

# 阪神高速道路の大型車交通のランプ間ODの空間、時間的性質に関する研究\*

The spatio-temporal characteristics of large vehicle OD traffic volumes on Hanshin Expressway\*

横田孝義\*\*・玉川大\*\*\*・谷口栄一\*\*\*\*・河本一郎\*\*\*\*\*

By Takayoshi YOKOTA\*\*・Dai TAMAGAWA\*\*\*・Eiichi TANIGUCHI\*\*\*\*・Ichirou KOMOTO\*\*\*\*\*

## 1. はじめに

近年、自動料金収受システム（以降 ETC (Electronic Toll Collection) とする。）の普及率向上によって、交通の実態を ETC のデータを介して把握することが可能になってきている<sup>1)</sup>。従来のセンサーやプローブカーでは得られない貴重な情報が得られるため、今後の交通施策の検討に役に立つ可能性が高い。本稿では、阪神高速道路の ETC による大型車のランプ間 OD 交通量データを分析することで得た大型車交通の空間域、時間域での多様性について KL 展開<sup>4)</sup>の手法で分析したので報告し、この手法を利用した大型車交通の OD 交通量予測、クラスタリング結果について述べる。

## 2. ETCによる大型車両のランプ間OD交通量の概況

### (1) 大型車OD交通量の分布

図-1に2009年4月13日(月)の24時間の各OD交通量をソーティングして示す。また、図-2に対数スケール化したものを示す。全部で3,858のランプ間ODにおいて、24時間で少なくとも1台の大型車が走行したことを示しており、分布としてはロングテールの様相を呈している。本報告では、上位50の大型車のランプ間OD交通量にのみ着目することにした。(以降、単にOD交通量と呼ぶこととする。)上位50位までは、この日に141台以上の通過があった。また、上位50位までで全体の26.5%の大型車の交通量に相当する。

\*キーワード：発生交通、活動分析、交通流、ETC

\*\*正員、工博、京都大学大学院工学研究科都市社会学専攻  
先進交通ロジスティクス工学講座  
(京都市西京区京都大学桂C-1 TEL075-383-3140)

\*\*\*正員 博士(工学), 同上

\*\*\*\*フェロー、工博 京都大学大学院工学研究科都市社会学専攻  
(京都市西京区京都大学桂C-1  
TEL075-383-3231, FAX075-950-3800)

\*\*\*\*\*正員 阪神高速道路(株) 計画部 調査課  
(大阪府中央区久太郎町4-1-3 TEL06-4963-5797,  
FAX06-6252-7414)

### (2) ODの分類

図-3に上記の上位50個のODの分類として、1) 通過交通と考えられるもの、2) 阪神高速道路内のODであるもの、3) 阪神高速外に接続するODであるものの3種に分類した。図3(a)はそのODペアの数の割合を示し、図3(b)は大型車の走行台数の割合を示す。通過交通の割合がOD数で15%、車両数で21%であり、80%近い大型車交通は阪神高速道路を起終点のどちらかにしていることがわかる。すなわち、大型車の中心となる貨物車両が阪神地区を拠点にしていることを示している。

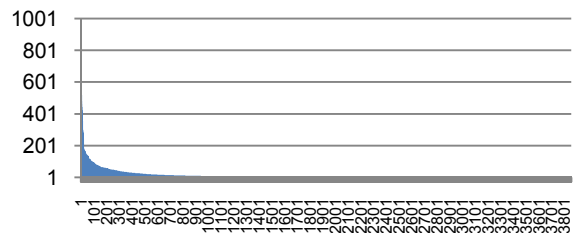


図-1 阪神高速道路 大型車ランプ間一日OD交通量分布

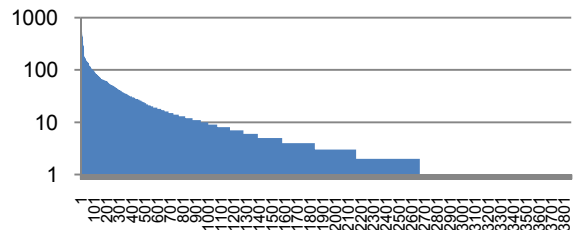
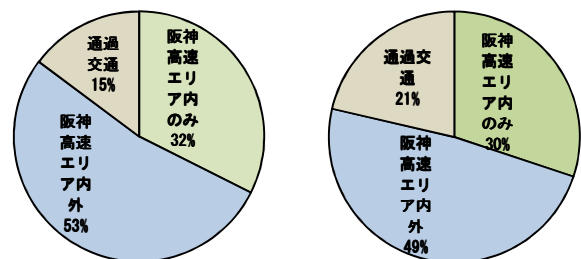


図-2 阪神高速道路 大型車ランプ間一日OD交通量分布 (対数表示)



(a) ODペア数比 (b) 大型車交通量比

図-3 大型車ランプ間ODの分類

### 3. ETCランプ間OD交通量データの分析

本研究では、まず、大型車の30分毎のOD交通量データから地点毎の特殊性、時間的特性の特殊性などがどの程度あるかを分析する目的で検討を行った。収集された全データは約4,000 ODになるが、その分布は前節で述べたように交通量の多いペアとそうでないペアでは著しく差がある。そこで本研究では上位50位までを抽出して分析を行った。

#### (1) ETCランプ間ODデータの空間域の主成分分析

まず、それぞれのOD交通量の空間的な特徴を大まかにとらえるために、空間域の成分分析を行った。ここでいう空間域の分析とは、上位50位まで抽出された各OD交通量が、空間的にどの程度独立性、あるいは相関があるかを調べるものである。今回得られたETCのOD交通量データは発時刻で30分毎に集計された1日48個のものである(N=48)。そこで、このOD交通量データを時刻インデックスtを固定して、ODペア毎に並べた50要素の列ベクトルとして表現する。また、一日の各OD交通量の平均値を

$$m(i) = \sum_{t=1}^{N-1} \frac{OD(i,t)}{N} \quad (1)$$

とする。上記OD交通量の集合をいわゆるKL展開<sup>4)</sup>(Karhunen-Loe've expansionの略。主成分分析に等価)し、OD交通量の集合を最も効率よく近似する正規直交基底を求め特徴空間に写像し、全体の傾向を調べる。次に、各OD交通量から一日平均値を引いたデータの集合をODの組み合わせを縦方向に並べたベクトル $\mathbf{X}(t)$ を

$$\mathbf{X}(t) = \begin{bmatrix} OD(0,t) - m(0) \\ \vdots \\ OD(M-1,t) - m(M-1) \end{bmatrix} \quad (2)$$

で表現する。全時間帯にわたって、このODのベクトル $\mathbf{X}(t)$ を平均2乗誤差の意味で最適に近似する空間方向の正規直交基底 $\mathbf{U}$ は、KL展開を用いて以下のように構成することができる。まず、ある正規直交基底 $\mathbf{U}$ が与えられたとき、OD列ベクトル $\mathbf{X}(t)$ の正規直交基底 $\mathbf{U}$ の張る空間へ射影された列ベクトルを $\mathbf{F}$ とすれば、

$$\mathbf{F}(t) = \mathbf{U}^t \mathbf{X}(t) \quad (3)$$

となる。主成分分析では対象の情報を最大限抽出するためにこの $\mathbf{F}(t)$ の分散が最大になるように基底 $\mathbf{U}$ を選ぶ。すなわち、

$$\sum_{t=0}^{N-1} |\mathbf{F}(t)|^2 / N$$

を最大化する。

すなわち、

$$\begin{aligned} & \sum_{t=0}^{N-1} |\mathbf{F}(t)|^2 / N \\ &= \frac{\sum_{t=t_0}^{N-1} \mathbf{U}^t \mathbf{X}(t) \mathbf{X}(t)^t \mathbf{U}}{N} = \mathbf{U}^t \mathbf{C} \mathbf{U} \end{aligned} \quad (4)$$

を最大化する。正規直交性の拘束条件をラグランジュの未定乗数の導入によって表現し、無制約の最適化問題にする。

$$\mathbf{U}^t \mathbf{C} \mathbf{U} - \sum_{i=0}^{N-1} \lambda_i (\mathbf{u}_i^t \mathbf{u}_i - 1) \quad (5)$$

これを規底ベクトル $\mathbf{u}_i^t$ で変分すると

$$\mathbf{C} \mathbf{u}_i - \lambda_i \mathbf{u}_i = \mathbf{0}, \quad (i = 0, 1, 2, \dots, M-1) \quad (6)$$

が得られ、固有値問題

$$(\mathbf{C} - \lambda \mathbf{I}) \mathbf{U} = \mathbf{0} \quad (7)$$

に帰着することができる。上記固有方程式の解である固有ベクトルが正規直交基底であり、固有値がその寄与率を表す。

#### (2) 空間域の主成分分析の結果

前節の定式化に沿ってデータ分析を行った結果を示す。図-4に、大型車と普通車のそれぞれのOD交通量の空間域の主成分分析で得られた固有値の累積値を示す。

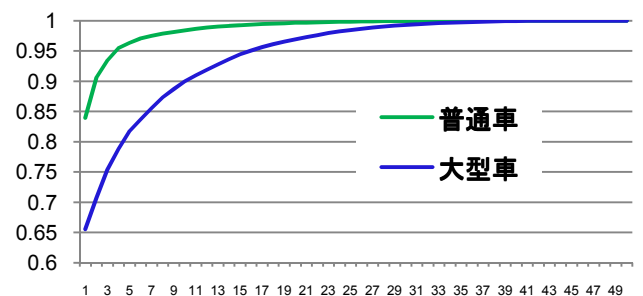
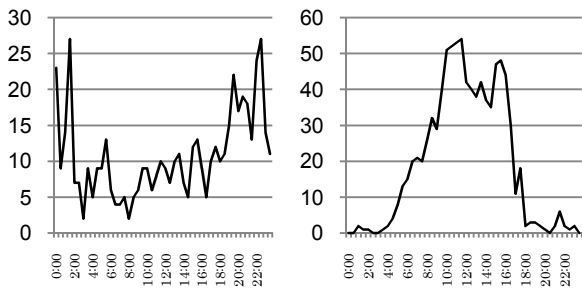


図-4 普通車と大型車の固有値累積値  
(空間域の主成分分析)

この結果から、普通車の場合は90%タイルで2次元、95%タイルで4次元で表現可能であるのに対して、大型車の場合はそれぞれ11次元、16次元と、より高次の基底ベクトルが必要であることがわかる。すなわち普通車のOD交通量の空間的多様性に比較して大型車のOD交通量は空間的により多様性が高いことがわかる。これは、大型車の主要な要素である貨物車両の出発時刻、到着時刻が、倉庫、港湾、空港、配送センター、各種物流拠点の位置関係や営業時間などに関係し、多様性が大きいことが原因であると考えられる。例として、**図-5**に(a)須磨合併→西宮 JCT (b)安治川(本線)入→北津守出口という2つの異なるODでの大型車交通量を示す。パターンとして大きく異なっていることがわかる。同じODについての普通車の交通量のグラフを**図-6**に示すが、パターンとしての類似性が高いことがわかる。

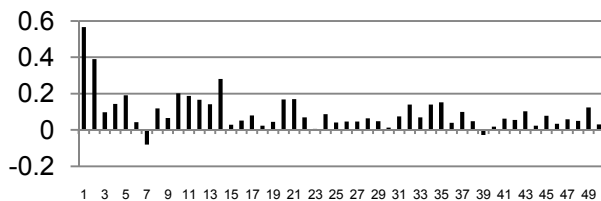


(a) 須磨合併→西宮 JCT (b) 安治川(本線)入→北津守出口  
**図-5 大型車のOD交通量(台/30分)の例**

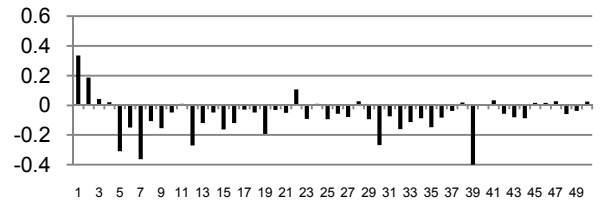


(a) 須磨合併→西宮 JCT (b) 安治川(本線)入→北津守出口  
**図-6 普通車のOD交通量(台/30分)の例**

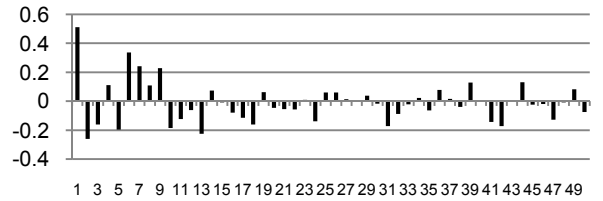
次に、主成分分析で得られた基底ベクトルを固有値の大きい順に3つ**図7-(a)(b)(c)**に並べて示す。



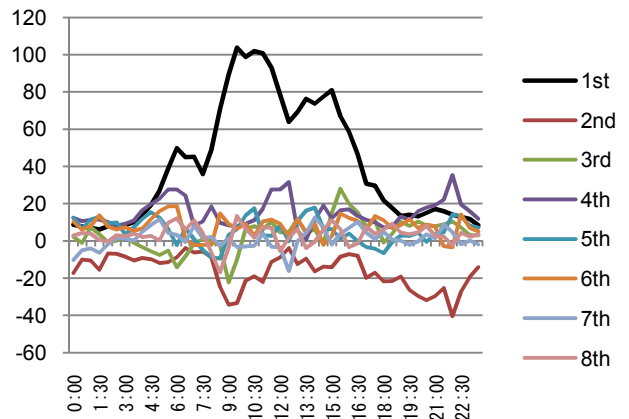
**図-7 (a) 第1基底 寄与率 65.6%**



**図-7 (b) 第2基底 寄与率 5.1%(70.7%)**



**図-7 (c) 第3基底 寄与率 4.7%(75.4%)**



**図-8 基底の因子負荷率の時刻推移**

**図-7 (a)** の第1基底ベクトルの寄与率は65.4%、**図-7 (b)** の第2基底ベクトルの寄与率は5.1%であり、ここまでで累積寄与率70.7%になる。**図-7 (a)** の第1基底は、7番目と39番目のOD交通量が例外ではあるが、その他すべてのOD交通量が同一符号で変化することを表している。**図-8**に第8基底までの一日の因子負荷量(各基底の重み)の変化を示す。第8基底までの寄与率は87.3%である。第1基底の因子負荷率の推移は5時から18時までに値が高く、昼休みでやや落ち込む日中の物流活動を表している。なお、第1基底の寄与率は65%程度であり、残る35%の現象は表現できず、より高次の基底が残りの多様性の表現を担っている。

### (3) 時間域の主成分分析

前節は空間域の主成分分析を行ったが、本節では時間域の主成分分析を行う。これは、OD交通量の24時間推移の時系列の多様性を調べるのが目的である。前節同様、各OD交通量データから平均ベクトルを引いた行ベクトルを準備する。ここでは、各OD交通量か

ら交通量の一平均値を引いたデータを時間軸で並べた列ベクトル

$$Y(i) = \begin{bmatrix} OD(i, t_0) - m(i) \\ \vdots \\ OD(i, t_{N-1}) - m(i) \end{bmatrix} \quad (8)$$

で表現する。OD交通量集合{OD(i, t)}を平均2乗誤差の意味で最適に近似する空間方向の正規直交基底Vは、主成分分析を用いて以下のように構成することができる。まず、ある正規直交基底Vが与えられたとき、OD列ベクトルY(i)が正規直交基底Vの張る空間へ射影された列ベクトルをG(i)とすれば、

$$G(i) = V^T Y(i) \quad (9)$$

となる。主成分分析では対象の情報を最大限抽出するために、G(i)の分散が最大になるように基底Vを選ぶ。

すなわち、

$$\sum_{i=0}^{M-1} |G(i)|^2 / M \quad (10)$$

を最大化する。ここでMはODペアの総数で50である。すなわち、

$$\begin{aligned} & \sum_{i=0}^{M-1} |G(i)|^2 / M \\ &= \frac{\sum_{i=0}^{M-1} V^T Y(i) Y(i)^T V}{M} = V^T D V \end{aligned} \quad (11)$$

行列DはOD交通量の時間域の共分散行列である。前節同様に、この共分散行列Dの固有値問題を解くことで時間域の主成分分析となる。

#### (4) 時間域の主成分分析結果

空間的主成分分析と同様に、固有値の分布を調べた。その結果を図-9にグラフを示す。この結果から、普通車の場合は90%タイルで2次元、95%タイルで4次元必要なのに対して、大型車の場合は、それぞれ7次元、10次元となり、より高次の基底ベクトルが必要である事がわかった。図-10(a)(b)(c)に大型車のOD交通量の時系列の第1、第2、第3基底ベクトルを示す。第1基底は4:00-19:00に集中しており、いわゆる生活時間帯に近い範囲での物流活動を表現していると解釈出来る。一方、第2基底は夜間のピークや

昼休みの交通量の落ち込みを表現するために生成されたと解釈出来る。

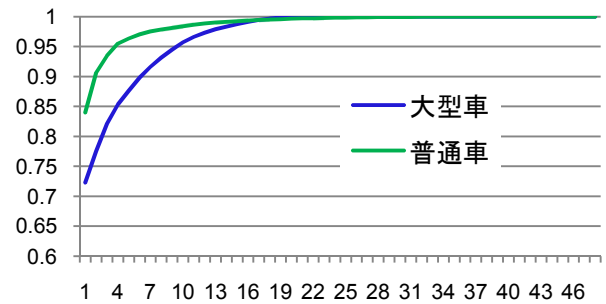


図-9 普通車と大型車の固有値累積値 (時間域の主成分分析)

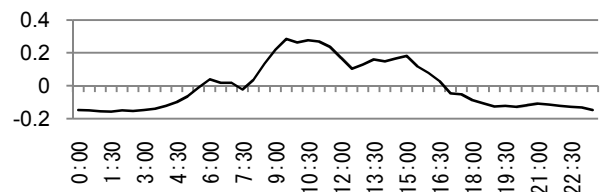


図-10 (a) 第1基底 寄与率 72.3%

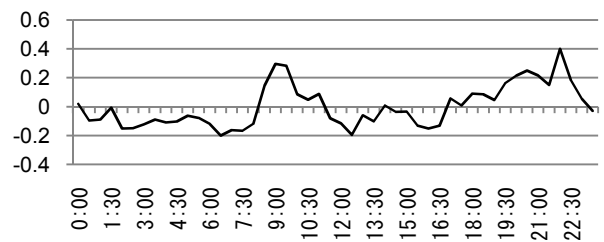


図-10 (b) 第2基底 寄与率 5.2% (累積寄与率 77.5%)

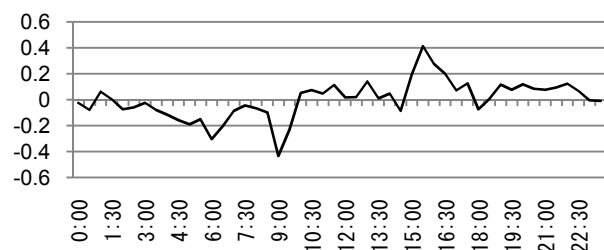


図-10 (c) 第3基底 寄与率 4.6% (累積寄与率82.1%)

#### (5) 主成分分析の応用

以上のように、主成分分析によってOD交通量をより簡便なモデルで近似することが可能になる。すなわち、(2)式のベクトルX(t)の近似解をX̂(t)とすると、これは、以下のように重みベクトルをa(t)とした場合の空間域の基底ベクトルの線形結合で表わせる。

$$\tilde{\mathbf{X}}(t) = \mathbf{a}(t)^T \mathbf{U} \quad (12)$$

ここで、 $\mathbf{a}(t)$ は、**図-8**で示した因子負荷率を要素として持つ時系列ベクトルを表し、

$$\mathbf{a}(t) = \mathbf{X}(t)^T \mathbf{U} \quad (13)$$

で表わされる。従って、すべてのOD交通量を予測しようとするならば、個々のOD交通量を個別に予測する必要はなく、主成分を軸として抽象化された特徴空間上のベクトル  $\mathbf{a}(t)$ を予測し、再度、OD交通量の実空間に写像すれば、すべてのOD交通量を同時に予測することが可能になる。

一方、(8)式のベクトル  $\mathbf{Y}$ の近似解を  $\tilde{\mathbf{Y}}(i)$  とすれば、重みベクトルを  $\mathbf{b}(i)$ として、時間域の基底ベクトルの線形結合で近似できる。

$$\tilde{\mathbf{Y}}(i) = \mathbf{b}(i)^T \mathbf{V} \quad (14)$$

ここで、 $\mathbf{b}(i)$ は、時間域の基底ベクトルの重みであり、

$$\mathbf{b}(i) = \mathbf{Y}(i)^T \mathbf{V} \quad (15)$$

で表わされる。

特徴空間上の予測手法は<sup>2), 3)</sup>などで旅行時間の予測手法として適用事例があり、本稿で扱う交通量に対しても適用可能性が高い。日々の大型車のOD交通量の2次までの統計的性質、すなわち共分散行列に大きな変化がないと仮定すれば、上記の特徴空間上のベクトル  $\mathbf{a}(t)$ あるいは  $\mathbf{b}(i)$ を推定できれば全てのOD交通量を同時に推定することができる。ここでは、統計蓄積が十分でない場合を想定し、ある一日のデータを基に、ある日のOD交通量を予測する問題を考える。そこで、2009年4月13日(月)のデータで抽出した基底ベクトルを用いて翌4月14日(火)のOD交通量をリアルタイムに予測する問題を例にあげる。なお、OD交通量データは30分間隔の現況値として入力されると想定した。ここでは簡便のために以下の予測式を用いる。

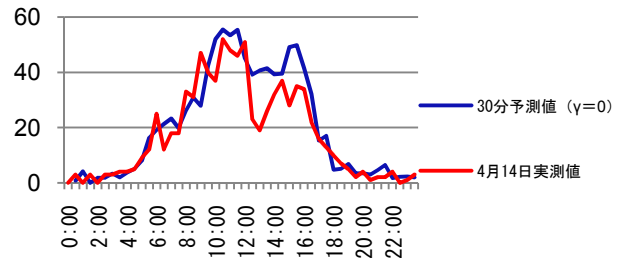
$$\tilde{\mathbf{X}}(t) = \mathbf{a}(t)_{\text{today}}^T \mathbf{U} \quad (16)$$

$$\mathbf{a}(t)_{\text{today}} = \mathbf{a}(t)_{\text{base}} - \gamma \cdot \{ \mathbf{a}(t - \Delta t)_{\text{base}} - \mathbf{X}(t - \Delta t)_{\text{today}}^T \mathbf{U} \} \quad (17)$$

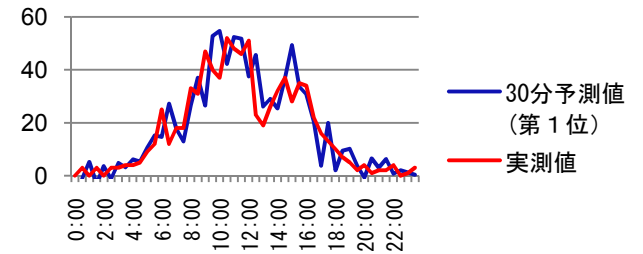
$$\text{ここで、} 0 < \gamma < 1 \quad (18)$$

である。 $\mathbf{a}(t)_{\text{today}}$ は予測したい当日(4月14日)の特徴空間ベクトル、 $\mathbf{a}(t - \Delta t)_{\text{base}}$ は基準になる元の日(4月13日)の特徴空間ベクトルである。

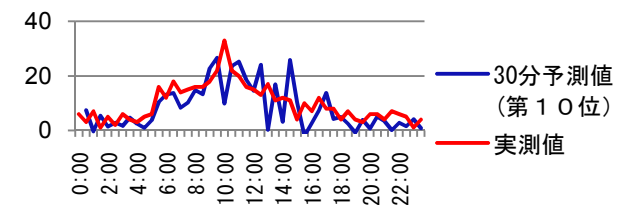
もし  $\gamma$ として1を選べば、当日の  $\Delta t$ (30分前)の特徴空間上での予測誤差をそのままベースに対する補正值として用い、 $\gamma$ が0であれば、ベースの日のデータをもって予測値とすることになる。**図11(a)**に  $\gamma$ を0とした場合の30分予測結果の数例を示す。この場合、特徴空間ベクトルの補正が行わないために12時以降のディップに大きな誤差が生じている。次に、 $\gamma$ を1とした際の、一日交通量の多い順に1位、10位、20位、30位のODについて予測した例を示す。特徴空間上で予測処理を行うことで、50ODのすべて同時に予測可能である。共分散行列の算出に、より蓄積期間が取れば、より安定性が増すと予想される。また、大型車と普通車のように、交通需要の発生メカニズムの異なるものは別個のモデルを用意したほうが良いと考えられる。



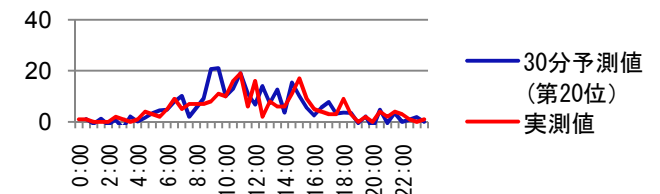
**図-11(a) 予測交通量 (台/30分)  $\gamma=0$**



**図-11(b) 予測交通量 (台/30分)  $\gamma=1$  第1位OD**



**図-11(c) 予測交通量 (台/30分)  $\gamma=1$  第10位OD**



**図-11(d) 予測交通量 (台/30分)  $\gamma=1$  第20位OD**

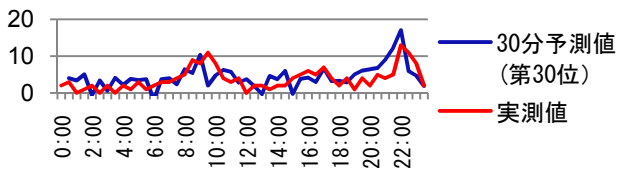


図-1 1 (e) 予測交通量 (台/30分)  $r=1$  第30位OD

#### 4. クラスタリングによるOD交通量パターンの分類

前章までで、阪神高速道路の大型車のOD交通量の性質について分析を行い、固有値の累積値の95%タイルにおいて、空間域、時間域でそれぞれ16次元、10次元の多様性を有していることがわかった。本節ではさらに、ODペアのクラスタリングを特徴空間上で実施した。特徴空間としては、時間域の主成分分析結果を用いた。クラスタリング手法はk平均法を用い、距離計算には主成分で20次元までのユークリッド距離を用い、クラスター数としては4とした。反復計算により収束したクラスタリング結果を図-1 2 (a) (b)に示す。次に、クラスタ生成後に、その解釈を行った。

##### (1) クラスタ1 (赤)

このクラスタの属するOD交通量2パターン図-13は交通量が突出して多く、場所も同一の上り、下り方向になっている。また、4:00-18:00までに集中しており、生活時間帯に近い範囲で交通量が分布している。

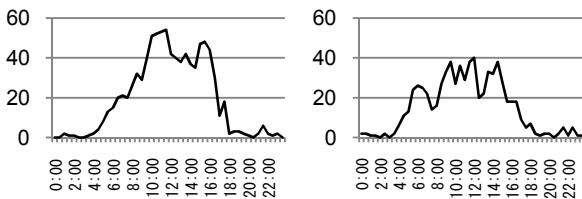


図-1 3 クラスタ1に属するOD交通量 (台/30分)

##### (2) クラスタ2 (橙)

このクラスタには11個のODが属する。交通量としてはピーク時に30分あたりで20台程度走行し、ほぼ日中に行動し、昼休み時間帯にディップが生じている。

##### (3) クラスタ3 (青)、クラスタ4 (緑)

クラスタ3には16個のOD、クラスタ4には21のODが属する。いずれも24時間にわたり比較的交通量が分散している。クラスタ3、4間に際立った特徴の差は見受けられない。

以上、4つのクラスタに分離したが、図-1 2

(a), (b)を見てわかるように、クラスタ1以外のクラスタは特徴空間上で明瞭に分離されているわけではなく多様性に連続性があることがわかる。

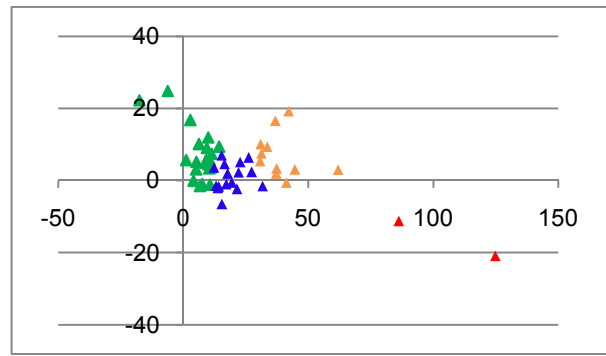


図-1 2 (a) クラスタリング結果  
X軸第1基底、Y軸第2基底

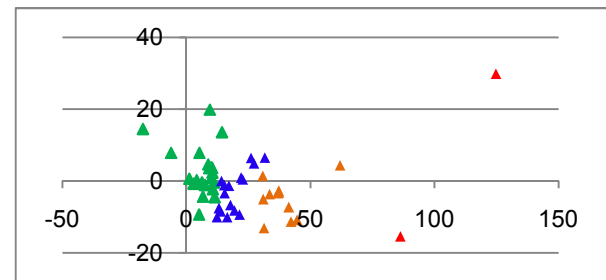


図-1 2 (b) クラスタリング結果  
X軸第1基底、Y軸第3基底

#### 5. おわりに

本報告では阪神高速道路の大型車交通のランプ間OD交通量の分析をKL展開を用いて行った。その結果、空間域、時間域ともに普通車両にくらべ多様性が高いことが確認できた。また、同時に特徴空間上での予測処理手法によって全OD交通量の予測が統一的に実施可能であること、および、クラスタリングによる分類について提案し結果を示した。今後は大型車の中の貨物車交通に焦点を当て、各種モデル化を進める予定である。

#### 参考文献

- 1) 西内浩晶、Agachai SUMALEE、Marc MISKA、割田 博、桑原雅夫：首都高速道路におけるランプ間OD交通量の時間的空間的相関性分析 第38回土木計画学研究・講演集 CDROM, 2008. 11
- 2) 横田孝義：プローブカーによる交通情報予測と推定：人工知能学会 Vol. 22. No. 4 pp. 523-528.
- 3) 熊谷正俊、蛭田智明、谷越浩一郎、横田孝義：特徴空間軌跡を用いた交通渋滞の動的予測：情報処理学会 研究報告 2007-ITS-30
- 4) Handbook of Constructing Composite Indicators METHODOLOGY AND USER GUIDE, OECD publishing, ISBN978-92-64-04345-9