LCC との競争下にある高速鉄道の動的価格モデル

M2011MM075 鵜飼尚
指導教員：澤木勝茂

1　はじめに

1.1　研究背景

近年，輸送市場は格安航空会社 (LCC) の参入等により航空会社と鉄道会社との間の競合が活発化している．今日，我が国においては，関西国際空港を拠点とする Peach Aviation，新東京国際空港を拠点とするエアアジア・ジャパンならびにジェットスター・ジャパンの LCC が就航を開始している．LCC は FSA (Full Service Airline) と比べ低サービスであるため短距離路線に集中しており，高速鉄道との競合は避けられない．本研究の目的は，こうした背景の対策の一つとして，高速鉄道における収益の最大化を促すモデルを構築・提案することである．一般に，高速鉄道が販売する商品（チケット）は一種の陳腐化商品として扱われ，鉄道の出発時刻となると同時に商品価値は 0 となる．このような商品特性をもつ高速鉄道のチケットに対し，在庫量（空席状況）などに応じて価格を柔軟に変動させる動的価格政策は，チケットの価格設定をおこなうに当たり期待収益を最大化にするための有効な手法であると考えられる．

本研究では，先行研究である Dong et al. [3]，佐藤・澤木 [4] の下で高速鉄道における動的価格モデルの構築および拡張をおこなう．特に，佐藤・澤木 [4] の下で途中駅を考慮したモデルへの拡張と拡張したモデルの分析をおこなう．

1.2　研究対象

本研究では，我が国の主要都市において 2005 年当時営業していた主要ターミナル（駅・空港）を対象とする．対象とする高速鉄道の駅とそれに対応するノード番号を 1: 八戸駅，2: 盛岡駅，3: 仙台駅，4: 秋田駅，5: 山形駅，6: 新潟駅，7: 東京駅，8: 名古屋駅，9: 新大阪駅，10: 岡山駅，11: 広島駅，12: 山口駅，13: 博多駅，と定義する．また高速鉄道の競合路線として考慮する航空機のターミナルは，研究対象となる高速鉄道の駅の所属都道府県に存在する主要空港とする．ただし，千葉県には高速鉄道の駅は存在しないが，LCC の拠点でもある新東京国際空港が存在するため隣接している東京都と同じグループとみなし，同一のノード番号を割り当てて考慮する．航空機のターミナルについては，空港が存在する都道府県に共存する高速鉄道の駅と同一のノード番号をそれぞれ割当てる．

2　動的価格モデルの構築

2.1　モデルの説明

離散時間を想定し，各期に顧客は輸送機関のチケットを購入するためにシステム（窓口）に確率 λ で到着するか，もしくは確率 $(1-\lambda)$ で到着しないと仮定する．ここでいうシステムとは旅行会社のチケット販売窓口やインターネット上の予約 Web サイト等のことを指す．各期におけるシステム内のイベントとして到着した顧客は次の 4 つの行動を取る．(1) 高速鉄道のチケットを購入する，(2) 他の輸送機関のチケットを購入する，(3) チケットを購入しない，(4) 予約をキャンセルする．またモデルの仮定として 1. 各期の顧客の到着人数は 1 人である，2. 顧客の到着率は一定である，3. 顧客は必ず目的地に向かう，4. 各輸送機関は他の輸送機関および他の輸送手段の料金の情報を得ることができる，5. オーバーブッキングは考慮しない，6. ノーショウは発生しない，とする．

2.2　記号定義

λ: 顧客がシステム（窓口）に到着する確率
i: 輸送機関
n: 輸送機関の数，$i = 1, 2, \cdots, n$
I: 輸送機関の集合, $i \in I = \{1, 2, \cdots, n\}$
j: スケジュール番号，$1 \leq j \leq m_i^{od}$
m_i^{od}: 区間 od におけるスケジュールの最終番号
t: 残存販売期間 (以下，“期” と表す)，$T \geq t > 0$
N: ノード（ターミナル）の数
o: 起点 (origin) のノード番号
O: 起点のノード番号の集合, $o \in O$
d: 終点 (destination) のノード番号
D: 終点のノード番号の集合, $d \in D$
$\Phi_i^{v_o v_d}$: 輸送機関 i の区間 od に任意の 2 地点間 $v_o v_d$ が存在するか否かを判別する 0-1 変数
$x_{ij,t}^{od}$: 期 t におけるサービス (i, j, o, d) の空席数
$\pi_{i,t}^{od}(\mathbf{x_t^{od}})$: 期 t，2 地点間 od における空席数に対する輸送機関 i の期待収益
$\Pi_{i,t}^{od}(\mathbf{x_t^{od}})$: 期 t，区間 od における輸送機関 i の総期待収益
$r_{ij,t}^{od}(x_{ij,t}^{od})$: 期 t におけるサービス (i, j, o, d) の販売価格
$P_{ij,t}^{od}(\mathbf{r_t^{od}})$: 期 t において顧客がサービス (i, j, o, d) を購入する確率
$P_{0,t}^{od}(\mathbf{r_t^{od}})$: 期 t において顧客が輸送機関 i のサービスを購入しない確率
$c_{ij,t}^{od}$: 期 t において顧客がサービス (i, j, o, d) をキャンセルする確率

2.3　途中駅を考慮したモデルの説明

途中駅を考慮したモデルを構築するために $\Phi_i^{v_o v_d}$ を定義する．$\Phi_i^{v_o v_d}$ は区間 od に任意の 2 地点 v_o, v_d に経路が存在すれば 1 を，存在しなければ 0 を表す 0-1 変数である．ここで期 t の区間 od における空席数 $x_{ij,t}^{od}$ は，すべての 2 地点間における最小の在庫量として $x_{ij,t}^{od}$ =

$\min\{x_{ij,t}^{o,o+1}, x_{ij,t}^{o+1,o+2}, \cdots, x_{ij,t}^{d-1,d}\}$ で与える．また期 t の区間 od における総期待収益 $\Pi_{i,t}^{od}(\mathbf{x_t^{od}})$ は，$\Phi_i^{v_o v_d}$ を用いて

$$\Pi_{i,t}^{od}(\mathbf{x_t^{od}}) = \sum_{v_o \in O} \sum_{v_d \in D} \pi_{i,t}^{v_o v_d}(\mathbf{x_t^{v_o v_d}})_{\{\Phi_i^{v_o v_d}=1\}} \tag{1}$$

で与えられる．

2.4　モデルの定式化

各期におけるイベントより，期 t に輸送機関 i における区間 od のサービスが売れる確率は，顧客が窓口に到着率 λ で現れ，任意の 2 地点間 $v_o v_d$ に経路が存在すれば

$$\lambda \sum_{l=1}^{m_i^{od}} \sum_{v_o \in O} \sum_{v_d \in D} P_{il,t}^{v_o v_d}(\mathbf{r_t^{v_o v_d}})_{\{\Phi_i^{v_o v_d}=1\}} \tag{2}$$

で与えられ，期 t に輸送機関 i のサービスが売れない確率は

$$\begin{aligned}
&\lambda \sum_{k \in I \setminus \{i\}} \sum_{l=1}^{m_i^{od}} \sum_{v_o \in O} \sum_{v_d \in D} P_{kl,t}^{v_o v_d}(\mathbf{r_t^{v_o v_d}})_{\{\Phi_k^{v_o v_d}=1\}} \\
&+ \lambda \sum_{k=1}^{n} \sum_{l=1}^{m_i^{od}} \sum_{v_o \in O} \sum_{v_d \in D} P_{0,t}^{v_o v_d}(\mathbf{r_t^{v_o v_d}})_{\{\Phi_k^{v_o v_d}=1\}} \\
&+ \lambda \sum_{k=1}^{n} \sum_{l=1}^{m_i^{od}} \sum_{v_o \in O} \sum_{v_d \in D} c_{kl,t}^{v_o v_d}{}_{\{\Phi_k^{v_o v_d}=1\}} + (1-\lambda)
\end{aligned} \tag{3}$$

で与えられる．また式 (2),(3) より，システム内における顧客の全行動を表す式（全確率）が得られる．

2.5　予約キャンセルに対する期待返金額

顧客がサービス (i,j,o,d) の予約をキャンセルした際の期 t における期待返金額 $Y_{ij}^{od}(t)$ を導出する [2]．顧客が期 t にサービス (i,j,o,d) をキャンセルした際の返金率を $\gamma_{ij,t}^{od}$ とすると，期 t から予約された便（サービス）が出発するまでの顧客の期待返金額は次の再帰式で与えられる:

$$\begin{cases}
Y_{ij}^{od}(t) = c_{ij,t}^{od} r_{ij,t}^{od}(x_{ij,t}^{od}) \gamma_{ij,t}^{od} \\
\qquad\qquad + (1 - c_{ij,t}^{od}) Y_{ij}^{od}(t-1), \quad t > 0, \\
Y_{ij}^{od}(0) = 0.
\end{cases} \tag{4}$$

また式 (4) は帰納法によって以下のように書き換えることができる:

$$\begin{cases}
Y_{ij}^{od}(t) = r_{ij,t}^{od}(x_{ij,t}^{od}) Z_{ij}^{od}(t), \\
Z_{ij}^{od}(t) = c_{ij,t}^{od} \gamma_{ij,t}^{od} + (1 - c_{ij,t}^{od}) Z_{ij}^{od}(t-1), \\
\qquad\qquad\qquad\qquad t > 0, \\
Z_{ij}^{od}(0) = 0.
\end{cases} \tag{5}$$

サービス (i,j,o,d) の販売価格 $r_{ij,t}^{od}(x_{ij,t}^{od})$ から期待返金額 $Y_{ij}^{od}(t)$ を引いた販売価格を $\tilde{r}_{ij,t}^{od}(x_{ij,t}^{od})$ とすれば

$$\tilde{r}_{ij,t}^{od}(x_{ij,t}^{od}) = \bar{Z}_{ij}^{od}(t) r_{ij,t}^{od}(x_{ij,t}^{od})$$

で与えられる．ただし $\bar{Z}_{ij}^{od}(t) \equiv 1 - Z_{ij}^{od}(t)$ とおく．

2.6　動的計画法 (DP) による収益管理モデル

式 (1),(2),(3) を用いると，区間 od における輸送機関 i の総期待収益 $\Pi_{i,t}^{od}(\mathbf{x_t^{od}})$ は次式で与えられる:

$$\begin{aligned}
&\Pi_{i,t}^{od}(\mathbf{x_t^{od}}) \\
&= \sum_{v_o \in O} \sum_{v_d \in D} \xi_{i,t}^{v_o v_d}(\mathbf{x_t^{v_o v_d}}, \mathbf{r_t^{v_o v_d}})_{\{\Phi_i^{v_o v_d}=1\}} + \Pi_{i,t-1}^{od}(\mathbf{x_t^{od}}) \\
&+ \lambda \sum_{l=1}^{m_i^{od}} \sum_{v_o \in O} \sum_{v_d \in D} c_{il,t}^{v_o v_d} \pi_{i,t-1}^{v_o v_d}(\mathbf{x_t^{v_o v_d}} + \mathbf{e_{il}^{v_o v_d}})_{\{\Phi_i^{v_o v_d}=1\}}, \\
&t = T, T-1, \cdots, 1,
\end{aligned} \tag{6}$$

境界条件: $\pi_{i,0}^{v_o v_d}(\mathbf{x_0^{v_o v_d}}) = 0$,　for all　$v_o, v_d, x_0^{v_o v_d}$.

ただし

$$\begin{aligned}
&\xi_{i,t}^{v_o v_d}(\mathbf{x_t^{v_o v_d}}, \mathbf{r_t^{v_o v_d}}) \\
&= \lambda \sum_{l=1}^{m_i^{od}} P_{il,t}^{v_o v_d}(\mathbf{r_t^{v_o v_d}})(\bar{Z}_{il}^{v_o v_d}(t) r_{il,t}^{v_o v_d}(x_{il,t}^{v_o v_d}) \\
&\qquad - \Delta_{il}^{v_o v_d} \pi_{i,t-1}^{v_o v_d}(\mathbf{x_t^{v_o v_d}})),
\end{aligned} \tag{7}$$

$\Delta_{ij}^{v_o v_d} \pi_{i,t-1}^{v_o v_d}(\mathbf{x_t^{v_o v_d}}) = \pi_{i,t-1}^{v_o v_d}(\mathbf{x_t^{v_o v_d}}) - \pi_{i,t-1}^{v_o v_d}(\mathbf{x_t^{v_o v_d}} - \mathbf{e_{ij}^{v_o v_d}})$ である．ここで $\mathbf{e_{ij}^{v_o v_d}}$ は第 i 行 j 列の要素が 1 で他の成分の要素が 0 の行列である．また式 (7) は任意の 2 地点間 $v_o v_d$ における期待限界収益を表しており，$\Pi_{i,t}^{od}(\mathbf{x_t^{od}})$ を最大化する問題はすべての v_o, v_d に対する $\xi_{i,t}^{v_o v_d}(\mathbf{x_t^{v_o v_d}}, \mathbf{r_t^{v_o v_d}})$ を最大化する問題に退化する [3].

3　顧客の輸送機関選択モデル

顧客が目的地までの移動手段として輸送機関を選択するとき，チケット料金以外にも様々な要因が関係してくる．ここではこれらを考慮した上での顧客が各輸送機関を選択する確率をロジットモデルを用いて導出する [1]．2 地点間 od において顧客が輸送機関 $i \in I$，サービス j を選択するときの効用が

$$\begin{aligned}
U_{ij}^{od} &= w_{ij} - \beta_i r_{ij,t}^{od}(x_{ij,t}^{od}) + \boldsymbol{\alpha}_\mathbf{i}(\mathbf{f_i^{od}})^\mathbf{T} \\
&= \omega_{ij}^{od} - \beta_i r_{ij,t}^{od}(x_{ij,t}^{od})
\end{aligned} \tag{8}$$

で与えられるとする．ここで，w_{ij} は顧客の輸送機関 i のサービス j を選択したときの基本的効用を表す．また β_i は輸送機関 i の効用関数の価格に対するパラメータ，$\boldsymbol{\alpha}_\mathbf{i} \equiv (\alpha_{i1}, \alpha_{i2}, \cdots, \alpha_{im})$ は効用関数の価格以外の要因に対するパラメータのベクトル，$(\mathbf{f_i^{od}})^\mathbf{T} \equiv (f_{i1}^{od}, f_{i2}^{od}, \cdots, f_{im}^{od})^T$ は効用関数の価格以外の要因の転置ベクトルをそれぞれ表す．ただし，m は価格以外の要因の数である．また 2 地点間 od において顧客が集合 I 以外の移動手段を選択するときの効用が

$$\begin{aligned}
U_0^{od} &= w_0 - \beta_0 r_{0,t}^{od} + \boldsymbol{\alpha}_\mathbf{0}(\mathbf{f_0^{od}})^\mathbf{T} \\
&= u_{0,t}^{od}
\end{aligned} \tag{9}$$

で与えられるとする．顧客の効用関数が式 (8),(9) でそれぞれ与えられたとき，顧客が輸送機関 i を選択する確率

および選択しない確率はロジットモデルを用いて

$$P_{ij,t}^{od}(\mathbf{r_t^{od}}) = \frac{\exp(U_{ij}^{od}/\mu)}{\sum_{k\in I}\sum_{l=1}^{m_i^{od}}\exp(U_{kl}^{od}/\mu)+\exp(u_{0,t}^{od}/\mu)}, \tag{10}$$

$$P_{0,t}^{od}(\mathbf{r_t^{od}}) = \frac{\exp(u_{0,t}^{od}/\mu)}{\sum_{k\in I}\sum_{l=1}^{m_i^{od}}\exp(U_{kl}^{od}/\mu)+\exp(u_{0,t}^{od}/\mu)} \tag{11}$$

で与えられる．ここで μ は正の定数である．

4　最適価格の導出

本研究では Dong et al. [3] の手法に基づき，空席数に対する最適な販売価格 $r_{ij,t}^{v_ov_d*}(x_{ij,t}^{v_ov_d})$ を導出する．式 (10),(11) より

$$\frac{P_{ij,t}^{v_ov_d}(\mathbf{r_t^{v_ov_d}})}{P_{0,t}^{v_ov_d}(\mathbf{r_t^{v_ov_d}})} = \exp((-\beta_i r_{ij,t}^{v_ov_d}(x_{ij,t}^{v_ov_d})+\omega_{ij}^{od}-u_{0,t}^{v_ov_d})/\mu)$$

となり，上式を変形すれば

$$r_{ij,t}^{v_ov_d}(x_{ij,t}^{v_ov_d}) = \frac{1}{\beta_i}(\omega_{ij}^{od}-u_{0,t}^{v_ov_d}-\mu\log P_{ij,t}^{v_ov_d}+\mu\log P_{0,t}^{v_ov_d}) \tag{12}$$

を得る．式 (10),(11) が価格空間から確率空間へ写像 (map) する関数であるのに対して，式 (12) は確率空間から価格空間へ写像する逆関数である．式 (12) を式 (7) に代入すれば

$$\begin{aligned}&\xi_{i,t}^{v_ov_d}(\mathbf{x_t^{v_ov_d}},\mathbf{P_{i,t}^{v_ov_d}})\\ &=\lambda\sum_{l=1}^{m_i^{od}}P_{il,t}^{v_ov_d}\Bigg(\bar{Z}_{il}^{v_ov_d}(t)\Bigg(\frac{1}{\beta_i}(\omega_{ij}^{od}-u_{0,t}^{v_ov_d}-\mu\log P_{il,t}^{v_ov_d}\\ &\qquad+\mu\log P_{0,t}^{v_ov_d})\Bigg)-\Delta_{il}^{v_ov_d}\pi_{i,t-1}^{v_ov_d}(\mathbf{x_t^{v_ov_d}})\Bigg)\end{aligned}$$

を得る．$\xi_{i,t}^{v_ov_d}(\mathbf{x_t^{v_ov_d}},\mathbf{P_{i,t}^{v_ov_d}})$ は $\mathbf{P_{i,t}^{v_ov_d}}$ について凹関数である．したがって，$\partial\xi_{i,t}^{v_ov_d}(\mathbf{x_t^{v_ov_d}},\mathbf{P_{i,t}^{v_ov_d}})/\partial\mathbf{P_{i,t}^{v_ov_d}}=0$ を満たす確率を最適確率 $P_{ij,t}^{v_ov_d*}$ として導出すれば

$$\begin{aligned}P_{ij,t}^{v_ov_d*}&=\frac{\mu}{\beta_i\Theta_i^{v_ov_d}(t)}\sigma_i^{v_ov_d}(t)\exp\Bigg(\frac{1}{\mu}(\omega_{ij}^{od}-u_{0,t}^{v_ov_d}-\mu)\\ &\quad-\frac{\beta_i}{\mu\bar{Z}_{ij}^{v_ov_d}(t)}(\Delta_{ij}^{v_ov_d}\pi_{i,t-1}^{v_ov_d}(\mathbf{x_t^{v_ov_d}})+\Theta_i^{v_ov_d}(t))\Bigg)\end{aligned} \tag{13}$$

が導かれる．ただし $\Theta_i^{v_ov_d}(t)=\frac{\mu}{\beta_i P_{0,t}^{v_ov_d}}\sigma_i^{v_ov_d}(t)$，$\sigma_i^{v_ov_d}(t) = \sum_{l=1}^{m_i^{od}}P_{il,t}^{v_ov_d}\bar{Z}_{il}^{v_ov_d}(t)$ である．式 (13) を式 (12) に代入すれば，任意の 2 地点間 v_o,v_d における最適価格

$$\begin{aligned}&r_{ij,t}^{v_ov_d*}(x_{ij,t}^{v_ov_d})\\ &=\frac{\mu}{\beta_i}+\frac{1}{\bar{Z}_{ij}^{v_ov_d}(t)}(\Delta_{ij}^{v_ov_d}\pi_{i,t-1}^{v_ov_d}(\mathbf{x_t^{v_ov_d}})+\Theta_i^{v_ov_d}(t))\end{aligned} \tag{14}$$

が導出される．ここで $\Theta_i^{v_ov_d}(t)$ は次式を満たす唯一の解である:

$$\frac{\beta_i\Theta_i^{v_ov_d}(t)}{\mu}\exp\left(\frac{u_{0,t}^{v_ov_d}+\mu}{\mu}\right)=\sum_{l=1}^{m_i^{od}}\bar{Z}_{il}^{v_ov_d}(t)\exp(\Psi_{il,t}^{v_ov_d}).$$

ただし，$\Psi_{ij,t}^{v_ov_d}=(\omega_{ij}^{v_ov_d}-\frac{\beta_i}{\bar{Z}_{ij}^{v_ov_d}(t)}(\Delta_{ij}^{v_ov_d}\pi_{i,t-1}^{v_ov_d}(\mathbf{x_t^{v_ov_d}})+\Theta_i^{v_ov_d}(t)))/\mu$ である．

最適価格が一定となる場合

仮定 1. 他の輸送機関（移動手段）の価格および価格以外の要因がすべての t に対して一定である

仮定 2. 在庫（空席数）が十分に存在する（すべての t に対して $x_{ij,t}^{v_ov_d}\geq t$ である）

仮定 3. すべての t に対して $c_{ij,t}^{v_ov_d}=0$ である

上記の仮定をすべて満たす場合，最適価格は j と時間 t から独立な一定となって次式で与えられる:

$$r_{i\cdot,\cdot}^{v_ov_d*}(x_{ij,t}^{v_ov_d})=\frac{\mu}{\beta_i}+\Theta_i^{v_ov_d}. \tag{15}$$

ここで $\Theta_i^{v_ov_d}$ は次式を満たす唯一の解である:

$$\frac{\beta_i\Theta_i^{v_ov_d}}{\mu}\exp\left(\frac{u_0^{v_ov_d}+\mu}{\mu}\right)=\sum_{l=1}^{m_i^{od}}\exp\left(\frac{\omega_{il}^{v_ov_d}-\beta_i\Theta_i^{v_ov_d}}{\mu}\right).$$

5　数値計算

輸送機関の数を $n=2$ とし，$i=1$ を高速鉄道，$i=2$ を航空機として数値計算をおこなう．ただし，顧客がいずれの輸送機関も選択しない場合はバスもしくは自動車を選択すると仮定し，そのときを $i=0\ (\notin I)$ とする．顧客が高速鉄道および航空機を選択するときの効用が価格 r_i^{od}，乗車時間 f_{i1}^{od}，頻度 f_{i2}^{od} によって与えられると仮定し，バス・自動車を選択するときの効用が価格 r_0^{od}，乗車時間 f_{01}^{od} によって与えられると仮定して，顧客の輸送機関に対する効用関数を式 (8) に基づいて

$$\begin{aligned}\text{高速鉄道：}\quad & U_1^{od}=w_1-\beta_1 r_1^{od}+\alpha_{11}f_{11}^{od}+\alpha_{12}f_{12}^{od},\\ \text{航空機：}\quad & U_2^{od}=w_2-\beta_2 r_2^{od}+\alpha_{21}f_{21}^{od}+\alpha_{22}f_{22}^{od},\\ \text{バス・自動車：}\quad & U_0^{od}=w_0-\beta_0 r_0^{od}+\alpha_{01}f_{01}^{od}\end{aligned}$$

と定義する．式 (10),(11) を用いれば，顧客が輸送機関 i を選択する確率およびバス・自動車を選択する確率は

$$P_1^{od}(\mathbf{r^{od}})=\frac{\mathrm{e}^{L_{12}}}{1+\mathrm{e}^{L_{12}}+\mathrm{e}^{L_{02}}}, \tag{16}$$

$$P_2^{od}(\mathbf{r^{od}})=\frac{1}{1+\mathrm{e}^{L_{12}}+\mathrm{e}^{L_{02}}}, \tag{17}$$

$$P_0^{od}(\mathbf{r^{od}})=\frac{\mathrm{e}^{L_{02}}}{1+\mathrm{e}^{L_{12}}+\mathrm{e}^{L_{02}}} \tag{18}$$

と書き換えることができる．ただし

$$\begin{aligned}L_{12}&=(c+\eta_1(r_1^{od}-r_2^{od})+\eta_2(f_{11}^{od}-f_{21}^{od})\\ &\qquad+\eta_3(f_{12}^{od}-f_{22}^{od}))/\mu,\\ L_{02}&=(c'+\eta_1'(r_0^{od}-r_2^{od})+\eta_2'(f_{01}^{od}-f_{21}^{od})-\eta_3'f_{22}^{od})/\mu\end{aligned}$$

である．ここでパラメータ $c,\eta_1,\eta_2,\eta_3,c',\eta_1',\eta_2',\eta_3'$ を最小二乗法によって推定したところ，表 1,2 の結果が得られた．

表 1　パラメータ $c, \eta_1, \eta_2, \eta_3$ の推定結果

重相関 R	0.876563		
重決定 R^2	0.768362		
補正 R^2	0.736775		
	係数	t-value	P-value
c	1.066381	0.789185	0.438427
η_1	−0.096357	−1.353534	0.189629
η_2	−1.428736	−3.311694	0.003173
η_3	0.028856	2.096006	0.047805

表 2　パラメータ $c', \eta'_1, \eta'_2, \eta'_3$ の推定結果

重相関 R	0.873299		
重決定 R^2	0.762651		
補正 R^2	0.730285		
	係数	t-value	P-value
c'	2.864217	2.578496	0.017142
η'_1	−0.131912	−1.940589	0.065230
η'_2	−0.680554	−5.923208	0.000006
η'_3	0.037645	2.208545	0.037927

表 1,2 より，顧客の輸送手段選択に対する効用は料金（パラメータ η_1,η'_1）よりも所要時間（パラメータ η_2,η'_2），運行頻度（パラメータ η_3,η'_3）の要素の方がより影響を与えることがわかる．

5.1　最適価格が一定となる場合

第 4 節で求めた最適価格が一定なる場合の販売価格と現在の実際の新幹線のチケット価格（実販売価格）の比を取ったもの表 3 に示す（LCC の拠点空港が存在する都市ならびに主要都市）．

表 3　価格比: 最適価格が一定となる場合の販売価格／実販売価格

	東京	愛知	大阪	岡山	広島	山口	福岡
東京	—	1.869	1.137	0.909	0.960	0.843	0.800
愛知	1.869	—	1.639	0.954	0.757	0.662	0.991
大阪	1.140	1.639	—	1.726	1.040	0.843	1.193
岡山	0.909	0.954	1.726	—	1.717	1.168	0.869
広島	0.958	0.758	1.040	1.717	—	1.948	1.169
山口	0.840	0.662	0.844	1.168	1.948	—	1.845
福岡	0.812	0.997	1.196	0.869	1.169	1.845	—

表 3 より，航空機との競合区間においては距離に拘わらず現在の料金よりも低い料金設定を，そうでない区間においては高い料金設定をすることがより善い価格政策であることがいえる．

5.2　高速鉄道の動的価格

ここでは，東京一新大阪における高速鉄道の動的価格の数値計算をおこなう．図 1 は東京一大阪における顧客の移動手段が高速鉄道，航空機，バス・自動車の 3 つの場合，図 2 は航空機を FSA と LCC とに分けた場合であり，顧客の移動手段が高速鉄道，FSA，LCC，バス・自動車の 4 つの場合のものである．また，それぞれの図における実線は在庫（空席）に対する最適な動的価格を，点線は最適な一定価格（空席が十分に存在する場合）を表す．ただし $\lambda = 0.5$，$c^{od}_{ij,t} = 0.05$，$\gamma^{od}_{ij,t} = 0.8$ とする．

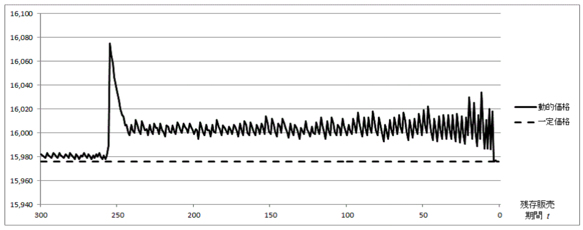

図 1　東京一新大阪における高速鉄道の動的価格 (単位: 円)

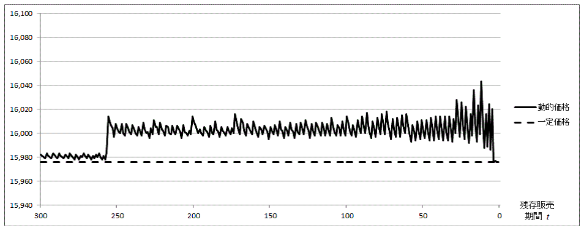

図 2　LCC を考慮した東京一新大阪における高速鉄道の動的価格 (単位: 円)

図 1,2 より，価格については特に大きな差は観察されないものの若干変動の仕方に差が見られる．これは在庫が減ったときにおける期待収益の差 $\Delta^{v_o v_d}_{ij} \pi^{v_o v_d}_{i,t-1}(\mathbf{x}^{\mathbf{v_o v_d}}_{\mathbf{t}})$ の影響によるものであると考えられる．

6　おわりに

本研究では主に航空路線との競合区間における高速鉄道の期待収益を最大にするような価格政策について考察してきたが，動的価格政策は期待収益を確保しつつ決められた販売期間で在庫を消費する観点から陳腐化商品（チケット）を扱う企業にとっては有用な政策であるといえる．

今後の研究課題は，航空路線が存在しない区間について在来線や他の企業（私鉄）との競合を考慮したモデルへの拡張をおこない，短距離区間における価格政策について考察することである．

参考文献

[1] Anderson, de Palma, and Thisse, *Discrete Choice Theory of Product Differentiation*, Massachusetts Institute of Technology, 1992.

[2] Kalyan T. Talluri and Garrett J. van Ryzin, *The Theory and Practice of Revenue Management*, Springer, 2005.

[3] L. Dong, P. Kouvelis and Z. Tian, ‘Dynamic Pricing and Inventory Control of Substitute Products,’ *Manufacturing & Service Operations Management*, Spring, **11**, 2009, pp.317–339.

[4] 佐藤公俊，澤木勝茂，‘競合輸送機関を考慮した高速鉄道における動的価格モデル’，日本オペレーションズ・リサーチ学会秋季研究発表会アブストラクト集，2010，pp.108–109.