点とする区分デザイン変数の和であり、右辺はノードを始点とする区分デザイン変数の和であり、これらが一致することを表す。(53)式は、区分デザイン変数と区分フローの関係式である。区分デザイン変数が1のときに限り、この区分に区分フローが存在することを表す。(54)式は、区分に関する区分デザイン変数と区分フロー変数の強制制約式である。(55)式は、アーク (i, j) 上ではたかだか一つの区分変数が1となることを表す。(58)式は区分デザイン変数の0-1条件である。

4. 3 木フローを用いた定式化

サービス水準を考慮した問題の定式化と同様に、複数容量を考慮した問題も木フローを用いて定式化することができる。複数容量を考慮した問題 $LTLM$ の木フローを用いた定式化 $LTLMT$ を示す。

($LTLMT$)

$$\min \sum_{(i,j) \in A} \sum_{s \in S_{ij}} \sum_{d \in D} \sum_{o \in O^d} c_{ij}^{od} \zeta_{ij}^{ods} + \sum_{(i,j) \in A} \sum_{s \in S_{ij}} s f_{ij} t_{ij}^s \quad (59)$$

subject to

$$\sum_{t \in T^d} z_t^d = 1 \quad \forall d \in D \quad (60)$$

$$\sum_{t \in T^d} \delta_{ij}^{to} q^{od} z_t^d = \sum_{s \in S_{ij}} \zeta_{ij}^{ods} \quad \forall o \in O^d, d \in D, (i, j) \in A \quad (61)$$

$$\sum_{i \in N_n^+} \sum_{s \in S_{ij}} t_{in}^s - \sum_{j \in N_n^-} \sum_{s \in S_{ij}} t_{nj}^s = 0 \quad \forall n \in N \quad (62)$$

$$(s-1)C_{ij} t_{ij}^s \leq \sum_{d \in D} \sum_{o \in O^d} \zeta_{ij}^{ods} \leq s C_{ij} t_{ij}^s \quad \forall s \in S_{ij}, (i, j) \in A \quad (63)$$

$$0 \leq \zeta_{ij}^{ods} \leq q^{od} t_{ij}^s \quad \forall o \in O^d, d \in D, s \in S_{ij}, (i, j) \in A \quad (64)$$

$$\sum_{s \in S_{ij}} t_{ij}^s \leq 1 \quad \forall (i, j) \in A \quad (65)$$

$$z_t^d \in \{0, 1\} \quad \forall t \in T^d, d \in D \quad (66)$$

$$t_{ij}^s \in \{0, 1\} \quad \forall s \in S_{ij}, (i, j) \in A \quad (67)$$

(60)式は、OD ペア (o, d) の木フロー変数値の合計が1、すなわちノード d を終点とするフローは単一の上のみで流れることを表す。(61)式は、OD ペア (o, d) に関して木フロー量と区分フロー量の和が一致することを表す。

5 数値実験

最低サービス水準を考慮した問題に対する拡張容量を用いた定式化 *LTLSE*、および複数容量を考慮した問題に対する整数変数をもつ定式化 *LTLMI* に対して、数値実験を行った。容量制約をもつネットワーク設計問題に対する Crainic らのベンチマーク問題である31問の C 問題 (Crainic et al. 2000) のデータをもとに、同一ノードを終点とするすべての需要に対してフロー木条件、および輸送便の回送制約であるアーク均衡条件を付加し、さらに積替え回数として2回の制約を付加した問題を作成して使用した。また、*LTLSE* では、アーク (i, j) の拡張容量 E_{ij} をアーク容量 C_{ij} の4倍とし、単位当たりの拡張容量費用を f_{ij}/C_{ij} とした。

数値実験では、*LTLSE* および *LTLMI* を最適化ソルバー CPLEX により解き、上界値または最適値、および下界値を求めた。CPLEX 実行時に計算時間が30時間を超えた場合は、その時点における最良の下界値と上界値を求めた。また、CPLEX 実行時にエラーにより終了した場合もその時点における最良の下界値と上界値を求め、便宜上、計算時間を30時間とした。

LTL モデルが上界値に及ばず影響を考察するために、同じベンチマーク問題のデータを用いたフローが連続変数であり、容量制約をもつアセットバランスを考慮した容量制約をもつネットワーク設計問題 (ASSET) に対するモデルの上界値 (Katayama 2013) との比較を行った。この問題では、アークの均衡制約を含むが、フロー木制約および積替え回数制約を考慮していない。

数値実験に使用したコンピュータは CPU INTEL i7 3770K 3.5GHz 4Core, RAM 24GByte であり、OS は UBUNTU 13.04、最適化ソルバーは CPLEX 12.4 (Parallel Version) である。

表1に、C問題に対する *LTLSE* の平均誤差 (ERROR, (上界値-下界値)/下界値)、平均計算時間 (TIME)、最適解が求められた問題数と総問題数 (No-OPT)、および ASSET に対する *LTLSE* の上界値の平均減少率 (ASSET-DEC) を示す。誤差の平均値は1.75%であり、比較的小さな値となっている。平均計算時間は79177.82秒の約22時間で

表1 拡張容量を用いた定式化 *LTLSE* の結果

ERROR(%)	TIME(sec)	No-OPT	ASSET-DEC(%)
1.75	79177.82	9/31	1.44

ある。これは、最適解が求められた問題が9問、求めることができなかった問題が22問であり、大半の問題で計算時間が上限の30時間に達しているためである。ASSETに対する $LTLSE$ の上界値の平均減少率は1.44%である。上界値から見ると、積替え回数制約やフロー木制約の影響は小さく、ASSETは $LTLSE$ の比較的良好な近似問題となっていることが分かる。

表2 拡張容量を用いた定式化 $LTLSE$ の個別問題に対する結果

Problem	LB	UB	ERROR(%)	TIME(sec)
20/230/040/V/L	433440.1 ^O	433440.1	0.00	0.86
20/230/040/V/T	359774.4 ^O	359774.4	0.00	3.02
20/230/040/F/T	616596.9 ^O	616596.9	0.00	2.09
20/230/200/V/L	95678.3 ^L	97620.7	2.03	108000.00
20/230/200/F/L	136286.1 ^L	143724.8	5.46	108000.00
20/230/200/V/T	100018.6 ^O	100018.6	0.00	49577.33
20/230/200/F/T	133650.7 ^L	138453.8	3.59	108000.00
20/300/040/V/L	436982.0 ^O	436982.0	0.00	0.91
20/300/040/F/L	606166.4 ^O	606166.4	0.00	170.77
20/300/040/V/T	447307.6 ^O	447307.6	0.00	3.46
20/300/040/F/T	599739.4 ^O	599739.4	0.00	10.57
20/300/200/V/L	75588.7 ^L	77345.2	2.32	108000.00
20/300/200/F/L	115473.0 ^L	119548.8	3.53	108000.00
20/300/200/V/T	73203.7 ^L	74874.5	2.28	108000.00
20/300/200/F/T	106541.4 ^L	110825.1	4.02	108000.00
30/520/100/V/L	54084.8 ^L	54496.4	0.76	108000.00
30/520/100/F/L	92784.6 ^L	98075.2	5.70	108000.00
30/520/100/V/T	51561.7 ^L	51738.2	0.34	108000.00
30/520/100/F/T	97214.4 ^L	100310.1	3.18	108000.00
30/520/400/V/L	109245.6 ^L	110806.3	1.43	108000.00
30/520/400/F/L	145876.8 ^L	148985.0	2.13	108000.00
30/520/400/V/T	110488.7 ^L	112256.0	1.60	108000.00
30/520/400/F/T	147740.8 ^L	151618.8	2.62	108000.00
30/700/100/V/L	48780.6 ^O	48780.6	0.00	28743.47
30/700/100/F/L	60470.1 ^L	61279.4	1.34	108000.00
30/700/100/V/T	45192.8 ^L	45656.8	1.03	108000.00
30/700/100/F/T	55030.7 ^L	55757.5	1.32	108000.00
30/700/400/V/L	96469.8 ^L	98102.0	1.69	108000.00
30/700/400/F/L	130461.2 ^L	135840.1	4.12	108000.00
30/700/400/V/T	94113.2 ^L	95593.1	1.57	108000.00
30/700/400/F/T	126130.3 ^L	128969.3	2.25	108000.00

表 2 に、*LTLSE* の個別問題に対する下界値 (LB), 上界値 (UB), 誤差 (ERROR) および計算時間 (TIME) を示す. LB 欄の “O” は最適値, “L” は下界値であることを表している. 誤差の最小値は0.00% であり, 最大値は30/520/100/F/L の5.70% である. なお, 3% を超えている問題が7 問ある. また, 計算時間のばらつきは大変大きい. 数秒から数分の短時間で最適解が求められた問題が7 問あり, これらは OD ペア数が40 と OD ペア数が少ない問題である. 一方, 1 問を除く OD ペア数が100以上の問題では, 30時間でも最適解が求まっていない.

表 3 に、C 問題に対する *LTLMI* の平均誤差 (ERROR, (上界値 - 下界値) / 下界値), 平均計算時間 (TIME), 最適解が求められた問題数と総問題数 (No-OPT), および *ASSET* に対する *LTLMI* の上界値の平均減少率 (ASSET-DEC) を示す. 誤差の平均値は1.92% であり, 比較的小さな値となっているが, *LTLSE* よりも0.2% 程度大きくなっている. 平均計算時間は69891.07秒であり, 19時間を超えている. これは, 最適解が求められた問題が12問, 求めることができなかった問題が19問であり, 大半の問題で計算時間が上限の30時間に達しているためである. *ASSET* に対する *LTLMI* の上界値の平均減少率は0.34% である. 上界値から見ると, 積替え回数制約やフロー木制約の影響は小さく, *ASSET* は *LTLMI* の良い近似問題となっていることが分かる.

表 4 に、*LTLMI* の個別問題に対する下界値 (LB), 上界値 (UB), 誤差 (ERROR) および計算時間 (TIME) を示す. LB 欄の “O” は最適値, “L” は下界値であることを表している. 誤差の最小値は0.00% であり, 最大値は30/70/400/F/L の6.18% である. なお, 3% を超えている問題が10問ある. また, 計算時間のばらつきは大変大きい. 数秒から数分の短時間で最適解が求められた問題が9 問あり, これらは OD ペア数が40と100 の一部と OD ペア数が少ない問題である. 一方, OD ペア数が100の一部と100を超える問題では, 30 時間でも最適解が求まっていない.

表 5 に、*LTLSE*, *LTLMI*, *ASSET* に対する個別の問題の上界値, *ASSET* に対する *LTLSE* の減少率 (LTLSE-DEC), および *ASSET* に対する *LTLMI* の減少率 (LTLMI-DEC) を示す. *ASSET* と比較して, アーク容量は緩和されているが, 積替え回数制約およびフロー木制約が加わっているため, 上界値の差は正負が混在している. また, 最適解が求められていない問題では, 最適値ではなく, 上界値同士の比較であることに注意が必要である. *ASSET* に対する *LTLSE* の減少率の最大値は20/230/040/V/L の7.39%, 最小値は20/230/200/F/L の-3.11% であり, OD ペア数40の問題で差が大きくなっている. *ASSET* に対する *LTLMI* の減少率の最大値は20/230/040/V/L の

表 3 複数容量をもつ定式化*LTLMI*の結果

ERROR(%)	TIME(sec)	No-OPT	ASSET-DEC(%)
1.92	69891.07	12/31	0.34

表4 複数容量をもつ定式化LTLMIの個別問題に対する結果

Problem	LB	UB	ERROR(%)	TIME(sec)
20/230/040/V/L	432639.0 ^O	432639.0	0.00	1.43
20/230/040/V/T	362041.0 ^O	362041.0	0.00	0.93
20/230/040/F/T	622865.0 ^O	622865.0	0.00	1.05
20/230/200/V/L	96246.2 ^L	98320.0	2.15	108000.00
20/230/200/F/L	136517.4 ^L	141847.0	3.90	108000.00
20/230/200/V/T	99741.0 ^L	101214.0	1.48	108000.00
20/230/200/F/T	135261.9 ^L	140651.0	3.98	108000.00
20/300/040/V/L	436721.0 ^O	436721.0	0.00	1.73
20/300/040/F/L	606140.0 ^O	606140.0	0.00	2.07
20/300/040/V/T	452627.0 ^O	452627.0	0.00	2.79
20/300/040/F/T	618692.0 ^O	618692.0	0.00	1.64
20/300/200/V/L	76065.5 ^L	78960.0	3.81	108000.00
20/300/200/F/L	116037.6 ^L	120704.0	4.02	108000.00
20/300/200/V/T	73770.6 ^L	75278.0	2.04	108000.00
20/300/200/F/T	107739.3 ^L	112130.0	4.08	108000.00
30/520/100/V/L	54652.0 ^O	54652.0	0.00	4009.30
30/520/100/F/L	94167.2 ^L	97862.0	3.92	108000.00
30/520/100/V/T	52617.0 ^O	52617.0	0.00	150.34
30/520/100/F/T	100003.0 ^L	101975.0	1.97	108000.00
30/520/400/V/L	109931.3 ^L	112709.0	2.53	108000.00
30/520/400/F/L	146853.7 ^L	151532.0	3.19	108000.00
30/520/400/V/T	111225.9 ^L	113825.0	2.34	108000.00
30/520/400/F/T	149063.0 ^L	154459.0	3.62	108000.00
30/700/100/V/L	48802.0 ^O	48802.0	0.00	2990.29
30/700/100/F/L	60827.3 ^L	61894.0	1.75	108000.00
30/700/100/V/T	46237.0 ^O	46237.0	0.00	427.96
30/700/100/F/T	57153.0 ^O	57153.0	0.00	107033.78
30/700/400/V/L	97311.1 ^L	98986.0	1.72	108000.00
30/700/400/F/L	131339.6 ^L	139457.0	6.18	108000.00
30/700/400/V/T	94451.1 ^L	96848.0	2.54	108000.00
30/700/400/F/T	126524.9 ^L	132121.0	4.42	108000.00

表5 上界値の比較

Problem	LTLSE	LTLMI	ASSET	LTLSE	LTLMI
				-DEC(%)	-DEC(%)
20/230/040/V/L	433440.1	432639.0	434469.0	0.24	0.42
20/230/040/V/T	359774.4	362041.0	376933.0	4.55	3.95
20/230/040/F/T	616596.9	622865.0	665779.0	7.39	6.45
20/230/200/V/L	97620.7	98320.0	97273.5	-0.36	-1.08
20/230/200/F/L	143724.8	141847.0	139395.0	-3.11	-1.76
20/230/200/V/T	100018.6	101214.0	100221.0	0.20	-0.99
20/230/200/F/T	138453.8	140651.0	139059.0	0.44	-1.14
20/300/040/V/L	436982.0	436721.0	438206.0	0.28	0.34
20/300/040/F/L	606166.4	606140.0	607278.0	0.18	0.19
20/300/040/V/T	447307.6	452627.0	468232.0	4.47	3.33
20/300/040/F/T	599739.4	618692.0	618238.0	2.99	-0.07
20/300/200/V/L	77345.2	78960.0	77462.7	0.15	-1.93
20/300/200/F/L	119548.8	120704.0	119259.0	-0.24	-1.21
20/300/200/V/T	74874.5	75278.0	76207.5	1.75	1.22
20/300/200/F/T	110825.1	112130.0	111462.0	0.57	-0.60
30/520/100/V/L	54496.4	54652.0	54683.0	0.34	0.06
30/520/100/F/L	98075.2	97862.0	98094.0	0.02	0.24
30/520/100/V/T	51738.2	52617.0	53023.0	2.42	0.77
30/520/100/F/T	100310.1	101975.0	101130.0	0.81	-0.84
30/520/400/V/L	110806.3	112709.0	114565.1	3.28	1.62
30/520/400/F/L	148985.0	151532.0	152776.3	2.48	0.81
30/520/400/V/T	112256.0	113825.0	116642.0	3.76	2.42
30/520/400/F/T	151618.8	154459.0	154917.1	2.13	0.30
30/700/100/V/L	48780.6	48802.0	48693.0	-0.18	-0.22
30/700/100/F/L	61279.4	61894.0	61351.0	0.12	-0.89
30/700/100/V/T	45656.8	46237.0	46750.0	2.34	1.10
30/700/100/F/T	55757.5	57153.0	56169.0	0.73	-1.75
30/700/400/V/L	98102.0	98986.0	99332.5	1.24	0.35
30/700/400/F/L	135840.1	139457.0	137618.7	1.29	-1.34
30/700/400/V/T	95593.1	96848.0	97322.0	1.78	0.49
30/700/400/F/T	128969.3	132121.0	132405.0	2.59	0.21

6.45%, 最小値は20/300/200/V/Lの-1.93%であり, ODペア数40の問題で差が大きくなっている. また, ASSETに対するLTLSEの減少率よりも概ね小さくなっている. このように, ODペア数100以上の問題では, アセットバランスを考慮した容量制約をもつネットワーク設計問題は, LTLネットワーク設計問題の良い近似問題となっている.

6 おわりに

本研究では, LTLネットワーク設計問題を対象として, サービス水準を考慮したLTLネットワーク設計問題および離散容量をもつLTLネットワーク設計問題に対する定式化を示した. サービス水準を考慮したLTLネットワーク設計問題に対しては, 区分的線形関数を用いた定式化, 拡張容量を用いた定式化, および木フローを用いた定式化を示した. 離散容量をもつLTLネットワーク設計問題に対しては, 複数容量を用いた定式化, 区分を用いた定式化, および木フローを用いた定式化を示した. LTLネットワーク設計問題では, 回送便制約, 積替回数制約, フロー木制約を考慮している. また, 拡張容量を用いた定式化と複数容量を用いた定式化に対して, 最適化ソルバーを用いた数値実験を行い, 問題の定義や定式化による解の変化を考察した.

ODペア数が40を超える問題ではCPLEXで最適解を求めることができない問題も多く存在するため, 短時間で良い解を求める近似解法を開発することが必要である. また, ODペア数の多い問題に対して, アセットバランスを考慮した容量制約をもつネットワーク設計問題は, LTLネットワーク設計問題の良い近似問題となっていることが明らかになった.

本研究は科学研究費基盤研究C(課題番号25350454)による成果の一部である.

参考文献

- Balakrishnan, A., T. L. Magnanti, P. Mirchandani. 1997. Network design. M. Dell'Amico, F. Maffioli, S. Martello, eds., *Annotated Bibliographies in Combinatorial Optimization*. John Wiley & Sons, New York, 311-334.
- Costa, A. M. 2005. A survey on benders decomposition applied to fixed-charge network design problems. *Computers and Operations Research* **32** 1429-1450.
- Crainic, T. G. 2003. Long-haul freight transportation. R. W. Hall, ed., *Handbook of Transportation Science*. Kluwer Academic Publishers, 451-516.
- Crainic, T. G., M. Gendreau, J. M. Farvolden. 2000. A simplex-based tabu search for capacitated network design. *INFORMS journal on Computing* **12** 223-236.
- Crainic, T. G., J. Roy. 1992. Design of regular intercity driver routes for the LTL motor carrier industry. *Transportation Science* **26** 280-295.

- Crainic, T. G., J. Roy. 1993. OR tools for tactical freight transportation planning. *European journal of Operational Research* **33** 290–297.
- Croxton, K. L., B. Gendron, T. L. Magnanti. 2007. Variable disaggregation in network flow problems with piecewise linear costs. *Operations Research* **55** 146–157.
- Erera, A., M. Hewitt, M. Savelsbergh, Y. Zhang. 2012. Improved load plan design through integer programming based local search. *Transportation Science* doi:\10.1287/trsc.1120.0441.
- Farvolden, J. M., W. B. Powell. 1994. Subgradient methods for the service network design problem. *Transportation Science* **28**(3) 256–272.
- Frangionia, A., B. Gendron. 2009. 0–1 reformulations of the multicommodity capacitated network design problem. *Discrete Applied Mathematics* **6** 1229–1241.
- Gendron, B., T. G. Crainic, A. Frangioni. 1997. Multicommodity capacitated network design. Tech. Rep. CIRRELT-98-14, Centre de recherche sur les transports, Université de Montréal.
- Hoppe, B., E. Z. Klampfl, C. McZeal, J. Rich. 1999. Strategic load-planning for less-than-truckload trucking. Tech. Rep. CRPC-TR99812-S, Center for Research on Parallel Computation, Rice University.
- Jarrah, A. I., E. Johnson, L. C. Neubert. 2009. Large-scale, less-than-truckload service network design. *Operations Research* **57**(3) 609–625.
- Katayama, N. 2013. A combined capacity scaling, restricted branch-and-bound and local branching approach to service network design problem. *INFORMS Journal on Computing* Submitted for publication.
- Magnanti, T. L., R. T. Wong. 1984. Network design and transportation planning : Models and algorithms. *Transportation Science* **18** 1–55.
- Minoux, M. 1989. Network synthesis and optimum network design problems: Models, solution methods and applications. *Networks* **19** 313–360.
- Powell, W. B. 1986. A local improvement heuristic for the design of less-than-truckload motor carrier networks. *Transportation Science* **20** 246–257.
- Powell, W. B., I. A. Koskosidis. 1992. Shipment routing algorithms with tree constraints. *Transportation Science* **26**(3) 230–245.
- Powell, W. B., Y. Sheffi. 1983. The load planning problem of motor carriers: Problem description and a proposed solution approach. *Transportation Research A* **17** 471–480.
- Powell, W. B., Y. Sheffi. 1989. Design and implementation of an interactive optimization system for network design in the motor carrier industry. *Operations Research* **37** 12–29.
- Roy, J., T. G. Crainic. 1992. Improving intercity freight routing with a tactical planning model. *Interfaces* **22** 31–44.
- Roy, J., L. Delorme. 1989. NETPLAN: A network optimization model for tactical planning in

- the less-than-truckload motor-carrier industry. *INFOR* **27** 22–35.
- Wong, R. T. 1984. Introduction and recent advances in network design: Models and algorithms. M. Florian, ed., *Transportation Planning Models*. Elsevier Science, North Holland, Amsterdam, 187–225.
- Wong, R. T. 1985. Location and network design. M. O’heEigeartaigh, J. Lenstra, A. RinnooyKan, eds., *Combinatorial Optimization Annotated Bibliographies*. John Wiley & Sons, New York, 129–147.
- Yaghini, M., M. Rahbar. 2012. Multicommodity network design problem in rail freight transportation planning. *Procedia - Social and Behavioral Sciences* **43** 728–739.
- 片山直登. 2002. 共同輸送ネットワーク設計問題に対するlagrange緩和法. 流通情報学部紀要 **6**(2) 81–91.
- 片山直登. 2008. ネットワーク設計問題. 朝倉書店.
- 片山直登. 2009. 列生成法と行生成法を用いた区分的線形関数をもつネットワークデザイン問題の近似解法. 流通経済大学流通情報学部紀要**14**(1) 1–16.