

時間価値分布に応じた 航空と高速鉄道の最適混合ネットワーク形状

山口裕通¹・奥村誠²・Huseyin TIRTOM³

¹学生会員 東北大学大学院 工学研究科 博士後期課程 (〒 980-8577 仙台市青葉区片平 2-1-1 通研 2 号館)

E-mail: h-ymgc@plan.civil.tohoku.ac.jp

²正会員 東北大学教授 災害科学国際研究所 (〒 980-8577 仙台市青葉区片平 2-1-1 通研 2 号館)

E-mail: mokmr@m.tohoku.ac.jp

³非会員 東北大学研究支援者 災害科学国際研究所 (〒 980-8577 仙台市青葉区片平 2-1-1 通研 2 号館)

E-mail: tirtom@irides.tohoku.ac.jp

都市間交通ネットワークを構成する、航空、鉄道、高速バスといった公共交通サービスは、それぞれ異なるサービスレベルやコスト関数を持っており、それぞれに適切な役割分担が求められる。その最適な組み合わせ方を知ることは、交通ネットワークの将来像を検討するにあたって非常に重要なテーマである。本研究では、航空と鉄道の2モードに着目し、ネットワーク上でのそれらの最適な組み合わせ方を分析する。具体的には、まず時間価値の異質性を考えることで旅客の選好の異質性を扱いつつ、最適な航空・高速鉄道の混合ネットワーク形状を導出する問題を混合整数線形計画 (MILP: Mixed Integer Linear Programming) として定式化する。次に、3都市ネットワーク上での、旅客の選好の異質性、都市間距離、人口規模に応じた最適な航空・高速鉄道の混合ネットワーク形状を算出し、その傾向を分析した。

Key Words: multi-modal Network, time value heterogeneity, intercity transportation, optimal network

1. はじめに

地方部を中心に人口減少によって多くの都市間交通サービスの維持が困難となる中で、我が国ではサービス水準を維持しながら効率化を進めることが求められる。我が国の国内都市間交通ネットワークを効率化するアイデアの一つとして複数モードの統合的な活用が考えられる。都市間交通ネットワークを構成する、航空、鉄道、高速バスといった公共交通サービスは、それぞれ異なるサービスレベルやコスト関数を持っており、それぞれに適切な役割分担が求められる。

これまで、航空と高速鉄道は補完的な関係、競合的な関係の両方を持ちうることを示されてきた¹⁾。補完的な関係の例として、ハブ空港の容量に制約がある場合、高速鉄道を短距離のフィーダーとして活用する戦略があげられる²⁾。実際に、フランスのシャルル・ド・ゴール空港やドイツのフランクフルト空港では、空港に高速鉄道が直接乗り入れており、このような役割を果たしている。とはいえ、高速鉄道にとってハブ空港の容量補完は副次的な役割に過ぎず、その主な役割は航空と同様に長距離の都市間移動であり、航空と高速鉄道は基本的には競合関係にあると認識される。

それでは、競合関係にある複数のモードをどのように組み合わせることが効率的なのだろうか？競合関係にある複数のモードを維持することの利点の一つとし

て、旅客がそれぞれの選好に応じてサービスを選択できるという選択価値が挙げられる。同じ都市間をつなぐサービスでも、モード毎に長所・短所が存在する。例えば、鉄道は大量・高頻度輸送に適したモードであり時間を自由に選択しやすい。また、高速バスは少量の需要にも対応でき、航空では長距離を短時間で移動することができるといった長所がある。つまり、旅客の選好の異質性が大きい場合には、複数のモードが存在し選択できるようなネットワークが望ましいと想定される。

このように、複数モードの組み合わせでは、旅客の選好の異質性が重要な要素であるが、従来のネットワーク形状の利便性を分析する既存研究ではあまり扱われていない。例えば、交通サービス維持に必要な旅客数を制約条件に追加して高速バス・鉄道・航空の最適ネットワーク形状について分析した、Okumura et al.(2012)³⁾では、旅客の選好の異質性は存在せず、結果として同一都市間には単一のモードのみが整備される結果が得られている。幹線鉄道ネットワークを対象にした波床・中川(2009)⁴⁾や、Brueckner(2004)⁵⁾などの多数の航空のハブ&スポークネットワーク形成現象を議論してきた論文などでも、旅客の選好の異質性は着目されてこなかった。旅客の選好の異質性に着目しつつ、ネットワーク形状の利便性を分析した数少ない論文として、Kawasaki(2008)⁶⁾がある。Kawasaki(2008)⁶⁾の研究で

は、時間価値の異なる2種類の旅客（業務目的、観光目的）を仮定した航空ネットワークを分析した結果、業務向けのハブ&スポーク型サービスと観光向けのポイントtoポイント型サービスが両立するような戦略が採択されうるという結果が得られている。しかし、この研究では2種類のみ異なる時間価値を設定し航空という単一モードのネットワークを対象とするという、限定した分析にとどまっている。

そこで、本研究では旅客の選好の異質性を分布として扱いつつ、航空と高速鉄道の最適な組み合わせパターンを明らかにする。旅客の選好の異質性として時間価値に着目し、その分散に応じた航空と高速鉄道の最適混合ネットワーク形状を分析する。本研究の先行研究である、Yamaguchi and Okumura (2014)⁷⁾では、時間価値の分布形状として一定範囲の一様分布を仮定して、そのばらつきの大きさと2都市の最適・均衡混合ネットワーク形状を解析的に分析した。その結果、(1) 時間価値のばらつきが大きいときには、航空と鉄道両方がサービスを提供するネットワークが最適となること、(2) 複数モードネットワークが最適となる領域は、均衡状態して複数モードネットワークが実現する領域に含まれており、政府の介入等を通じて複数モードを維持する必要がないこと、(3) 人口（需要）が減少すると、複数モードネットワークが最適となる領域は小さくなること、を明らかにした。

本稿では、より大規模なネットワークかつより複雑な時間価値分布形状のもとで、最適マルチモーダルネットワーク形状を分析するための数値計算手法を提案する。具体的には、時間価値分布を離散化することによって、最適マルチモーダルネットワーク形状を算出する問題を混合整数線形計画（MILP: Mixed Integer Linear Programming）として定式化する。その上で、時間価値分布形状として正規分布を仮定して、Yamaguchi and Okumura (2014)⁷⁾の結果がロバストに成立することを示す。また、3都市ネットワークの最適マルチモーダルネットワーク形状と時間価値分散との関係性を分析した結果を示す。

本稿は、以下のように構成される: 2. では、Yamaguchi and Okumura⁷⁾の最適マルチモーダルネットワーク形状導出問題の定式化と、その際に設定した航空と高速鉄道のサービス特性を簡単にまとめる。3. で最適マルチモーダルネットワーク形状導出問題を混合整数線形計画問題として解く方法を示す。そして、4. では正規分布時間価値、3都市ネットワークを仮定した数値計算結果を示し、考察を述べる。5. で結論を述べる。

2. 最適ネットワーク形状導出問題の定式化

(1) 最適マルチモーダルネットワーク形状導出問題

本節では時間価値の分布に応じた最適ネットワーク形状を導出する問題を定式化する。まず、旅客*i*の経路選択モデルは、以下のように定式化される：

$$\begin{aligned} & \min_{k \in K} GC_{i,k} & (1) \\ & \text{s.t.} \\ & GC_{i,k} = \begin{cases} f_k + v_i T_k & (\prod_{l \in Q_k} \delta_l = 1) \\ \infty & (\prod_{l \in Q_k} \delta_l = 0) \end{cases} & (2) \end{aligned}$$

このモデルでは、旅客は経路集合 K の中で一般化費用 $GC_{i,k}$ を最小とする経路 k を選択する。なお、この一般化費用は、構成するすべてのリンク $l \in Q_k$ が運航されている場合 ($\delta_l = 1$) には、時間価値 v_i によって金銭化した時間 T_k と運賃 f_k の和で表現される。また、あるリンクが運航していない場合 ($\delta_l = 0$) には、一般化費用を ∞ と設定する。この経路選択モデルの結果として実現する経路流動量 p_k は、時間価値 v のときの旅客密度（時間価値分布） $g(v)$ を用いて、以下のように示される：

$$\begin{aligned} & p_k = \int_0^{\infty} h_k(v) dv & (3) \\ & \text{s.t.} \\ & h_k(v) = \begin{cases} g(v) & (GC_k(v) = \min_{k \in K} GC_k(v)) \\ 0 & (GC_k(v) > \min_{k \in K} GC_k(v)) \end{cases} & (4) \end{aligned}$$

そして、旅客の経路選択行動を考慮しつつ、最適ネットワーク形状・運賃を決めるモデルは以下のように定式化される：

$$\begin{aligned} & \min_{f, \delta} SC_{f, \delta} = \sum_{k \in K} \int_0^{\infty} h_k(v) GC_k(v) dv & (5) \\ & \text{s.t.} \quad \text{Equations (2)-(4)} \\ & \sum_k f_k p_k = \sum_l \delta_l (F_l + C_l p_l), & (6) \\ & f_k = \sum_{l \in Q_k} f_l, & (7) \\ & p_l = \sum_{k \in K} a_{kl} p_k, & (8) \\ & a_{kl} = \begin{cases} 1 & (l \in Q_k) \\ 0 & (l \notin Q_k) \end{cases} & (9) \end{aligned}$$

式(6)の左辺は総運賃収入、右辺は交通サービスの提供に必要なコストを示しており、この等号条件は交通事業者の利潤がゼロであることを意味している。その結果、式(5)の目的関数である旅客の一般化費用の総和は、社会的コストに一致する。また、本モデルでは交通サービスの提供に必要なコストは、式(6)右辺のように単位変動費用 C_l にリンク流動量 p_l を乗じて固定費用 F_l を付加した式で表現されるとする。式(7)から

(9) は、経路変数とリンク変数との関係を示す制約条件である。

(2) 航空と高速鉄道のサービス特性

Yamaguchi and Okumura (2014)⁷⁾ では、航空と高速鉄道のサービス特性について、次のように設定して分析を行った：

$$T_{Air} < T_{Rail}, \quad (10)$$

$$F_{Air} < F_{Rail}, \quad (11)$$

$$C_{Air} > C_{Rail}. \quad (12)$$

まず、式 (10) は航空のほうが高速鉄道より速度が速いため、所要時間は航空のほうが小さいことを示している。そして、高速鉄道は都市間に連続した空間を確保し、その空間に鉄軌道を整備する必要があるため、式 (11) のように固定費用を大きく設定した。また、航空より容易に大量輸送を行うことができることから、式 (12) のように変動費用は小さく設定している。

3. 混合整数線形計画問題としての解法

(1) 時間価値分布の離散化

Yamaguchi and Okumura (2014)⁷⁾ では、時間価値分布 $g(v)$ として一定範囲の一様分布を仮定している。このような単純な分布を仮定すれば、先行研究のようにネットワーク形状の解析解を容易に導出することができる。しかし、実際の時間価値分布が一様分布形であるとは考え難く、平均値に近い人が多く、それから乖離する人は少数であると仮定することが妥当であろう。そこで、本稿では時間価値分布が正規分布であると仮定して、その標準偏差と最適ネットワーク形状との関係を分析する。

ここで、式 (3),(5) の正規分布の確率密度関数を積分を得るには、数値積分等が必要であり、大規模な最適ネットワーク形状を分析するにあたっての計算負荷を増す要因となる。この問題を回避するために、図-1 のように、確率分布を離散化して最適ネットワーク形状導出問題を解く。このような近似を行うことによって、次節で示すように混合整数線形計画問題として扱うことができる。

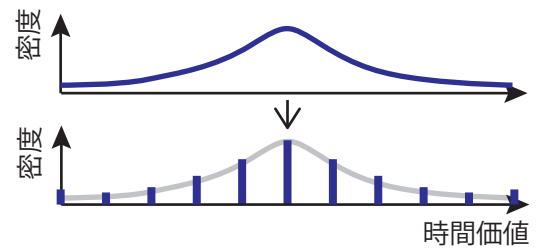


図-1 時間価値分布の離散化

(2) 混合整数線形計画問題としての定式化

時間価値分布を離散化したとき、最適ネットワーク形状導出問題は以下のように定式化できる：

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{x}, \delta} SC_{\mathbf{x}, \delta} = & \sum_{ij} \sum_v \sum_o \sum_m T_{ij,m} TV_v x_{ij,v,o,m} \\ & + \sum_{ij} \sum_m \delta_{ij,m} F_{ij,m} \\ & + \sum_{ij} \sum_v \sum_o \sum_m C_{ij,m} x_{ij,v,o,m}, \end{aligned} \quad (13)$$

s.t.

$$\sum_j N_{oj} = \sum_j \sum_m x_{oj,v,o,m} \quad (14)$$

$$\forall o, v$$

$$\sum_i \sum_m x_{ij,v,o \neq j,m} = \sum_l \sum_m x_{jl,v,o \neq j,m} + N_{oj} \quad (15)$$

$$\forall j, o (\neq j), v$$

$$\sum_v \sum_o x_{ij,v,o \neq j,m} \leq L \delta_{ij,m} \quad (16)$$

$$\forall ij, m$$

$$x_{ij,v,o,m} \geq 0 \quad \forall ij, v, o, m \quad (17)$$

$$\delta_{ij,m} = \delta_{ji,m} \quad \forall ij, m \quad (18)$$

$$\delta_{ij,m} \in \{0, 1\} \quad \forall ij, m \quad (19)$$

$x_{oj,v,o,m}$ は、モード m のリンク ij を通過する、時間価値が v で出発ノードが o である流動量である。 N_{od} は、ノード o からノード j への od 流動量、 L はリンクの容量を示す。なお、リンク容量については本稿の分析では議論しないので、十分大きな定数を設定しておく。

ここで、式 (13) の目的関数の各項は順に、時間価値 TV により金銭換算した総旅行時間コスト、旅客輸送サービスのための総固定費用、総変動費用を意味している。式 (14) と (15) の制約条件は各ノードにおける交通量制約条件を示している。式 (14) の左辺はノード o で発生する流動量であり、右辺はノード o から流出するリンク流動量の総和である。また、式 (15) の左辺はノード i の総流入量を、右辺は総流出量とノード i を目的地とする流動の和であり、すべてのノード、発生地ノード、時間価値毎にこの制約条件をおく。式 (16) は、リンク ij のサービスが存在しない場合 ($\delta_{ij,m} = 0$)、

表-1 旅客輸送サービスの運営コスト設定

	航空	鉄道
固定費用 F	100	3,000,000
変動費用 C	12,000	2,000

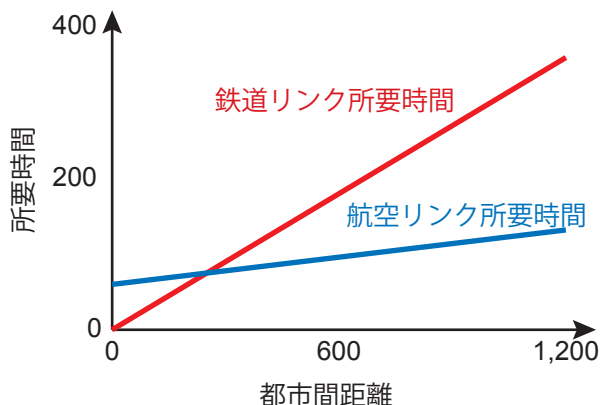


図-2 リンク所要時間の設定

モード m のリンク ij を通過する流動量がゼロであることを示している。式 (17) は流動量変数の非負制約，式 (18),(19) はリンク輸送サービスの存在変数 δ に関する条件（両方向サービス，0-1 変数）である。

なお，上述の問題では，個々の利用者の経路選択行動モデル（式-(1),(2)）を捨象している。しかし，社会的コストの結果として時間価値が高い利用者ほど，所要時間が短い経路を利用するため，最適なリンク流動量 $x_{ij,m,o,v}$ を実現するための運賃を導出する問題を線形計画問題として定式化することができる。

以上の式 (13)-(19) の問題は，少数の 0-1 変数 $\delta_{ij,m}$ を含む混合線形計画問題であり，一般の最適化パッケージで容易に解くことができる。本稿では，Gurobi Optimizer を用いて，最適ネットワーク形状 δ を導出した。

4. 最適な航空・鉄道混合ネットワークの数値計算結果

(1) 分析の設定

上述の手法を用いて，時間価値分布と最適ネットワーク形状との関係を分析する。以降の分析では，固定費用 $F_{ij,m}$ と単位変動費用 $C_{ij,m}$ の両パラメータを，リンクごとに同値として，表-1 に示す様にモード毎に異なる値を設定して分析を行った。本来であれば，各事業者の費用構造等のデータを参考に設定することが望ましいが，現段階では航空と高速鉄道のサービス特性（式 (10),(11)）を踏まえて仮の値を設定している。

リンク所要時間は，図-2 のように設定した。航空サー

ビスのほうが速度が速いが，離着陸時間や保安検査等があり 1 回リンクサービスを受けるごとに追加的な時間を必要とする。航空リンク所要時間関数の切片が，この追加的な時間を示しており，複数航空リンクを利用する経路の旅客の乗り換え時間にも相当する。

各都市間を移動する旅客数は一定かつすべて同じ値であるとし，以降の (2),(3) の分析では一つの OD ペアごとの旅客数は $N_{ij} = 500$ と設定した。また，時間価値分布は， $TV = 50$ を平均値とする正規分布を仮定し，すべての OD ペアで同じ分布であるとする。この時間価値を， $0 \leq TV \leq 100$ の範囲で 11 分割して離散化し，その時間価値分布の分散の値ごとの最適ネットワーク形状を導出し，違いを分析する。

(2) 2 都市ネットワークの数値計算結果

本節では，Yamaguchi and Okumura (2014)⁷⁾ と同じ図-3 の 2 都市ネットワークを用いた計算結果を示す。時間価値分散の大きさと都市間距離に応じた最適ネットワーク形状を，図-4 に示す。図-4 にプロットされた点の一つ一つが数値計算を実施した結果であり，得られた最適ネットワークの形状ごとに色分けしている。

図-3 から読み取れることは以下の 2 点である。まず，都市間距離が長い都市間では所要時間が短い航空のみのネットワークが，都市間距離が短い都市間では単位変動コストが小さい高速鉄道のみネットワークが最適となる。次に，その境界となる程度の都市間距離でかつ時間価値分散が大きい場合に，航空と高速鉄道が競合する HB ネットワークが最適形状となる。以上の結果は，Yamaguchi and Okumura (2014)⁷⁾ の一様分布を仮定した解析解と一致しており，先行研究の結果が正規分布形であってもロバストに成立することが確認できる。

(3) 3 都市ネットワークの数値計算結果

本節では，図-5 の 3 都市ネットワークを用いた計算結果を示す。時間価値分散の大きさと都市間距離に応じた最適ネットワーク形状を，図-6 に示す。

図-4 の結果と比較すると，航空のみネットワークが最適となる領域，鉄道のみネットワークが最適となる領域，両方のモードを混合させたネットワークが最適となる領域の配置・大きさは概ね変わらないことが分かる。ただし，鉄道のみネットワークと航空・鉄道の混合ネットワークは，それぞれ鉄道ネットワークの形状が異なる 2 種類の解が存在する。まず，鉄道のみネットワークの領域のうち，都市間距離が短い場合に 2 本の鉄道リンクのみでサービスを提供するネットワークが最適となる。これは，都市間距離が短いほど迂回による時間損失が小さくなるため，ある一つの OD ペ

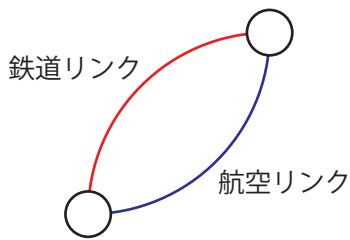


図-3 2都市ネットワークの設定

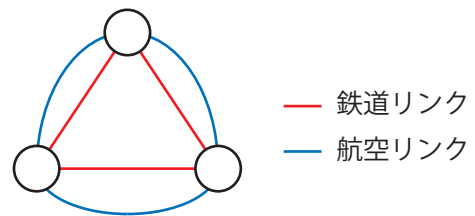


図-5 3都市ネットワークの設定

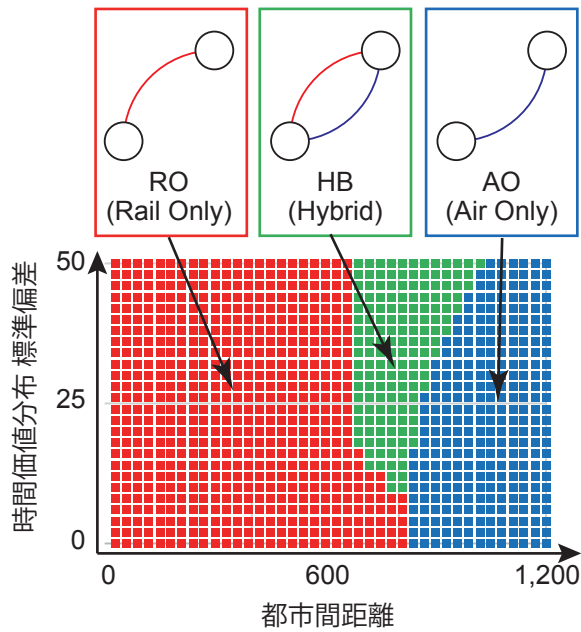


図-4 2都市ネットワークにおける最適ネットワーク形状

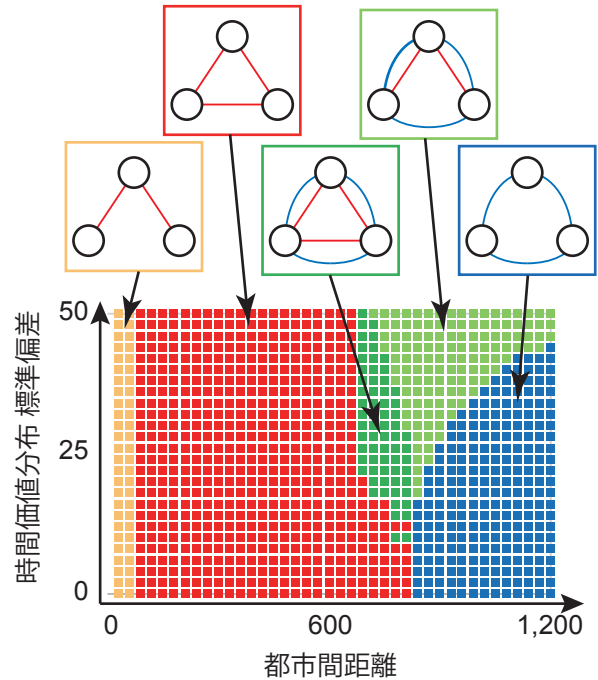


図-6 3都市ネットワークにおける最適ネットワーク形状

アに迂回を強いても固定費用を削減する効果が上回るためである。次に、航空・鉄道の混合ネットワークの領域を見ると、航空は3本のリンク全てでサービスを維持することが最適となるが、鉄道は都市間距離が長い場合には2本のリンクのみでサービスを提供することが最適となる。この混合ネットワークの最適解では、時間価値の高い旅客が航空サービスを、時間価値の低い旅客が鉄道サービスを利用するのだが、都市間距離が大きいほどより低い時間価値の旅客にも航空を利用させることとなる。その結果、鉄道旅客の平均時間価値は低くなるため、迂回を行わせても固定費用を削減することが最適となり、サービスを行うリンクが減少する。

(4) 需要規模による最適ネットワーク形状の差異

本節では、需要規模の違いによって図-6の結果がどのように異なるかを確認する。まず、需要規模を大きくした(ODペアごとの旅客数を $N_{ij} = 700$ に設定)結果を、図-7に示す。図-6の結果と比較すると、混合ネットワークが最適となる領域と鉄道のみネットワークが

最適となる領域が大きくなり、航空のみネットワークが最適となる領域が小さくなるのが分かる。これは、航空サービスは鉄道と比較して、単位変動費用が大きいため大量輸送に向かないことが原因である。つまり、十分な旅客数が確保できるのであれば、莫大な固定費用を支払ってでも鉄道サービスを維持し、より多くの旅客に変動費用の小さいサービスを提供することが最適戦略となる。

次に、需要規模を小さくした(ODペアごとの旅客数を $N_{ij} = 300$ に設定)結果を図-8に示す。図-6の結果と比較すると、図-7の場合と逆に、混合ネットワークが最適となる領域と鉄道のみネットワークが最適となる領域が大きくなる。また、旅客数が減るために、鉄道リンクを2本のみとして固定費用を削減することが最適となる領域が大きくなる。

そして興味深いことに、図-6や図-7で最適ネットワーク形状として見られなかった、鉄道リンクが2本とそれと重複しない区間の航空リンク1本で構成され

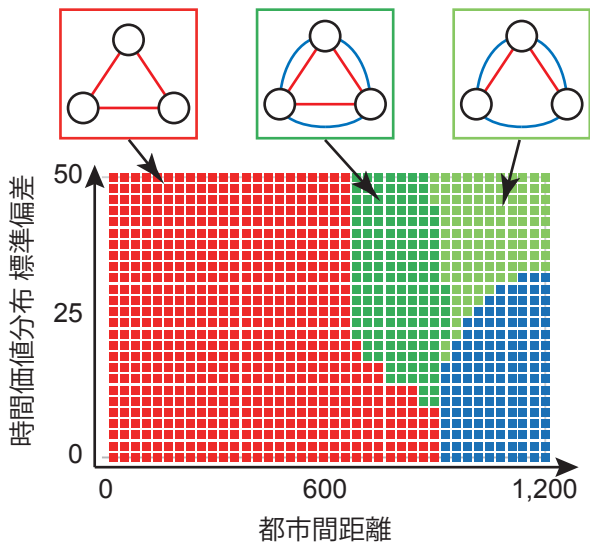


図-7 3都市ネットワークにおける最適ネットワーク形状
(需要規模大: $N_{ij} = 700$)

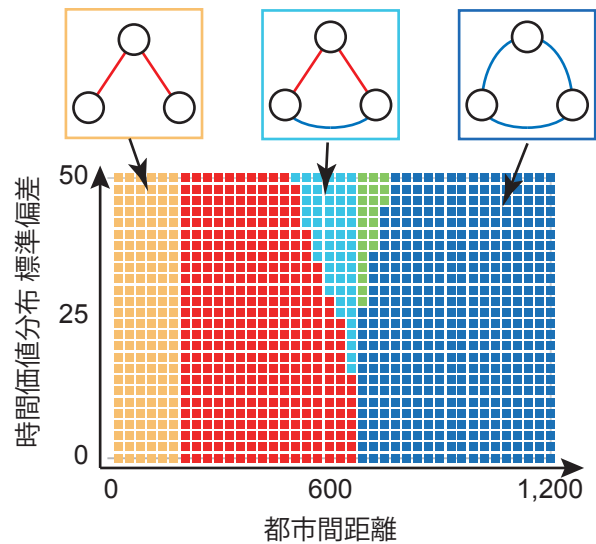


図-8 3都市ネットワークにおける最適ネットワーク形状
(需要規模小: $N_{ij} = 300$)

る形状が最適となる。その形状は、図-6では鉄道のみ
のネットワークが最適であった領域のうち、時間価値
分散が大きい部分で最適となる。この最適解では、鉄
道のダイレクトサービスが存在しないODでは、時間
価値の高い一部の旅客が航空を、時間価値の低い旅客
が鉄道の迂回経路を利用している。つまり、もともと
鉄道サービスが優位である距離帯であっても、需要が
減少すると固定費用が高い鉄道サービスで全都市を最
短で接続することは無理であり、図-8で見られるよう
な一部を航空サービスで補完するようなネットワーク
形状が最適となる可能性がある。

5. おわりに

本稿では、旅客の選好の異質性として時間価値分布
に着目し、その分散と都市間距離に対して最適な航空
と高速鉄道の組み合わせ方を分析した。まず、時間価
値分布を考慮した最適マルチモーダルネットワークを
導出する問題を混合整数線形計画問題として解く方法
を示した。次に、その解析手法を用いて、時間価値が
正規分布すると仮定し、2都市ネットワークの最適形状
を算出した。その結果、一様分布を仮定した先行研究
の理論解と同様の結果が得られることを確認した。さ
らに3都市ネットワークにおける、最適ネットワーク
形状との関係性を分析した。その結果、鉄道の直行サ
ービスが困難な区間で航空の直行便を運航するといっ
た、それぞれのサービス特性を補完しあうような形状が
最適となる可能性があることがわかった。

なお、本稿で述べた方法は、より規模の大きなネット
ワークにも容易に適用することができる。今後、より

規模の大きなネットワークに適用し、最適マルチモー
ダルネットワーク形状のパターンに関する分析を実施
する予定である。

謝辞： 本研究は日本学術振興会科学研究費基盤研究
(B)25289157の成果の一部である。

参考文献

- 1) Givoni M. and Banister D.: Airline and railway integration, *Transport Policy*, Vol.13, pp.386-397, 2006.
- 2) Jiang C. and Zhang A.: Effects of high-speed rail and airline cooperation under hub airport capacity constraint, *Transportation Research Part B*, Vol.60, pp.33-49, 2014.
- 3) Okumura M., Tirtom H. and Yamaguchi H.: Proceedings of International Conference, *Proceedings of International Conference on Low-Carbon Transportation and Logistics and Green Buildings (LTLGB2012)*, pp.309-314, 2012.
- 4) 波床正敏・中川大: 遺伝的アルゴリズムを用いた幹線鉄道網構築分析に基づく幹線鉄道政策の課題抽出, *土木計画学研究・講演集*, Vol.26, No.4, pp.763-774, 2009.
- 5) Brueckner J. K.: Network Structure and Airline Scheduling, *The Journal of Industrial Economics*, Vol.52, No.2, pp.291-312, 2004.
- 6) Kawasaki A.: Network Effects, heterogeneous time value and network formation in the airline market, *Regional Science and Urban Economics*, Vol.38, No.4, pp.388-403, 2008.
- 7) Yamaguchi H. and Okumura M.: Time Value Distribution and Multi-modal Intercity Travel Network Shape: Theoretical Analysis for Typical Setting, *procedia - Social and Behavioral Sciences*, Vol.138,

(2014. 08. 01 受付)

Time Value Distribution and Optimal Shape Multi-modal Intercity Passenger Transportation Network

Hiromichi YAMAGUCHI, Makoto OKUMURA, Huseyin TIRTOM

In order to discuss the futural intercity passenger transportation network, it is important to know the optimal patterns of multi-modal network. Because recently Air transport and HSR (High Speed Railway) become more competitive each other. In this paper, the relationship between distribution of time-value and optimal multi-modal network are analyzed. Specifically, we propose the methodology for deriving the optimal network shape under a certain time-value distribution. The methodology is formulated as MILP (Mixed Integer Linear Programming). Moreover, given the certain time-value distribution, distance and population size, the optimal multi-modal network among three cities are analyzed.