## 令和5年度卒業論文

# 二次元混合交通における車種の偏在が 交通特性に及ぼす影響

電気通信大学 I類 経営・社会情報学プログラム

学籍番号:2010016

氏名:淺井 二千夏

指導教員:長濱 章仁 助教

提出年月日:令和6年2月6日

# 目次

1	序論	3
1.1	新興国における道路交通渋滞と研究の必要性	3
1.2	車種の偏在と交通特性に関する先行研究から得られる可能性と展望	4
1.3	研究目的	6
1.4	新興国交通の特性解析手法—Passenger Car Unit—	6
1.5	分析枠組みと仮説—PCU を通して車種の偏在が及ぼす影響を測る —	7
2	各車種の占有率が交通特性に及ぼす影響	8
2.1	使用した交通観測データ	8
2.2	PCU に基づく交通特性の算出	9
2.3	PCU 推定方法	12
2.4	解析結果と考察・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	16
2.5	各 PCU 推定法による結果を踏まえた考察	21
3	車両の群れが交通特性に及ぼす影響	24
3.1	車両の群れに関する先行研究	24
3.2	群衆心理に関する先行論文及び研究	24
3.3	本章の目的	24
3.4	車両の群れの検出方法	25
3.5	群れの割合の計算方法	31
3.6	群れの混合度と平均速度の算出方法	32
3.7	群れの割合に関する結果と考察	33
3.8	群れ内部の混合度と群れの平均速度に関する結果と考察	40
3.9	同一車種の群れによる各車種の平均速度に関しての結果	48
3.10	各車種の占有率が及ぼす影響と考察	51
4	·····································	52

## 1 序論

## 1.1 新興国における道路交通渋滞と研究の必要性

急激な人口増加と経済発展に伴って、モータリゼーションが世界各国で加速度的に進んでおり、道路交通渋滞が深刻化している[1].

交通渋滞の深刻化は環境,経済,健康といった様々な面で影響を及ぼす.経済的影響を例にしてみると,国際協力機構 [2] によれば,例えばフィリピンにおいては,渋滞による経済的損失は,1日あたり35億ペソ(約70億円)と試算されている.交通渋滞は人口増加と軌道系公共交通の整備不良などにより発生したとされている.また,Business Insider Japan[3] によれば,2018年のアメリカ合衆国のボストンでは,大気汚染によって市民の成人の約10%,子供の13%が喘息に悩んでいる.そして,ボストンの大気汚染の要因として,環境の専門家は悪化する交通渋滞にあると考えている.このように,交通渋滞は我々の生活に多大な損失を及ぼすため,渋滞の軽減や予防は必要不可欠であると言える.

交通渋滞は世界各地で生じているが、中でもタイやインド、フィリピンなどのアジア諸国をはじめとした新興国における交通渋滞は特に深刻である。 TomTom が 2023 年に行った世界 55 ヵ国 387 都市における交通状況の調査結果「TOMTOM TRAFFIC INDEX[4]」によれば、渋滞の深刻度上位 10 都市のうち新興国の都市が 3 割以上を占めている (表 1). これらから、新興国での交通渋滞の深刻さは世界的にみても上位に位置していると言える.

World rank	Country	City	
1	United Kingdom	London	
2	Ireland	Dublin	
3	Canada	Toronto	
4	Italy	Milan	
5	Peru	Lima	
6	India	Bengaluru	
7	India	Pune	
8	Romania	Bucharest	
9	Phillipines	Manila	
10	Belgium	Brussels	

表 1: 渋滞が最も深刻な世界の 10 都市 [4]. 太字はアジアの新興国である.

新興国の交通渋滞の要因として、例えば Mobility Transformation[5] は、信号機や道路といった"インフラの整備不良"や、"急激な自動車台数の増加"、"免許証の不正等による事故数の多さ"、そして"雨季の豪雨による視界の悪さ"など挙げている。整備がされていない"交通インフラ"の中には、信号機や道路車線、十分な舗装といった道路設備が含まれる。また、乗用車やトラック、バス以外の車種(二輪、三輪車)の割合が高いことも新興国交通の特徴である[6]。この様な状況に順法意識の低さやリスクテイキングな運転傾向[7]といった交通文化が加わることで、縦横無尽に様々な車種の車両が走行する、新興国独特の「二次元混合交通」が形成されることが多々ある。図1にインドはムンバイで撮影された二次元混合交通の典型例を示す。



図 1: インド ムンバイの二次元混合交通

既存の道路交通に関する理論は、これらの、新興国交通の特徴は鑑みず、ある程度車種が均一で車線をはじめとする交通ルールが順守されることを前提として確立されてきた[8]. すなわち、新興国の渋滞軽減や予防にあたっては、二次元混合交通ならではの特性を理解、理論化する必要があり、またそれによって二次元混合交通ならではの渋滞対策が得られる可能性がある.

### 1.2 車種の偏在と交通特性に関する先行研究から得られる可能性と展望

1.1 節のような背景から、一部の新興国では様々な車種が縦横無尽に走行する二次元混合交通が形成されている。一方、これまでの研究は特に車線が守られる混合交通の中で、特定の車種が交通に対して影響を与えていることを明らかにしている。例えば、Aghabayk

らの研究 [9] によって、車線上で先行する特定車種が追従する車両に影響を及ぼすことが明らかにされた。 Aghabayk らは the Interstate-80 in California の実観測データを用いて、大型車-乗用車での 4 種類の先行車と追従車パターンから、車間距離や反応速度、そして加速度のばらつきの差異を調査した [9]。また、Lan らの研究 [10] によって、車線上で大型車と乗用車の並ぶ順序によって、交通流の安定性、すなわち渋滞の起こりやすさが変化することが示唆された。 Lan らは、車列の安定性を理論的に計算するとともに、シミュレーションでも安定性を検証している。 Lan らはこの研究を Intelligent driver model のパラメタを大型車、乗用車で変化させ、理論計算、シミュレーションを行うことで実現した。これらの研究に基づくと、少なくとも車線を守る混合交通においては、特定の車種が後続車両の挙動に影響し、さらには交通全体の特性を変化させると言える。特定の車種が車列内でどのように位置し列を成しているか、すなわち偏在するかが、交通特性に影響を及ぼすということである。

従って、車線を守らない二次元混合交通においても、特定の車種が車列のどこにどの程度偏在するかによって、交通特性が変化する可能性が考えられる。しかしながら、Aghabaykらや Lan らの研究は、車線を守らない二次元混合交通には言及しておらず、これらの研究をもって、車種の偏在が交通特性に影響を及ぼすとは断言できない。特に、長濱らの研究[11]は、二次元混合交通の中で各車種が偏在することを示している。具体的に長濱らは、加減速を伝え合う追従関係に着目し、追従関係を結ぶ車種の組合せに偏りがあることを明らかにした[11]。加えて、より大きな追従関係のネットワークでも、特定の車種が集まる"群れ"が形成されていることを明らかにしている[12]。これはすなわち、交通の中で確かに、各車種や複数車種が偏在していることを示している。しかしながら、長濱らはこれら偏在する車両群が交通に対して影響を及ぼすことを明らかにしていない。

もし二次元混合交通で、車種の偏在による交通特性への影響が発見できれば、以下のようなインパクトを交通工学分野に及ぼす。まず、二次元混合交通を microscopic model によってシミュレートする際に、車種の偏在を再現する必要性 [13] が確からしくなる。 Microscopic model とは Intelligent driver model のように各車両の挙動をその車両と他車両との関係において定義するものである。また、偏在による交通特性変化を活用できれば、長濱 [14] の提唱する「混合交通ならではのボトムアップ式交通流改善」の実現可能性が高まる。

### 1.3 研究目的

本研究は実際の二次元混合交通における各車種の偏在が,交通特性に与える影響を明らかする.具体的にはまず,観測領域に占める各車種の占有率と交通特性の関係を調査する. 続いて,占有率に基づく解析結果をさらに,車種の偏在という観点から詳細に考察するために,車両の群れが交通に占める割合や,群れの中で各車種が占める割合が交通特性に対して及ぼす影響を調査する.

## 1.4 新興国交通の特性解析手法—Passenger Car Unit—

ある道路が 1 分間に最大乗用車 10 台を流せる能力があるとしよう. しかしその道路は, 1 分間に大型トラック 10 台を流すことは不可能だろう. 大型トラックは乗用車に比べ車長が長く, また車間距離を広めにとると想定されるからである. ここから, 車種が入り交じる交通の交通量を測定するためには, 各車種の大きさ等の特性を考慮した, "台"以外の車両数単位を設定する必要があることがわかる.

そこで Passenger Car Unit (PCU) という車両数の単位が、先行研究で提案されてきた. PCU は Passenger Car Equivalent (PCE) とも呼ばれる. PCU を求める代表的な考え方を紹介する. 図 2 上図のように、前走車後部と着目する乗用車後部が、同じ地点を通過する時間間隔(headway time)を  $h_{\rm c}$  とおく. 一方下図のように、前走車後部と着目するトラック後部との時間間隔を  $h_{\rm t}$  とおく. この場合トラックの PCU ( $PCU_{\rm t}$ ) は式 1 と推定される.

$$PCU_{\rm t} = \frac{h_{\rm t}}{h_{\rm c}} \tag{1}$$

この手法を採用すると、例えばトラックが乗用車に比べ 2 倍の時間間隔をとった場合、1 分間に乗用車が 10 台流れる交通の量と、1 分間にトラックが 5 台流れる交通の量は等しく 10 PCU/1 min と計算される.

図 2 で紹介した PCU の基本的なコンセプトを基に様々な PCU 推定手法が提案されている. 特に二次元混合交通では, 各車種の車幅や頻繁な追い越しといった複雑な要素を考慮する必要があるため, PCU 推定手法が多く提案されている [16]. 本研究ではそれらのPCU 推定手法を複数用いながら, 交通特性を測定する. これにより得られる解析結果の普遍性を高める. 用いる PCU 推定手法の詳細は 2.3 節に記した.

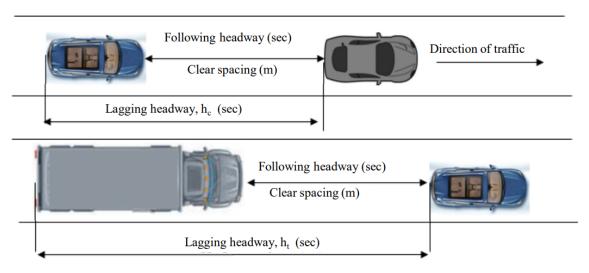


図 2: 基本的な PCU 推定手法に用いる各種変数 [15]

### 1.5 分析枠組みと仮説—PCU を通して車種の偏在が及ぼす影響を測る —

PCU は複雑な交通を簡便に解析するために、様々な車種を同一の車両数単位でカウントする. 1.4 節で述べた通り、例えば 1 分間にトラックが 5 台流れた交通も、乗用車 8 台とトラック 1 台が流れた交通も、等しく乗用車が 10 台流れた交通(10 PCU/1 min)とみなすことができるとされている。車種の混じり具合が異なっても、PCU を通じて交通量を測定することで、その混じり具合を無視した測定が可能であるとされている。

ここで、各車種が交通で偏在する様子が交通特性に影響を与えると仮定しよう. もしそうであれば、交通の中で各車種が偏在する様子が変化すると、PCU を用いたとしても交通特性が変化する様子が観測されるはずである.

## 2 各車種の占有率が交通特性に及ぼす影響

## 2.1 使用した交通観測データ

本研究は先行研究 [12] が収集した、インドのムンバイで 2017 年の 1 月 18 日から 21 日 にわたり観測された交通データを用いる.特に本研究では、1 月 19 日の 11: 34 から 14: 34 の間に収集されたビデオデータを分析に使用した.この映像は図 3 で示されたショッピングモール(P を含むブロック)の 2 階のバルコニーから Sony の HDR-CX670 video camera で撮影された.分析に使用した観測領域(区間範囲 35 m)は赤い破線の矩形で囲われている.なお、観測領域の下流側、黒い破線矩形で囲われている交差点に信号が設置されている.ビデオ画像座標系における車両位置は OpenCV[17] で提供されている MIL



図 3: 先行研究 [12] での観測場所

tracker によって半自動で検知した。また、車種については手動で登録を行った。なお、MIL tracker による追跡が失敗した場合は、手動での追跡を行った。

交通における車種は先行研究 [12] 同様, 二輪車, オートリキシャ(三輪車), 乗用車, そして大型車に分類し, それぞれ "m", "r", "c", "h" と以下では示す. 荷台付きの三輪車はオートリキシャとし, 荷台付きの大型車と同様にバスなども大型車とした. 歩行者や自転車は観測数が少ないことから分析では考慮しないこととした. ある車両が観測おいてほかの車両を妨害した場合, その観測期間は分析から除外した.

ビデオ画像座標系の位置は、ホモグラフィー行列を用いたホモグラフィー変換によって 実世界座標に変換した. ホモグラフィー行列は、ある平面の座標を別の平面の座標に投影 写像する行列である. なおビデオ画像座標系における 1% の座標のずれは道路の横方向 (車両の進行方向に対し垂直な方向) 約 40cm の誤差に相当する. これらの追跡誤差は追 跡車両の周囲に一様に広がっているとみなした.

ビデオ動画を構成する各時刻(Frame)の静止画は 33ms ごとにスナップショットされたものである.

### 2.2 PCU に基づく交通特性の算出

#### 2.2.1 密度, 速度, 交通量の算出方法

交通工学分野では、ある道路の交通特性を把握するために交通の"密度"、"速度"、"交通量(流量)"が用いられる。密度とは、道路がどの程度混雑しているかを示す指標であり、単位道路長にどれだけの車両数が存在するかで示される。車両数の単位に PCU を用いた場合には例えば、道路  $1\,\mathrm{m}$  あたりの PCU を密度の単位として定義することができる。 PCU の推定方法は  $2.3\,$  節に示した。密度を定義する式を式  $2\,\mathrm{cr}$  に示す。例えば、 $1.4\,$  節の例と同様、乗用車  $1\,\mathrm{ch}$   $1\,\mathrm{PCU}$ 、大型車  $1\,\mathrm{ch}$   $2\,\mathrm{PCU}$  に相当するとする。観測領域( $35\,\mathrm{m}$ )の中に乗用車  $2\,\mathrm{ch}$  と大型車  $1\,\mathrm{ch}$  。合計  $4\,\mathrm{PCU}$  分存在する場合には、その Frame における密度は  $\frac{4}{35}\,\mathrm{PCU/m}$  と計算できる。

$$\rho_i = \frac{\sum_{j=\text{m,r,c,h}} n_{ij} PCU_{ij}}{35\text{m}} \tag{2}$$

ただし,

 $\rho_i = \text{Frame}_i \ \text{での密度} \ [\text{PCU/m}]$ 

j:車種 m, r, c, h

 $n_{ij} = \text{Frame}_i$  における車種 j の台数 [台]

 $PCU_{ij} = Frame_i$  における車種 j の PCU 値

続いて速度について、速度は交通中を車両がどのくらいスピードを出して走行できているかを示す指標である。ある Frame i において、ある車種 j が  $n_{ij}$  台存在するとする。1

車両の速度は,着目している Frame の前後約1秒間の変位から算出した. なお,観測範囲を約2秒以内に通過した場合は,観測可能な時間の範囲を用いて算出を行った.

さらに,  $n_{ij}$  台存在するある車種 j の 1 台あたりの速度  $v_{ij}$  は

$$v_{ij} = \frac{\sum_{k_j=1}^{n_{ij}} v_{k_j}}{n_{ij}} \tag{3}$$

と書ける. ただし  $k_i$  は車種 j の各車両の番号である.

この  $v_{ij}$  を車種 j の全車両に渡って加算し車種 j の  $PCU_j$  をかけると,仮想的な乗用車に換算した上での速度の和が車種 j に対して得られる.この値を全車種  $j=\{\mathrm{m,r,c,h}\}$  に渡って加え,領域内車両の全 PCU で除することで,その Frame における交通をすべて同じ速度で走行する乗用車であると見なした際に,仮想的な乗用車 1 台がもつ仮想的な速度  $V_i$  が算出できる.具体的には,まずある Frame i の領域全体の速度の総和  $v_{i\mathrm{all}}$  は,式 4 と表すことができる.

$$v_{i_{\text{all}}} = \sum_{j=\text{m,r,c,h}} (PCU_{ij} \cdot n_{ij} \cdot v_{ij})$$
(4)

次に、Frame i の領域全体の PCU の総和  $PCU_{i_{all}}$  は、式 5 と表せる.

$$PCU_{i_{\text{all}}} = \sum_{j=\text{m,r,c,h}} (n_{ij} \cdot PCU_{ij})$$
 (5)

従って、Frame i において、1PCU の車両が持つ正規化された速度  $V_i$  は、

$$\frac{v_{i_{\text{all}}}}{PCU_{i_{\text{all}}}} = \frac{\sum_{j=\text{m,r,c,h}} (PCU_{ij} \cdot n_{ij} \cdot v_{ij})}{\sum_{j=\text{m,r,c,h}} (n_{ij} \cdot PCU_{ij})} = \frac{\sum_{j=\text{m,r,c,h}} PCU_{ij} \sum_{k_j=1}^{n_{ij}} v_{k_j}}{\sum_{j=\text{m,r,c,h}} (n_{ij} \cdot PCU_{ij})} := V_i \quad (6)$$

と定義することができる. これにより, Frame i の交通は仮想的に,  $V_i$  で走行する乗用車が  $\sum_{j=\mathrm{m,r,c,h}} n_{ij} PCU_{ij}$  いる交通と見なすことができる. ここから, 交通量は  $\rho_i \cdot V_i$  とした.

#### 2.2.2 基本図による交通特性の比較方法

交通工学分野では、2.2.1 項での指標を基に、交通特性を可視化する手法が良く用いられる。特に、縦軸を交通量、横軸を密度(混雑度)とした"基本図"(図 4) は、最大交通量や様々な混雑度で得られる交通量、渋滞が始まる混雑度などを観測、比較することができるため頻繁に用いられる。

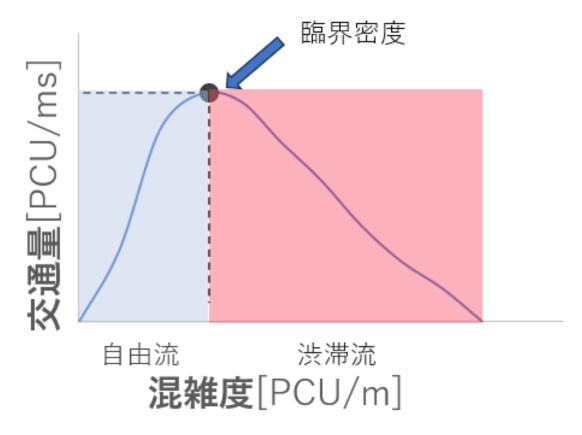


図 4: 基本図のイメージ図

本研究では、1.5 節での仮説を検証するため、PCU に基づく基本図を用いながら、車種の偏在が、交通特性に与える影響を調査する. 具体的には、交通における特定の1車種の占有率を変数とし、その変数に関する閾値を設けた. そして、設定した閾値以上の交通データと閾値未満の交通データとを、基本図上で色分けした. 例えば、二輪車の占有率に関して、閾値を30%と設定する際には、二輪車の占有率が30%以上の交通データを基本図上に赤色でプロットし、30%未満の交通データを青色でプロットする(図5).

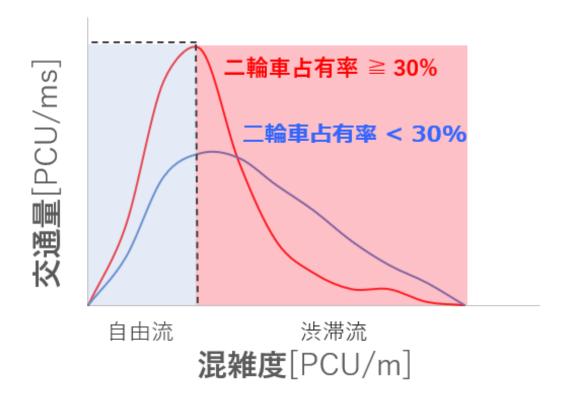


図 5: 二輪車の閾値 30% でデータを分離した基本図のイメージ

## 2.3 PCU 推定方法

本研究は3つのPCU 推定法を用いて基本図を得ることで,解析の普遍性を高める. 具体的には, Indian Highway Capacity Manual[18] に記載された推定法 (以下 Indian HCM), 重回帰分析によるPCU 推定法 (以下 Multiple Linear Regression)[16], 各車種の投影面積と速度に着目して推定する方法(以下 speed based)[16] を用いる. 本節では各推定法を紹介する.

#### 2.3.1 Indian Highway Capacity Manual に基づく PCU 推定

Indian HCM は, ある車種が交通に含まれる占有率 x% から, PCU 値 y [PCU] を内挿によって求める推定法である.

内挿を求めるにあたって、用いられるパラメータを表 2 に示す [18].  $x_1$  は、各車種が交通で観測されるであろう占有率の下限値であり、 $x_2$  は上限値である。また、 $y_1$  は各車種の

占有率が  $x_1$ % であった際の PCU 推定値を指し,  $y_2$  は各車種の占有率が  $x_2$ % であった際の PCU 推定値を指す. 本研究で分類する車種  $\{m, r, c, h\}$  はそれぞれ表 2 中の, 二輪車 (TW), オートリクシャ(Auto), 乗用車(SC), トラック(TAT)として扱った.

Vehicle Type	$y_1$	$y_2$	$x_1$	$x_2$
Standard Car(SC)	1.0	1.0	6	30
$\mathrm{Big}\;\mathrm{Car}(\mathrm{BC})$	1.1	2.5	5	16
Motorized Two Wheeler(TW)	0.2	0.5	17	64
Auto rikishaw(Auto)	1.1	2.0	5	19
$\mathrm{Bus}(\mathrm{B})$	2.8	4.8	5	10
${\bf Light\ Commercial\ Vehicle(LCV)}$	2.0	5.0	2	18
${\it Two / Three \ Axle \ Truck(TAT)}$	3.0	5.5	5	20
Multi Axle Trucks / Vehicle(MAT)		14.6	2	11
$Tractor\ Trailer(TT)$		8.0	2	5

表 2: Indian HCM で使用したパラメータ [18]

1Frame ごとの各車種の占有率 x% に基づいて内挿によって PCU を推定する式を式 7 に示す.

$$y = y_1 + \left(\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}\right) \times (x - x_1) \tag{7}$$

ただし,

y: 推定される, ある車種の PCU 値

 $x_1$ : 交通上でのある車種の占有率の下限値  $x_2$ : 交通上でのある車種の占有率の上限値

 $y_1$ : ある車種の PCU 値の下限値  $y_2$ : ある車種の PCU 値の上限値

なお, 占有率が内挿の範囲を下回った場合は  $y_1$  をそのフレームにおける車種の PCU 推定値とした. また, 内挿の範囲を上回った場合は  $y_2$  をそのフレームにおける車種の PCU 推定値とした.

#### 2.3.2 重回帰分析による PCU 推定

Multiple Linear Regression は、重回帰分析によって得た係数から PCU 値を求める推定法である [16]. 具体的には、まず乗用車の平均速度と各車種の交通量から各車種に対する回帰係数  $a_i$  を式 8 によって求める.

$$V_{\rm c} = a_0 + \sum_{j=\rm m,r,c,h} a_j Q_j \tag{8}$$

ただし,

 $V_{\rm c}$ : 乗用車の平均速度  $[{
m km/h}]$   $Q_j$ : 車種 j の交通量  $[{
m 6}/{
m h}]$ 

j: 車種  $a_0:$  切片

*a*<sub>j</sub>:各車種に対する回帰係数

本手法の考え方を概説する.一般に交通は,交通量の増加に伴って,速度が低下する. $a_j$ の大きさは車種 j の車両が交通中の乗用車の速度をどの程度減少させるのに寄与しているかを意味している.その  $a_j$  と  $a_0$  を回帰によって推定するが,係数  $a_j$  は負の値になると想定されることに注意されたい.また, $a_j$  の大きさが大きいほど,車種 j の交通流に与える影響が大きいことを示す.ここから,車種 j の PCU 推定値  $PCU_j$  を,式 9 によって推定する.

$$PCU_j = \frac{a_j}{a_c} \tag{9}$$

本手法では,着目している Frame における乗用車の平均速度を求める必要がある.本論 文では,着目している Frame の前後 16.5 秒に設定した計測時間内に,観測領域を通過し た乗用車に対して平均速度を求めた.

具体的な計算方法は以下の通りである。まず通過した乗用車 1 台ごとに、計測時間内の平均速度を求める。1Frame 毎の速度を足し上げ、観測された Frame 数で除することで 1 台ごとの平均速度を求めた。この平均速度が、計測時間内に通過した乗用車の台数分計算できるので、それらを足し合わせ、通過した乗用車の数で除することで、計測時間内の全乗用車の平均速度を得る。この値を着目 Frame の乗用車の速度とした。なお Frame 間は 33ms なので、1 時間当たりの平均速度に変換するため、この値をさらに 60000 倍した値を着目 Frame の乗用車の平均速度とした。

また, 観測範囲を 33 秒以内に通過した場合および着目している Frame の 16.5 秒以内に観測領域に入ってきた場合は, 観測可能な時間の範囲を用いて算出を行った.

次に、それぞれの車種の交通量については、着目している Frame の前後 16.5 秒で観測 領域を通過した車両の台数を 1 ms あたりに除した値を交通量とした。この値を 60000 倍 することで 1 時間当たりの交通量が得られる。上記の結果を基に、Scikit-learn のライブ ラリにある線形重回帰モデルを用いて、重回帰分析を行い、係数を得た。なお、Scikit-learn の線形重回帰モデルでは、最小二乗法によって回帰係数が算出される [19].

ここで、回帰分析には交通量と速度を用いるため、交通状態(速度・密度)によって回帰係数が異なる可能性が考えられた。そこで本研究では交通状態を [12] に基づいて以下の 4 状態に分け、それぞれの状態のデータを分けて回帰分析を行った。

All flow (AF):観測領域すべてで車両がスムーズに流れている

Downstream jammed (DJ): 観測領域の下流側から車両が詰まってきている

All jammed (AJ): 観測領域全ての車両が詰まってしまっている

Other (OT): それ以外(主に下流側から流れ始めている)

#### 2.3.3 車両の投影面積と速度による PCU 推定

PCU 推定法 (Speed Based) は,各車種の投影面積と速度に着目して PCU を推定する方法である [16]. 推定式を式 10 に示す.

$$PCU_j = \frac{V_c/V_j}{A_c/A_j} \tag{10}$$

ただし,

 $V_i, V_{\rm c} =$  車種 j 及び乗用車の平均速度

 $A_i, A_c =$  道路における車種 j 及び乗用車の投影面積

である. 式 10 の分母は, 交通上における, 乗用車の投影面積の平均値と, 推定したい車種の投影面積の平均の比率である. 分子は乗用車の平均速度と, 推定したい車種の平均速度の比率である. この推定法は, 式 1 に示した, 車両の時間間隔(headway time)を用いた手法と類似している. つまり, 道路上で占有する領域が大きく, 速度が遅いほど PCU は大きく計算される.

投影面積を求めるにあたり、ビデオ画像座標系の各車種の車長は、ホモグラフィー行列を用いて実世界座標に変換した。また各車種の幅は、乗用車は  $1.7\,\mathrm{m}$ 、大型車は  $2.5\,\mathrm{m}$ 、二輪車は  $0.8\,\mathrm{m}$ 、そしてオートリキシャは  $1.3\,\mathrm{m}$  と一律に設定した  $[20,\,21,\,22,\,23]$ .観測ビデオは、道路を斜め上から撮影しており、車幅が正確にわからないためである.

ある Frame における各車種の投影面積は、Frame のなかに含まれる各車、種の投影面積の総和から、1 台当たりの投影面積を算出し、その値を各車種の投影面積とした.

各車種の平均速度は、2.3.2 項に記した、着目 Frame の前後 16.5 秒の速度データを用いる手法を転用した。2.3.2 項では乗用車の平均速度を求めたが、車種を変化させて同じ操作を行い、各車種の平均速度を求めた。

## 2.4 解析結果と考察

## 2.4.1 Indian HCM による PCU 推定法を用いた場合

図 6 各図は Indian HCM によって PCU を推定したうえで描いた基本図である. 縦軸は交通量, 横軸は密度である. 赤点がある車種の占有率が閾値以上である交通データを, 青点が閾値未満であるデータを示している. 閾値を設けた車種を図 6 の左の縦軸に, 設けた 閾値を下の横軸に記した. 閾値は割合で記しており, 1 を最大とする無次元数である. 以降の項でも同様の図を使用する.

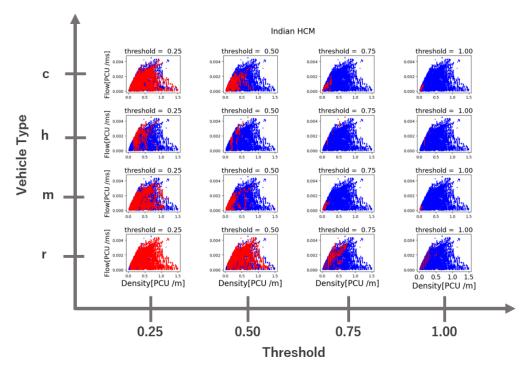


図 6: 各車種占有率の閾値でデータを分離し描いた基本図. Indian HCM で PCU を推定した.

各車種について、それぞれ以下のことが明らかとなった.

#### ・乗用車

交通上での乗用車の占有率が増加するにつれ、密度と交通量の関係性が左下に遷移していった。ここから、乗用車が多数を占める交通は自由流相(基本図が右肩上がりになっている領域)になる傾向が強く、かつ密度の低い交通に現れると言える。またその自由流相の中において、同密度で見た場合、乗用車の占有率が高い交通のほうが、占有率が低い交通に比べ交通量が高い傾向が見られる。

#### • 大型車

交通上での大型車の占有率が増加するにつれ、密度と交通量の関係性が左側に遷移していった。ここから、大型車が多い交通は乗用車同様自由流相に集まる傾向が見られる。しかしながら、乗用車とは異なり、密度がある程度高く、交通量が多い領域までデータが見られる。占有率が高い方が、自由流相内の同密度で高い交通量を呈するのは乗用車と同じである。

#### • 二輪車

乗用車と同様占有率が増加するにつれ、密度と交通量の関係性が左下に遷移していった. これらから、二輪車が多い交通は自由流相で、かつ密度の低い交通に集まると言える.また、占有率が高い方が、自由流相内の同密度で高い交通量を呈するのは乗用車と同じである.

#### ・オートリキシャ

大型車の傾向と類似し、密度に関わらず自由流相にデータが集まる傾向が見られた。また その自由流相の中において、同密度で見た場合、大型車同様、占有率が高い方が、交通量が 大きい。

これらの結果をまとめると,まず,自由流相の特に交通量の高い交通は,特定の車種の 占有率が高い交通であることが多いと言える.ここから,ある車種の割合が増えることで 交通量が上昇する可能性,および自由流相で交通量の高い(速度の高い)交通では,単一車 種による交通流しか存在しえない可能性が示唆される.

また,占有率を上げた際の交通特性変化は乗用車と二輪車,大型車とオートリキシャで, それぞれ類似していた.乗用車と二輪車の占有率が高い自由流相の交通は,密度の低い交 通に限られた.これはまず,乗用車もしくは二輪車ばかりの交通は,密度の低い交通でしか 実現しない可能性を示唆する.一方で,そのような交通は密度を下げる効果がある可能性 も考えられる.また,乗用車と二輪車の占有率が高い交通であれば,他の同密度の交通に比 べ交通量が高い傾向が見られた.

大型車とオートリキシャの占有率が高い交通は自由流相における, ある程度密度が高い 交通にも見られた. 大型車やオートリキシャの高い占有率が, 自由流相の速度を向上させ る可能性が考えられる.一方で、大型車やオートリキシャの集まりが、高い交通量でしか存在しえない可能性も考えられる.

#### 2.4.2 重回帰分析による PCU 推定法を用いた場合

図 7 は Multiple Linear Regression によって得た基本図で, 閾値を増加させていった様子を示している.

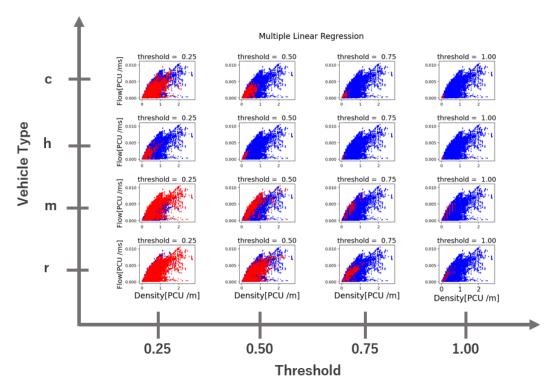


図 7: 各車種占有率の閾値でデータを分離し描いた基本図. Multiple Linear Regression で PCU を推定した.

各車種について、それぞれ以下のことが明らかとなった.

#### ・乗用車

交通上での乗用車の占有率が増加するにつれ、密度と交通量の関係性が左下に遷移していった。乗用車が多い交通は自由流相かつ低密度になる傾向が強いことを示している。乗 用車の占有率と交通量の関連は見られなかった。

#### • 大型車

交通上での交通上での大型車の占有率が増加するにつれ,乗用車と同様に,密度と交通量の関係性が左下側に遷移していった.大型車が多い交通は自由流相かつ低密度になる傾向

が強いことを示している。またその自由流相の中において,同密度で見た場合,大型車の占有率が高い交通のほうが交通量が高い場合が多いことが明らかとなった.

#### 二輪車

交通上での二輪車の占有率が増加するにつれ、密度と交通量の関係性が左側に遷移していった.二輪車が多い交通が自由流相の様々な密度をとり得、同密度で見ても、交通量が高い場合が多い.

#### ・オートリキシャ

交通上でのオートリキシャの占有率が増加するにつれ、二輪車同様に密度と交通量の関係性が左側に遷移していった。オートリキシャが多い交通は自由流相になり、特に高い交通量を実現することがわかる.

以上をまとめると、Multiple Linear Regression による基本図において各車種の占有率を上げると、いずれの車種でも自由流相にデータが集まる傾向が見られた.

特に、二輪車とオートリキシャの占有率が高い交通は自由流相で、ある程度密度が高い 交通にも見られることが分かった。二輪車とオートリキシャの高い占有率が、自由流相の 速度を向上させる可能性が考えられる。一方で二輪車やオートリキシャの集まりが、高い 交通量でしか存在しえない可能性も考えられる。

一方, 乗用車と大型車が高い占有率をもつ交通は, 自由流の中でも低い密度にしか見られなかった. 乗用車もしくは大型車ばかりの交通は, 密度の低い交通でしか実現しない可能性がある. 一方で, そのような交通は密度を下げる効果がある可能性も考えられる.

#### 2.4.3 投影面積と速度に基づく PCU 推定法を用いた場合

図 8 は Speed Based によって PCU を推定したうえで描いた基本図である.

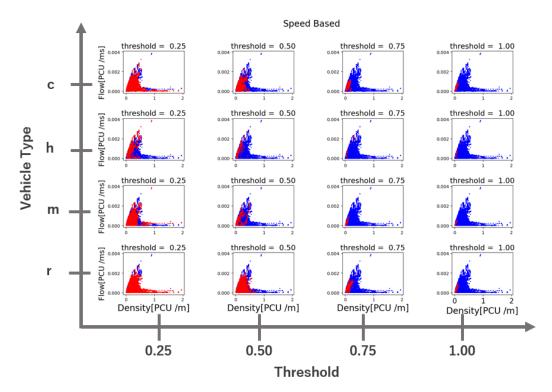


図 8: 各車種占有率の閾値でデータを分離し描いた基本図. Speed based で PCU を推定した.

各車種について、それぞれ以下のことが明らかとなった.

#### ・乗用車

交通上での乗用車の占有率が増加するにつれ、密度と交通量の関係性が左下に遷移していった。乗用車が多い交通は自由流相かつ低密度になる傾向が強いことを示している。またその自由流相の中において、同密度で見た場合、乗用車の占有率が高い交通のほうが、交通量が高い場合が多い。

#### • 大型車

交通上での大型車の占有率が増加するにつれ、密度と交通量の関係性が左側に遷移していった。大型車が多い交通が自由流相の様々な密度をとり得、同密度で見ても、交通量が高い場合が多いといえる。

#### • 二輪車

交通上での二輪車の占有率が増加するにつれ,乗用車同様,密度と交通量の関係性が左下側に遷移していった.二輪車が多い交通は自由流相かつ低密度になる傾向が強いことを示している.またその自由流相の中において,同密度で見た場合,二輪車の占有率が高い交通のほうが,交通量が高い場合が多い.

#### ・オートリキシャ

交通上でのオートリキシャの占有率が増加するにつれ,乗用車と二輪車同様,密度と交通量の関係性が左下側に遷移していった。オートリキシャが多い交通は自由流相かつ低密度になる傾向が強いことを示している。またその自由流相の中において,同密度で見た場合,乗用車の占有率が高い交通のほうが,交通量が高い場合が多い

以上の結果より、Speed Based による基本図において、各車種の占有率を上げていった時に、基本図の遷移の仕方が大型車以外の車種で類似した傾向があること明らかとなった。また、各車種の占有率を上げると、いずれの車種でも自由流相にデータが集まる傾向が見られた。

特に、大型車の占有率が高い交通は自由流相で、ある程度密度が高い交通にも見られることが分かった。大型車の高い占有率が、自由流相の速度を向上させる可能性が考えられる。一方で大型車の集まりが、高い交通量でしか存在しえない可能性も考えられる。

一方, 二輪車・オートリキシャ・乗用車が高い占有率をもつ交通は, 自由流の中でも低い密度にしか見られなかった. これらの交通は, 密度の低い交通でしか実現しない可能性がある. 一方で, そのような交通は密度を下げる効果がある可能性も考えられる.

## 2.5 各 PCU 推定法による結果を踏まえた考察

2.4.1 項から 2.4.3 項の結果を表 3 から表 5 にまとめる.

Vehicle Type	Indian HCM	Regression	Speed Based
c	0	0	0
h		0	0
m		0	0
r	0	0	0

表 3: 自由流相にデータが集まった PCU 推定法と車種

Vehicle Type	Indian HCM	Regression	Speed Based
c	-	-	-
h	0	_	0
m	-	0	-
r	0	0	-

表 4: 自由流相で高い交通量までデータが現れた PCU 推定法と車種

Vehicle Type	Indian HCM	Regression	Speed Based
c	0	-	0
h	0	0	0
m	0	0	0
r	0		0

表 5: 自由流相で, 同密度交通よりも高い交通量を持ったデータが集まった PCU 推定法と 車種

Vehicle Type	Indian HCM	Regression	Speed Based
С	0	0	0
h	-	0	-
m	0	-	0
r	-	-	0

表 6: 自由流相で低い交通量までしかデータが現れなかった PCU 推定法と車種

まず、表 3 から、どの推定法であっても、交通における各車種の占有率が高くなるにつれて、その交通が自由流相に収束することが明らかとなった。また、各車種の占有率が高い交通は、同密度での他の交通に比べ交通量が高い傾向もおおむね表 5 から明らかである。

特に、表 4 からは、大型車とオートリキシャの多い交通が、自由流相の高い交通量まで、他の交通に比べて高い交通量を維持する傾向が読める。これらの車種が集まることで、自由流相の速度を向上させる可能性が考えられる一方で、大型車やオートリキシャの集まりが、高い交通量でしか存在できない可能性も考えられる。

反対に、表 6 からは、乗用車と二輪車の多い交通が、自由流相でも低い交通量しか取らない傾向が読み取れる.これらが集まった交通が、密度の低い交通でしか実現しない可能性があるとともに、そのような交通が密度を下げる効果をもつ可能性も考えられる.

いずれにせよ,ある車種の占有率の上昇が,自由流相の中でも比較的高い交通量を取る現象と関連することは,本節の解析から明らかである.ここで,交通での占有率が上がる一因として,一車種による "群れ [12]" が考えられる.ここで言う "群れ"とは,交通内で近接しながら同じ速度で走行し続ける自己組織化した車群のことを指す.以下 3 章では,車群の自己組織化が交通量を向上させる可能性を探るため,車の "群れ"が交通特性に及ぼす影響を調査する.

## 3 車両の群れが交通特性に及ぼす影響

## 3.1 車両の群れに関する先行研究

長濱らの研究 [12] により、二次元混合交通において車両の群れが交通上に確かに存在することが明らかとなった。車両の群れは、交通内で近接しながら同じ速度で走行し続ける自己組織化しやすい車群であるため、群れの存在は、交通中に車種の混合割合が不均一な箇所が存在していることを示している。また、長濱らの研究 [24] により、二次元混合交通において、前走車-後続車のペアとして自己組織化しやすい車種の組合せが存在することを明らかにした。統計的期待値及び検定を用いることで長濱らは、特に交通状況 AF において、二輪車・オートリキシャに自己組織化しやすい傾向を見い出した。これはすなわち、車両の群れと特定車種の占有率の関連を示唆するものである。

## 3.2 群衆心理に関する先行論文及び研究

土屋の論文 [25] によれば、Park らは「群衆と公衆」論の中で、群集心理学では、群集意識の発達によって、群集を構成する全ての諸個人に共通な運動衝撃が高揚される [26]、としている.

従って, 交通上において自己組織化された群れ内での運転挙動が高揚し, 系としての効率が上昇する可能性がある.

## 3.3 本章の目的

長濱らの研究によって,交通上において自己組織化した群れが存在することが明らかになっており,また群れと占有率上昇との関連もあることが想定される.また,自己組織化した場合に系の効率が上昇する可能性も指摘されている.

しかしながら、2.5 節で見られた、ある車種の占有率の上昇と、自由流相の高い交通量を取る現象が、自己組織化に起因するものかどうかは、いまだ不明である。そこで、本章では、交通に群れが占める割合の大小で基本図を比較することで、群れが交通特性に対しての影響を及ぼすかを解明する。加えて、特に群れ内の車種の混合具合に関しての解析を通して、同一車種の自己組織化が交通特性に与える影響を明らかにする。

## 3.4 車両の群れの検出方法

本研究における群れの検出方法は, 先行研究 [12] の手法を用いる. 以下 3.4.1 項から 3.4.3 項にかけて, 検出方法を紹介する.

#### 3.4.1 追従ネットワークの構築方法

交通流は、前方を走る車両の加減速が後方に伝わりながら流れる. 特に位置が近い車両 同士は加減速を伝え合う関係になりやすい. このような関係を追従関係と呼び、特に加減 速を伝える側の前方を走行する車両をリーダー、リーダーの加減速を受けて自車両も加減 速する車両をフォロワーと呼ぶ.

車線に基づく交通の場合,追従関係は一般に,車線内で前後ペアになっている車両間に存在すると定義される.しかし二次元混合交通の場合,車線がないため,ある車両から斜め前方に複数車両が存在しうる.そのため追従関係が一車両対多車両に結ばれることも想定され,追従関係の推定手法は確立していない.

先行研究 [12] は、他の先行研究に基づいて、ボロノイ分割と車両間の横方向の距離を組み合わせた方法で追従関係を推定した。まずボロノイ分割は、歩行者流において、歩行者間で行動の影響を及ぼすか否かを推定する手法として用いられる手法である。しかしながら、自動車流は歩行者流に比べ道路方向への方向性が強く、車両の慣性も大きい。つまりある車両から見て、道路横方向の距離が遠い車両は、例え縦方向の位置が近くても加減速の影響が小さくなり追従関係があるとは言えなくなる。そこで、長濱らは、KanagarajとTreiber[27]の横方向の距離を鑑みる手法をボロノイ分割による関係の推定に組合せ、追従関係を推定した(図 9)。具体的には、2 つの車両が、ボロノイセルの境界を共有し、かつ両車両を隔てる横方向の距離が、ある閾値以内であれば、これらの車両は、追従関係にあるした。また、2 つの車両のうち、道路縦方向に前走している車両をリーダー、後続の車両をフォロワーとした。

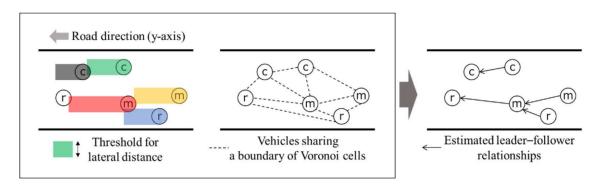


図 9: 追従ネットワーク構築推定法

#### 3.4.2 出現頻度と時間を考慮した頻出サブネットワークの抽出方法

一般に, グラフネットワークにおいてひとつの大きなグラフ中に頻出するサブグラフを発見することをグラフマイニングと呼び, 生物情報学や化学情報学のような分野で重要な技術である [28]. これに加えて群れの検出では, あらゆる時刻を通して追従ネットワーク中に頻出するサブグラフを抽出する必要がある. そこで先行研究 [12] では, まずあるFrame における追従データから頻出サブグラフを既存の手法で抽出し, 各 Frame で抽出されたサブグラフが他の Frame に渡ってどの位長時間検出されたかによって, 全時間に渡る追従ネットワークを抽出した.

まず, ある Frame の追従ネットワークから頻出サブネットワークを抽出方法を述べる. 頻出するサブネットワークを識別するにあたり, 同型サブネットワークを検出する必要がある, つまり, 部分グラフ同型グラフマイニング問題を繰り返し解かなければならない. 部分グラフ同型問題は NP 完全問題として知られており, 解決するためにかなりの時間を必要とする. 長濱ら [12] は, 抽出時間を減らすために, ヒューリスティックな手法を採用した.

GBI 法 [29] は、特定のネットワーク内で頻繁に観測されるノードペアを抽出するヒューリスティック手法の一種ある(図 10 左).GBI 法では頻出しているペアを「チャンクノード」とし、それらを新しいノード ID (たとえば、図 10 の「H」) で表す.この繰り返しによって、頻出ペアがチャンクノードに集約された単純なネットワークが得られる.しかし、この GBI 手法で抽出されるチャンクノードには、元のノードの内部構造が保存されていない.つまり頻繁に出現したサブグラフの構造を記憶できない.これらの問題を回避するために、Cl-GBI 法 [30] では「ビーム探索」[31] と「擬似ノード」という概念が導入された.Cl-GBI 法では、図 10 の右側に示すように、頻出ペアが集約されていくチャン

クノードの内部構造を保存することが可能である. 長濱ら [12] は, Cl-GBI 法を用いて, 各 Frame における頻出サブネットワークをまずは抽出した.

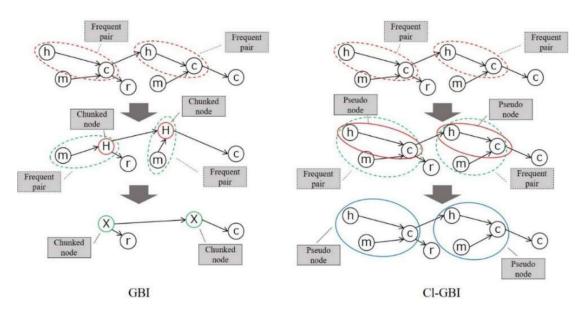


図 10: GBI 法 (左) と CI-GBI 法 (右) の概念図

続いて CI-GBI 法で抽出された各 Frame の頻出サブネットが,全ての観測時間に渡って頻繁に観測されたか評価する必要がある.そこで長濱ら [12] はある抽出されたサブネットワークが長く存在し,また多く存在すれば,そのサブネットワークに観測者が遭遇する頻度は増すと考えた.そこで,抽出されたサブネットワークそれぞれに対して,"FT 値(頻度×時間)" という評価値を導入した.図 11 に FT 値の計算手順の概要を記載した.ある追従ネットワークが交通において,10 秒間 (つまり  $\Delta t=10$ s) 観測されたと想定する.その後二輪車が乗用車を追い越したことによってネットワーク構造が変化したと仮定し,新しいネットワークが  $\Delta t=5$ s 維持されたとする.前者のネットワークにおいては,CI-GBI 法は頻度 (F) が共に 2 である  $\{c \to c\}$  と  $\{m \to c\}$  のペアを検出する.ここで,中括弧は車両タイプのセットを示している."→"の左側がフォロワーを指し,右側がリーダーを指す.次の追従ネットワークでは,CI-GBI 法は  $\{c \to m\}$  , $\{c \to c\}$  そして $\{m \to c\}$  を検出する.F はそれぞれ  $\{c\}$  に記従ネットワークの FT 値が次の式  $\{c\}$  に追従ネットワークの持続時間  $\{c\}$  をかけ合わせることで,各サブネットワークの FT 値が次の式  $\{c\}$  に通じえまれる.

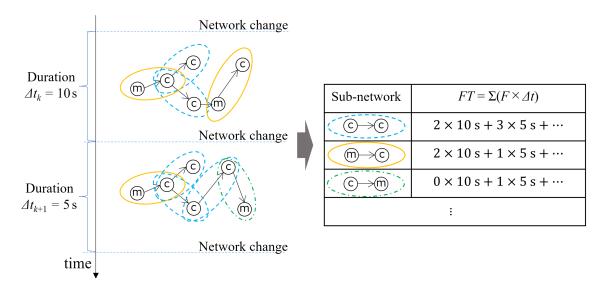


図 11: FT の計算手順方法

$$FT = \sum_{k=0}^{k_{\text{end}}} F_k \times \Delta t_k \tag{11}$$

なお, k は追従ネットワークが組み変わるたびにインクリメントされる index である.

#### 3.4.3 ポアソン分布による群れの検出

それぞれのサブネットワークの FT 値によって、観測者がそのサブネットワークを観測する頻度が表される。しかし、FT 値の大きいあるサブネットワークがに含まれる車種の車両が"追従ネットワークを形成し維持しやすい車群"すなわち群れであるということを必ずしも示すわけではない。例えば、90%が車で構成される交通状況では、たとえ、二輪車が群れを成す傾向を持っていたとしても、二輪車のみで構成されるサブネットワークはほとんど検出されず FT 値が低くなる。従って、群れであるという傾向は、FT 値を各車種の車両数とネットワーク構造から正規化することによって明らかになる。そこで、長濱ら [12] は、観測から得られた各類出サブネットワークの発生確率を「不偏ネットワーク(Unbiased network、UN)」と比較した。UN とは、各車種の車両数は観測された交通と同一であるが、群れる傾向が取り除かれた架空の追従ネットワークである。観測から得られた頻出サブネットワークの発生確率が、UN 上で現れる頻出サブネットワークの発生確率より有意に大きければ、その頻出サブネットワークは、各車種の車両数を鑑みても、明らかに頻出している、つまり群れであるといえる。その意味で長濱ら [12] はこの群れを"Frequent subnetwork in standardized traffc (FSST)"と呼んでいる。

図 12 に UN の概念を示す.まず観測された追従ネットワークから,"撹拌ネットワーク"を多数( $J_{\rm all}$  個)生成する.撹拌ネットワークとは,各車種の台数と,ネットワークのエッジ構造が観測されたネットワークと同じで,ノードに割り当てられた車種のみが変更されたネットワークである.つまり,ノードがランダムに撹拌され入れ替わったネットワークである.続いて,これら多数の撹拌ネットワークがもつ特徴量を平均したものを,UN の特徴量とみなす.例えば,UN における二輪車の入次数は,各攪拌ネットワークにおいて二輪車がもつ入次数の平均値である.攪拌ネットワークはそれぞれの車種の車両数とネットワーク構造を維持しつつ,ランダムにノードを入れ替えたものである.従って,撹拌ネットワークの特徴量を平均した特徴量は各車種の群れる傾向を反映するものではなく,車両数とネットワークの構造のみを反映したものだと言える.つまり,各撹拌ネットワークで得られるあるサブネットワークの FT 値の平均値である.UN におけるあるサブネットワークの FT 値の大小は,車両数とネットワーク構造のみから現れるものであり,それよりも観測ネットワークでの FT 値が明らかに大きければ,それは各車両が群れる傾向があったと言える.

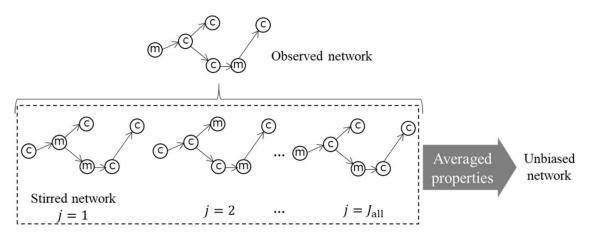


図 12: 観測, 攪拌, UN のネットワーク間の関係性

長濱ら [12] は FT 値を統計的に比較するために、単位時間当たりの FT 値、すなわち単位時間あたりの抽出された頻出サブネットワークの平均出現回数を導入した。これによって、単位時間中にそのサブネットワークが観測される回数を示すポアソン分布を得ることができる。あるサブネットワーク i の FT 値を  $FT_i$  と定義し、単位時間あたりの i の平均

出現回数を $\lambda_i$ と定義すると

$$\lambda_i = \frac{FT_i}{T_{\text{end}}} = \frac{1}{T_{\text{end}}} \sum_{k=0}^{k_{\text{end}}} F_k \times \Delta t_k$$
 (12)

と書ける.

ただし、 $T_{\rm end}$  は全観測時間である.観測から得られた  $\lambda_i$  を  $\lambda_i^{\rm O}$  と定義し、また攪拌ネットワーク j から得られたものを  $\lambda_{ji}^{\rm S}$  と定義した.すべての攪拌ネットワークを通して、単位時間当たりの i の平均出現回数つまり、UN における単位時間当たりの i の平均出現回数は次のように定義される.

$$\lambda_i^{\mathrm{U}} = \frac{1}{J_{\mathrm{all}}} \sum_{j=1}^{J_{\mathrm{all}}} \lambda_{ji}^{\mathrm{S}} \tag{13}$$

以上の操作により、サブネットワークiに対して、 $\lambda_i^{\rm O}$ と  $\lambda_i^{\rm U}$ に基づき、2つのポアソン分布が導出される。これらの分布から、共にサブネットワークiの出現回数の信頼区間を得ることができる。ここで、長濱ら[12]は、 $\lambda_i^{\rm O}$ の信頼区間が $\lambda_i^{\rm U}$ の信頼区間から大きい方に外れたサブネットワークiを、観測されたサブネットワークの中での出現回数確率がi UNよりも明らかに高いとした。具体的には、i0から得たi0分の信頼区間がi0のi1でのi0の95%信頼区間と被らないものは、車数やネットワークによらずに明らかに出現回数確率が高いと結論付け、そのようなサブネットワークをi1のようなサブネットワークをi1のようなサブネットワークをi1のようなサブネットワークをi2のは表した。図i3は、i2の信頼区間は連続的に記載されているが、これはi3のサブネットワークスの種類が観測ネットワークよりも多いことに起因している。i3の信頼区間が赤い楕円で囲われているサブネットワークがi5のようなサブネットワークよりも多いことに起因している。i4のである。

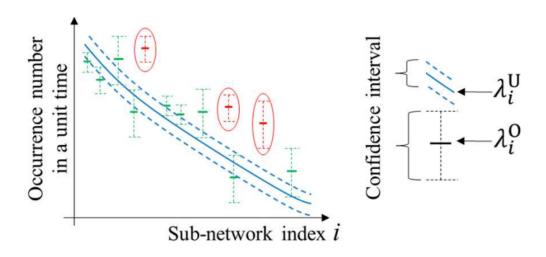


図 13:  $\lambda_i^{\rm O}$  と  $\lambda_i^{\rm U}$  によるポアソン分布の比較概念図

なお、本研究はこの方法で検出される各交通状況(AF, DJ, AJ, OT)の群れの中から特に、 $\lambda_i^{\rm O} \geq 0.5$  /Frame 以上のものを群れとして扱った.長濱ら [12] の手法は真に群れる傾向のある車群を検知できるものの、交通の中で観測される回数が少ないものも選んでしまう.実交通で"頻出する代表的な群れ"の交通特性への影響をより明瞭に測るため、本研究では  $\lambda_i^{\rm O}$  に制限を設けた.

## 3.5 群れの割合の計算方法

長濱らの研究により、既に各交通状況での群れは抽出されている。本研究は、本章で交通中に群れが占める割合が交通特性に与える影響を評価する。そのために群れが交通に占める割合を算出する必要がある。具体的には以下の方法で計算を行った。Frame 毎に隣接行列で保存された追従ネットワークを Python ライブラリである igraph を経て、同ライブラリである networkx 形式にデータ変換を行った。続いて Networkx の機能 [32] を用いて群れと着目している Frame から得られた追従ネットワークの一部が同型写像であるかを調べた。そして、同型写像と認められたサブネットワーク内の車両を着目 Frame において群れに属する車群、認められなかった車両を群れに属さない車群として分離し、車両数に基づいて、ある Frame における群れの割合を求めた。例えばある Frame で 10 台の車両が存在し、内3台が群れに属するならば、群れの割合は 30% である。

## 3.6 群れの混合度と平均速度の算出方法

本研究は本章で、群れの占める割合と共に、群れ内部の車種の混合具合がその群れの交通特性に与える影響を評価する。そのため、群れ内部の車種の混合具合と、群れの速度を定義する必要がある。

まず混合度について、群れ内における車種のばらつき具合を群れの混合度とした. 例えば、群れの中の車種が1車種のみの場合は、ばらつきが小さい、つまり混合度は小さいとし、群れの中の車種が様々である場合は混合度が大きいとして扱った. バラつきを示す指標としてジニ不純度とエントロピーがあるので、本研究はそれらを用いた. それぞれ式 14と式 15 によって計算される.

$$Gini_i = 1 - \sum_{j=1}^4 p_{ij}^2 \tag{14}$$

ただし,

 $Gini_i = 群れ i のジニ不純度$ 

*j*:車種 *j* 

 $p_{ij} =$  群れ i 内での車種 j の占有率

$$Entoropy_i = -\sum_{j=1}^{4} p_{ij} \log_4 p_{ij}$$
(15)

ただし,

Entoropy<sub>i</sub> = 群れ i のエントロピー

*j*: 車種 *j* 

 $p_{ij} =$ 群れ i 内での車種 j の占有率

なお, エントロピーの基底を車種数である 4 にすることで, エントロピーの最大値が 1 となるようにした.

また, 群れの平均速度について, まず Frame i において, ある群れ g に属していた車両の速度和  $v_{ig}$  は

$$v_{ig} = \sum_{k_g = 1}^{k_g = n_{ig}} v_{k_g} \tag{16}$$

と書ける. ただし,  $k_g$  は群れ g に属している各車両の番号であり,  $n_{ig}$  は Frame i で群れ g に属していた車両数である. 例えば, ある着目 Frame において, 群れ g に属していた車両が 3 台いたとするとこの Frame の群れ g の速度和は 3 台の速度の合計となる. なお, 各車両の速度については, 着目している Frame の前後約 1 秒の変位から算出した.

この操作を全観測時間に渡って群れ g が観測されたときに行った. そして全観測時間 で、群れ g に属した車両の速度総和  $v_g$  を、群れ g が観測された各 Frame i で群れ g に属した台数の総和で割った値を式 17 でもとめ、この値を群れの平均速度  $v_g$  とした.

$$v_g = \frac{\sum_{ig=1}^{ig=T_{\text{all}}} v_{ig}}{\sum_{ig=1}^{ig=T_{\text{all}}} n_{ig}}$$
(17)

ただし,

 $T_{\rm all}$ = 全観測時間

 $n_{iq} = \text{Frame } i$  で群れに g に属していた車両数

## 3.7 群れの割合に関する結果と考察

#### 3.7.1 Indian HCM を用いた場合

図 14 は Indian HCM による基本図であり、群れの割合を閾値として 0.25, 0.5, 0.75, 1.0 と変化させたものである。赤の点が閾値以上のデータ点を、青の点が閾値未満のデータ点を示す。図 14 より、Indian HCM による基本図では、閾値を大きな値に設定しないとプロットに差が現れないことがわかる。この結果から、交通における群れが大部分を占めるようになれば、交通特性に影響が現れると言える。

また、群れの割合が高い交通は、自由流相において最も高い交通量ではないが、比較的高い交通量を取っている。一方、最大交通量をとる臨界密度から渋滞流相にかけては、群れの割合が多い交通と少ない交通のプロットが入り混じっている。この結果から、まず自由流相において自己組織化した群れは、ある程度高い交通量、速度をとる一方で、臨界密度以上では、自己組織化している群れとそうでない車両群とで、交通量、速度に大きな差が見られないといえる。

## Indian HCM

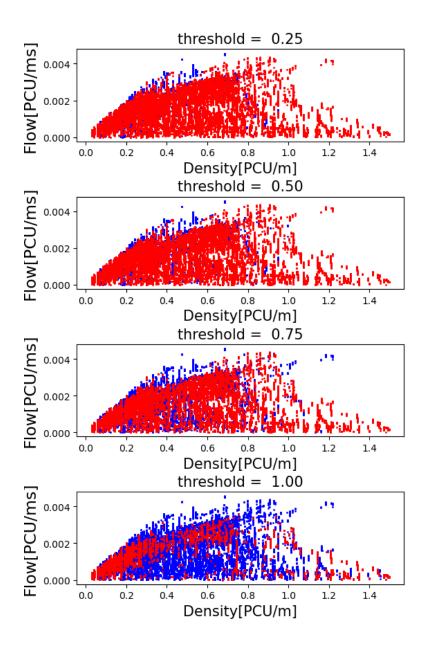


図 14: Indian HCM によって得られた基本図. 群れが占める割合を閾値として変化させた.

### 3.7.2 Multiple Linear Regression での解析結果

図 15 は Multiple Linear Regression による基本図である。3.7.1 項と同様に赤が閾値以上,青が閾値未満のデータ点である。図 15 より,Multiple Linear Regression による基本図では,閾値を大きな値に設定しないとプロットに差が現れないことがわかる。この結果から,交通における群れが大部分を占めるようになれば,交通特性に影響が現れると言える。

また、群れの割合が高い交通は、自由流相において、やはり最大交通量ではないものの比較的高い交通量を取っていると同時に、極端に低い交通量もとっている。自由流相において自己組織化した群れは、高い交通量すなわち速度をとる場合もあれば、低い速度にもなりえた。特に後者の理由が不明であるが、考えられる群れの可能性として、遅い車両に後続車両が阻まれているムービングボトルネック [33] や、OT において渋滞から密度が下がったにもかかわらず発進の遅い群れが挙げられる。

一方,最大交通量をとる臨界密度から渋滞流相にかけては,群れの割合が多い交通と少ない交通のプロットが入り混じっている.この結果から,一方で,臨界密度以上では,自己組織化している群れとそうでない車両とで,速度に大きな差が見られないといえる.

## Multiple Linear Regression

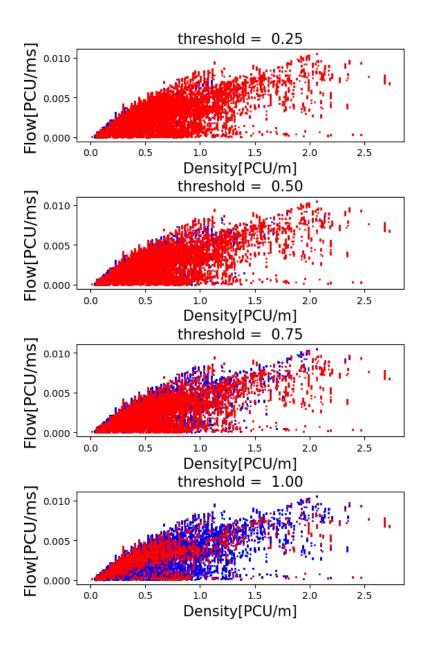


図 15: Multiple Linear Regression によって得られた基本図. 群れが占める割合を閾値として変化させた.

#### 3.7.3 Speed based method での解析結果

図 16 は Speed Based による基本図であり、群れの割合を変数として閾値を変化させたものである。3.7.1 項と同様に赤が閾値以上、青が閾値未満のデータ点である。図 16 より、Speed Based による基本図では、閾値を大きな値に設定しないとプロットに差が現れないことがわかる。この結果から、交通における群れが大部分を占めるようになれば、交通特性に影響が現れると言える。

また、群れの割合が高い交通は、Multiple Linear Regression に基づく 3.7.2 項と同様、自由流相において比較的高い交通量と極端に低い交通が見られた。特に本図 16 では、群れの多い交通が最大交通量を取らず、また臨界密度付近の高い交通量にもそれらのプロットが現れていない傾向がより明瞭に確認できる。

一方,最大交通量をとる臨界密度から渋滞流相にかけても,これまでの PCU 推定法と同様,群れの割合が多い交通と少ない交通の交通量が入り混じっている.

#### Speed Based

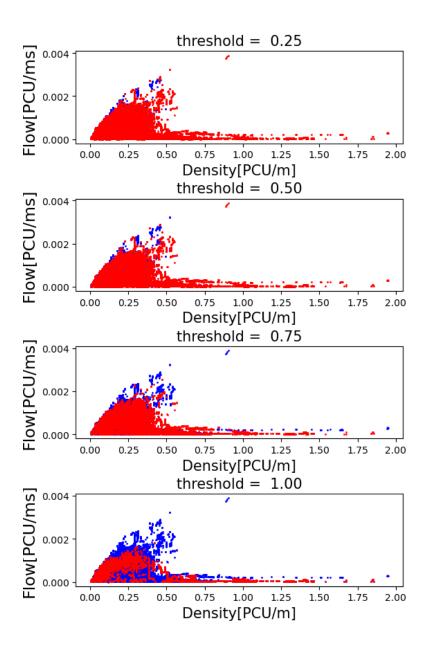


図 16: Speed Based によって得られた基本図. 群れが占める割合を閾値として変化させた.

#### 3.7.4 考察

3つの PCU 推定法を通じ, 以下の傾向が観測された.

- 1. 交通における群れが大部分を占めるようになれば、交通特性に影響が現れる.
- 2. 群れが大部分を占める交通は、他の交通に比べ自由流相の特に密度の低い領域において比較的高い交通量を取る.
- 3. 群れが大部分を占める交通は、自由流相の中程度の密度の領域から臨界密度にかけて、中程度の交通量ないしは、極端に低い交通量をとる.
- 4. 臨界密度付近で特に高い交通量をもつ交通は、群れに属する車両以外も含む交通である.
- 5. 臨界密度以上の高い密度において, 群れが大部分を占める交通は, そうでない交通とで差が見られない.

項目1は、群れの割合が変化するに従い、交通特性が徐々に変化するのではなく、ある割合を超えると特性が変化する、群れの割合の非線形な効果を示している。群れが多数を占めることにより、交通流が何らかの相転移をしている可能性がある。

項目 2 は、自由流相では自己組織化した群れが多くなることで、交通が円滑に流れることを示唆している。これは 3.2 節で述べた先行研究 [26] の知見に沿うものである。なおこの結果を裏返せば、自由流相でも、群れに属さない車両が多く、追従関係が次々と変化するような速度差や追い越しがあれば、交通量と速度が十分に得られない、ということも示唆される。

項目 3 には 2 つの現象が見られる。まず、中程度の交通量を取るという点で、群ればかりではない交通がより高い交通量を実現し、項目 3 にある臨界密度付近の最大交通量を実現しているという現象である。これは、自由流相の低密度領域で交通量を下げたと考えられる追従関係の変化が、密度が高まるにつれて交通量を向上させることもあったことを意味する。ただし、群れ以外の車両を含む交通には、やはり交通量を下げるものもあった。次に、項目 3 は、臨界密度の手前で極端に低い交通量を取る群れの多い交通にも言及している。考えられる群れの可能性として、遅い車両に後続車両が阻まれているムービングボトルネック [33] や、OT において渋滞から密度が下がったにもかかわらず発進の遅い群れが挙げられる。

項目 5 は, 項目 2 とは異なり, 密度が高まり渋滞相に移行する状況での挙動に着目している。そのような状況では, 群れている車両群は追い越しやすり抜けが自由にできない(そのような挙動をする車両群は群れと認識されない). そのため, 群れの中で高い密度で

速度を維持できない車両に速度を揃える必要があり、速度が急激に下がるということも考えられた.しかしそのような現象は見られず、車両が群れに属するか否か、すなわち追い越しやすり抜けの多寡に依らず、交通特性に影響はないと言える.ここから、混合交通をモデルで表現し特性を再現するにあたって、交通が臨界密度を超えるまでは、群れといった各車両の挙動の見える微視的なモデル、例えば追従モデル([34])を用いる必要があり、渋滞相に至ってからは、各車両の挙動は無視したマクロな流体モデル([35])を用いても問題がないことも示唆される.

#### 3.8 群れ内部の混合度と群れの平均速度に関する結果と考察

図 17 は 3.6 節の方法に基づいて算出した群れ毎のジニ不純度と平均速度を, 交通状況毎にプロットしたものである. プロット点の色は, 以下の通り設定した.

- ・AF (赤色): 観測領域すべてで車両がスムーズに流れている
- ・DJ (緑色): 観測領域の下流側から詰まってきている
- ・AJ (橙色): 観測領域全ての車両が詰まってしまっている
- ・OT (青色): それ以外(主に下流側から流れ始めている)

例えば、右上にある 2 つの赤いプロットは、AF において Gini 不純度が 0.5 であった異なる群れの平均速度をそれぞれ表示している.

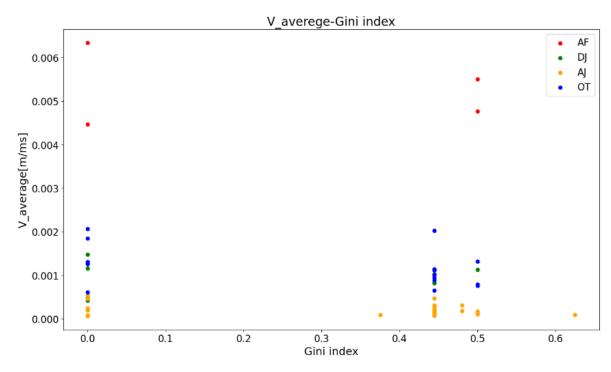


図 17: 群れのジニ不純度と群れの平均速度の関係

さらに、図 17 においての交通状況ごとで、同混合度毎の平均速度を求め、プロットを行った.それにより混合度ごとに 1 つずつプロットされる.例えば図 17 において、AF で Gini 不純度が 0.0 であれば、赤いデータ点が 2 点あるため、これらのデータを平均しプロットした.図 18 から図 21 はそれぞれ交通状況ごとにプロットした図である.これより、それぞれで次のようなことが明らかとなった.

#### • AF

群れの混合度が高まると、平均速度が減少する傾向にある.

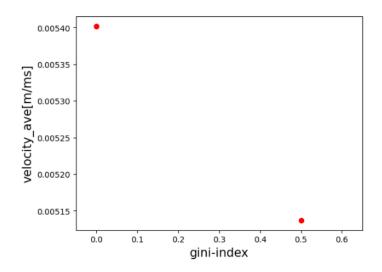


図 18: Gini 不純度と Gini 不純度ごとの群れの平均速度の関係. AF の場合

# ・DJ 群れの混合度が高まると, 平均速度が上昇する傾向にある.

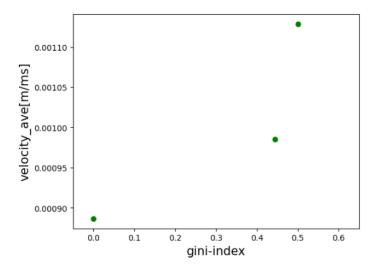


図 19: Gini 不純度と Gini 不純度ごとの群れの平均速度の関係. DJ の場合

# ・AJ 群れの混合度が高まると平均速度が下がる傾向にあるが変化は少ない .

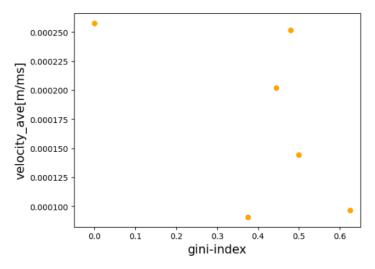


図 20: Gini 不純度と Gini 不純度ごとの群れの平均速度の関係. AJ の場合

#### $\cdot$ OT

群れの混合度が高まると、平均速度が低下する傾向にある.

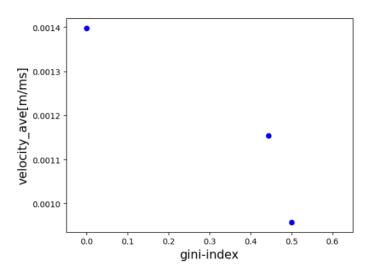


図 21: Gini 不純度と Gini 不純度ごとの群れの平均速度の関係. OT の場合

これらの結果から、交通が渋滞流相にある AJ では、群れの混合度が速度に与える影響が小さいことが見て取れる。3.7.4 項に記した、群れが大部分を占める交通は臨海密度以上の高い密度とそうでない交通との差が見られないことは(項目 5)、車種が単一であることに起因するのではなく、自己組織化した群れが交通を占めていることに自体に起因すると言える。

自由流相と渋滞流相の間で交通が遷移している DJ と OT では, 混合度が速度に与える 影響が比較的強く現れた. 特に, DJ (下流からが渋滞が始まっている) 時は, 混合度が高 い, つまり様々な車種が入り混じった群れのほうが, 平均速度が高い傾向が見られた. 速 度が下がりつつある状況では, 多彩な車種を含む群れの方が, 速度を下げにくいと言える. 群れ内で速度差があるものの, 追従関係を崩さずに走行しているような状況が考えられる が, その理由は明らかではない.

一方, OT (下流から渋滞が解消している) 時は, 混合度の高い群れの方が, 速度が低い傾向が見られた. 速度が回復しつつある状況では, 群れ内の車種が少ない方が, 速度を回復しやすいと言える. 本研究からその理由は明らかではないが, 一因として, 渋滞の下流側に小さく加速度の大きい二輪車が集まり, 混合度の低い群れを形成していた可能性が考えられる. この様な群れが渋滞から抜けていってしまうため, 残された様々な車種が入り混じった混合度が高い群れが, 速度を出せず残ってしまった可能性がある. なお, 3.7.4 項の

項目3で述べた,自由流相中密度領域における極端に速度の低い群れは,この現象に関連すると考えられる. 3.7.4 項では"発進の遅い車群"と"ムービングボトルネック"という可能性を挙げていたが,本節の結果から,速度を出せずに残っている車群の車種が混じっていることがわかった. すなわち OT においては,ある車種がムービングボトルネックを形成することで,本来であれば速度を出せた小さな車種が発進を阻害されている状況がありうると考えられる. ただしその場合,本来発進の遅い車種が集まってできた混合度の低い群れの速度も同様に低いはずであるので,さらなる検討は今後必要である.

交通が自由流相である AF でも、混合度が速度に与える影響が比較的強く現れ、混合度の低い群れの方が、速度が高い傾向が見られた。流動的な状況では、群れ内で車種が少ないほうが、速度を高い状態を維持できているといえる。本研究では明らかになっていないが、類似的な車両特性を持った車両が多い群れは、変則的な挙動を見せる車両が少ない為、安定して走行できるといった可能性が考えられる。

また,図 22 は 3.6 節に基づいて算出をおこなった群れ毎のエントロピーと平均速度を プロットしたものである.色分けについてはジニ不純度のプロットの際と同様にした.

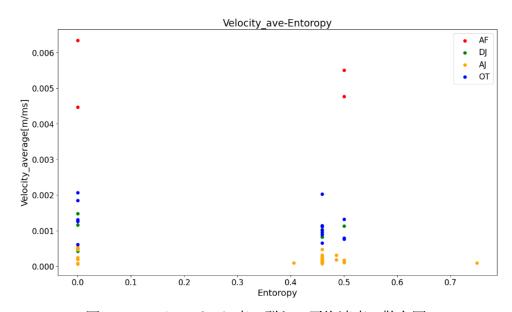


図 22: エントロピーと車の群れの平均速度の散布図

また,ジニ不純度による解析と同様に,交通状況別に,それぞれの混合度についての平均 速度を求めた.

図 23 から図 26 はそれぞれ交通状況ごとにプロットした図である. これより, それぞれで次のようなことが明らかとなった.

# ・AF 群れの混合度が高まると, 平均速度が減少する傾向にある.

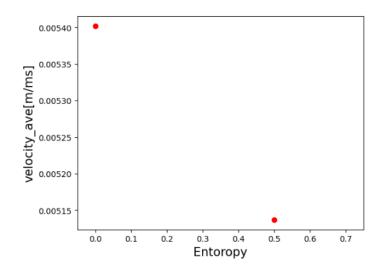


図 23: Entoropy と Entoropy 不純度ごとの群れの平均速度の関係. AF の場合

# ・DJ 群れの混合度が高まると, 平均速度が上昇する傾向にある.

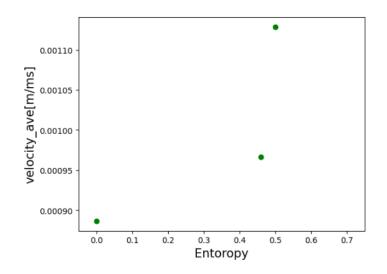


図 24: Entoropy と Entoropy ごとの群れの平均速度の関係. DJ の場合

## ・AJ 群れの混合度が高まると平均速度が下がる傾向にあるが変化は少ない .

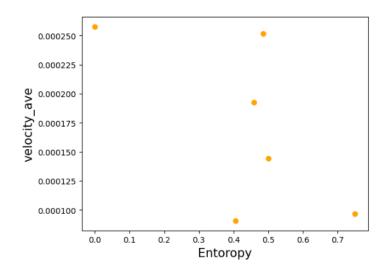


図 25: Entoropy と Entoropy ごとの群れの平均速度の関係. AJ の場合

# ・OT 群れの混合度が高まると、平均速度が低下する傾向にある.

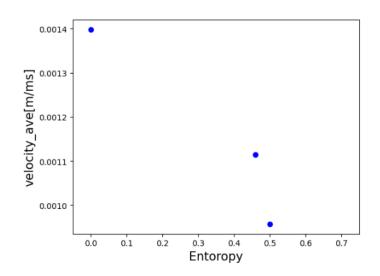


図 26: Entoropy と Entoropy ごとの群れの平均速度の関係. OT の場合

これらから、ジニ不純度による解析と同様の結果が得られた.

#### 3.9 同一車種の群れによる各車種の平均速度に関しての結果

3.8 節の結果の中で、混合率が0、つまり、群れがすべて同一車種である際の各車種の平均速度を求め、それぞれで比較を行った.

次の図 27 は交通状態が AF の結果であり、平均速度は m>c の順であった.

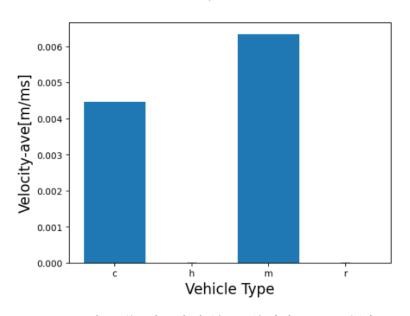


図 27: 車の群れ内の各車種の平均速度. AF の場合

次の図 28 は交通状態が DJ の結果であり、 平均速度は m > r > c の順であった.

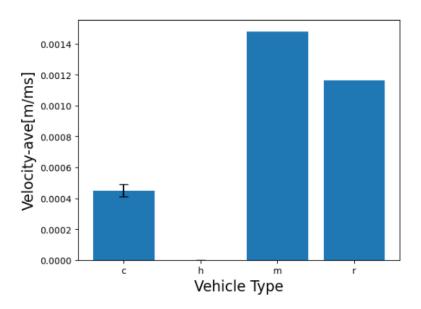


図 28: 車の群れ内の各車種の平均速度. DJ の場合

次の図 29 は交通状態が AJ の結果であり, 平均速度は m>r>c の順であった.

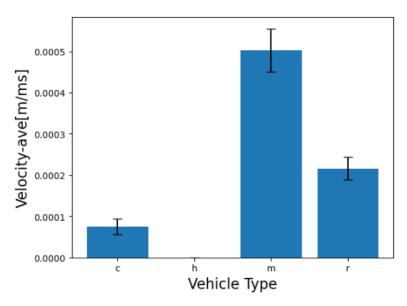


図 29: 車の群れ内の各車種の平均速度. AJ の場合

次の図 30 は交通状態が OT の結果であり、平均速度は m > r > c の順であった.

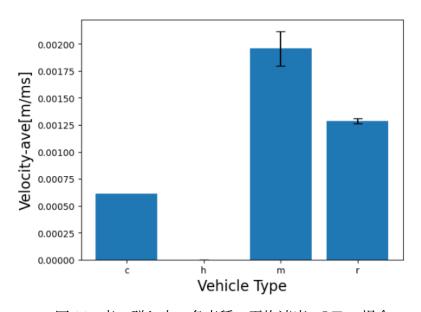


図 30: 車の群れ内の各車種の平均速度. OT の場合

これらの結果から、混合率が 0 の群れにおいて、すべての交通状態での平均速度が 二輪車 > オートリキシャ > 乗用車の関係であることが明らかとなった.(AF の場合、群れ内がすべてオートリキシャであるものは観測されなかった)ここから、同一車種のみの群れの平均速度は含まれる車種に依存することが明らかとなった.またその順序は車両の小

さい順に並んでいることがわかる.

#### 3.10 各車種の占有率が及ぼす影響と考察

3.7.4 項,項目 2 では,自由流相の特に低密度時には自己組織化した群れが多くなることで,交通が円滑に流れることを示唆した.また,2.5 節では,群れには着目せず,ある車種の占有率が上昇することで,交通量が上昇すると述べた.ある車種が局所的に偏在した(占有率の高い)場合には,混合度の低い群れを作りやすいので,群れの高い占有率と交通量の上昇という現象と一致する.一方で,3.7.4 項,項目 2 の結果は,例え特定の一車種が偏在しなくても(占有率が低くても),多彩な車種でも群れが形成されていれば,低密度時に交通量は向上し得ることを示唆している.さらに,自由流相で交通量の低い領域では,ある車種が局所的に偏在し占有率が高くても,群れを形成していない可能性がある.

3.7.4 項,項目 3 では自由流相中密度,高密度時に群れの多い交通が中程度の交通量をとり、それ以外の交通がそれよりも高い、もしくは低い交通量を取ると述べた。まず、群れ以外の車群を含む交通が高い交通量を取ることについて、2.5 節では一部の車種(特にオートリキシャや大型車)が高い交通量を高い密度まで維持する傾向が見られた。ここから、自由流相で高密度時に高い交通量を示している交通には、単一車種の車群ながら、群れには属していない車両と属している車両が入り混じるような交通が存在していることが示唆される。次に、群れ以外の車群を含む交通が低い交通量を取ることについて、2.5 節では、少なくとも特定車種の占有率が低い交通が、自由流相中から高密度時に、高い交通量を取ることはなかった。従って、自由流相中で低い交通量をもつ交通には、群れに属する車両群とそうでない車両群が、車種が入り混じりながら、存在していると考えられる。

密度が高まり渋滞する状況は、特定車種の占有率が高い交通では見られず(表 3)、また自己組織化した群れとそうでない車両群の交通量に、明確な差はなかった(3.7.4 項、項目5). これらは群れ内部の車種の混合度に関わらない(図 25). 自己組織化した群ればかりが交通を占めていたとしても、自己組織化特有の挙動は示さなかった.

#### 4 結論

新興国で進む交通渋滞の深刻化は、人々の QoL を低下させる原因となっている. 本研究は、交通渋滞を改善するための基礎研究として、新興国交通が多彩な車種が車線に沿わず走行する"二次元混合交通"であることに着目した. Aghabayk[9] や Lan ら [10]、長濱ら [11, 12] の先行研究から、二次元混合交通における車種の偏在が交通特性に影響を及ぼす可能性を着想し、それを検証することを目的とした. 具体的には、各車種が交通に占める割合が交通特性に与える影響、ならびに群れの占有率と群れ内部の車種の混合度が交通特性に与える影響を、インドの実交通データを用いて調査した.

解析の結果得られた主たる結果は以下の通りである.

- 自由流相の特に低い密度時には、車種の混合具合に依らず群れを形成すれば、交通量が上昇する.特定車種の占有率上昇で交通量が上昇する現象は、群れの形成で説明できる.
- 自由流相の中から高密度時には、群れを多く含む交通は中程度の交通量をもつ。そのような密度で特に高い交通量をもつ交通には、単一車種で群れと群れ以外の属する車種が混じるような車両群が含まれている可能性がある。
- これらの現象は交通中の群れの占有率がある一定量を超えると現れる.
- 密度が高まり渋滞している状況では、特定車種のばかりが交通を占める現象は見られない。またこのような状況で、群れの占有率は交通量に影響しない。

ここから,自由流相で交通を円滑に流すためには,群れとして速度と追従関係を維持させる方策を取ることが有効であり,さらに車種をある程度分離することで,自由流相の高密度時の交通量を維持できると示唆される.さらに高密度である渋滞相においては,群れの形成が交通量に与える影響は見られず,交通量維持にはさらなる検討が必要である.

また,混合交通をモデルで表現し特性を再現するにあたって,交通が臨界密度を超えるまでは,群れといった各車両の挙動の見える微視的なモデル用いる必要があり,渋滞相に至ってからは,各車両の挙動は無視したマクロな流体モデルを用いても問題がないことも示唆された.

加えて、本研究では主結果に加え以下の現象も観測・示唆された.

自由流相と渋滞流相の間で交通が遷移している状況では、群れの車種混合度が速度に与える影響が現れた.特に、渋滞が始まりつつある状況では、多彩な車種を含む群れの方が、速度を下げにくかった.一方、渋滞が解消しつつある状況では、群れ内の車種が少ない方

が,速度を回復しやすかったと言える. 同様にして,自由流相でも,群れ内の車種が少ないほうが,速い速度を維持しやすかったと言える. また. 渋滞が解消しつつある状況で速度を回復できない車両群には,多彩な車種を含みつつ群れを形成していたものがあったが,これらは先に渋滞を抜けたすばしっこい車両群から取り残されつつ,動きの遅い車両に阻まれている様々な車種の車両であったと考えられる.

ここから、渋滞が始まりやすい状況において交通量を得るために自己組織化を促すならば、単一車種による車両群に加えて、多彩な車種を含んだ群れの生成を促す方が良い可能性がある。また、渋滞が解消しつつある状況及び自由流相の交通において交通量を得るために自己組織化を促すならば、群れに属する車両はできるだけ車種をそろえた方が良い可能性がある。これらの方策が有効か、今後さらなる研究が必要である。

加えて、群れの車両がすべて同一車種のとき、すべての交通状態において、平均速度は二 輪車の群れ、オートリキシャの群れ、乗用車の群れの順であった。交通状況に応じて群れの 形成を促進させるならば、この順序も考慮するとより高い交通量が得られると期待できる。

なお、本研究で着目した車種の占有率と群れの多寡は、間接的な関係にある。車種の占有率が高くても群れではない可能性、群れであっても車種の占有率は低いということが起こりうる。そのような車両群が臨界密度付近の交通量を向上させる可能性も示唆された。今後の課題として、交通における車種の占有率と群れの形成過程を調査するとともに、群れの混合度と交通効率の関係性を明らかにする必要がある。また、群衆行動学の観点から、群れ内でのドライバーの心理が交通挙動に影響を及ぼすのかを解明する必要がある。

### 謝辞

本研究を進めるにあたり、多くの方々にご協力をいただきました.指導教員である長濱章仁助教には、研究の進め方から、文章の書き方、発表スライドの作り方まで、多大なご指導をいただきました.研究室が新設ということもあり、右も左も分からない私に対して、親身にご助力頂きました.先生方のみならず、様々な方々に大変お世話になりました.深く感謝申し上げます.島田信子さんには、研究活動において、研究に必要な物品の購入や、さまざまな事務処理など、様々なご支援をいただきました.Munkhtushig MUNGUNTSETSEG さんとは、他愛ない話から研究内容までとても有意義な時間を過ごせました.

# 参考文献

- [1] AMP. "米国だけで 3000 億ドル以上の経済損失、世界各都市の交通渋滞に挑むイスラエル企業 optibus", 2019. https://ampmedia.jp/2019/01/13/optibus/, (参照 2024-01-21).
- [2] 国際協力機構東南アジア・大洋州部東南アジア第五課. "事業事前評価表". https://www2.jica.go.jp/ja/evaluation/pdf/2021\_PH-P275\_1\_s.pdf, 2021. (参照 2023-12-30).
- [3] Business Insider. "アメリカで最も大気汚染がひどい 8 つの都市、うち 4 つはカリフォルニア州", 2019. https://www.businessinsider.jp/post-186624, (参照 2024-01-18).
- [4] TomTom. "tomtom traffic index ranking 2023", 2023. https://www.tomtom.com/traffic-index/ranking/, (参照 2023-12-27).
- [5] Mobility Transformation. "タイ・バンコクの交通課題と物流の今". https://mobility-transformation.com/magazine/thai\_logistics/, 2017. (参照 2023-12-27).
- [6] 福田敦, 中村文彦, 竹内健蔵. 東南アジアの大都市におけるオートバイの現状と課題. IATSS review= 国際交通安全学会誌, Vol. 29, No. 3, pp. 162–170, 2004.
- [7] Abbas Sheykhfard, Farshidreza Haghighi, Grigorios Fountas, Subasish Das, and Ali Khanpour. How do driving behavior and attitudes toward road safety vary between developed and developing countries? evidence from iran and the netherlands. *Journal of safety research*, Vol. 85, pp. 210–221, 2023.
- [8] Martin Treiber and Arne Kesting. Traffic flow dynamics. Traffic Flow Dynamics: Data, Models and Simulation, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp. 983–1000, 2013.
- [9] Kayvan Aghabayk, William Young, Majid Sarvi, and Yibing Wang. Examining vehicle interactions during a vehicle-following manoeuvre. In *Australasian Transport Research Forum (ATRF)*, 34th, Vol. 34, 2011.
- [10] Lan Liu, Liling Zhu, and Da Yang. Modeling and simulation of the car-truck heterogeneous traffic flow based on a nonlinear car-following model. Applied Mathematics and Computation, Vol. 273, pp. 706–717, 2016.
- [11] Akihito Nagahama, Takahiro Wada, Daichi Yanagisawa, and Katsuhiro Nishi-

- nari. Detection of leader—follower combinations frequently observed in mixed traffic with weak lane-discipline. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Vol. 570, p. 125789, 2021.
- [12] Akihito Nagahama, Takahiro Wada, Daichi Yanagisawa, and Katsuhiro Nishinari. Certain types of vehicles in heterogeneous traffic in india tend to gather. Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, Vol. 14, pp. 1794–1813, 2022.
- [13] Akihito Nagahama and Katsuhiro Nishinari. Optimizing evidential deep learning generators for modeling vehicular traffic patterns in developing countries. International Symposium on Scheduling 2023, June 2023.
- [14] 長濱章仁. 混合交通のボトムアップ改善の先を目指して —seminar on heterosocial systems 開催のモチベーション—. 第 29 回交通流と自己駆動粒子系シンポジウム論文集= Proceedings of the 29th Symposium on Traffic Flow and Self-driven Particles. 交通流数理研究会.
- [15] Jalal Taqi Shaker Al-Obaedi. Estimation of passenger car equivalents for basic freeway sections at different traffic conditions. World Journal of Engineering and Technology, Vol. 4, No. 2, pp. 153–159, 2016.
- [16] Manjul Sharma and Subhadip Biswas. Estimation of passenger car unit on urban roads: A literature review. *International journal of transportation science and technology*, Vol. 10, No. 3, pp. 283–298, 2021.
- [17] OpenCv. "cv::trackermil class reference". https://docs.opencv.org/3.4/d0/d26/classcv\_1\_1TrackerMIL.html. (参照 2024-01-21).
- [18] S. Chandra, S. Gangopadhyay, S. Velmurugan, and K. Ravinder. Indian highway capacity manual (indo-hcm). 2017.
- [19] scikit learn. "sklearn linear model linearregression". https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.linear\_model. LinearRegression.html. (参照 2024-02-01).
- [20] チューリッヒ保険会社. "乗用車とは。種類、サイズ、定員は?乗用車の税金(維持費)、名義変更、車検について ". https://www.zurich.co.jp/car/useful/guide/cc-cartype-size-capacity/. (参照 2024-02-04).
- [21] バイクのニュース. "バイクのスペック表を読み解く!「全長×全幅×全高」の落とし 穴とは!?". https://bike-news.jp/post/304208, 2023-04-09. (参照 2024-02-04).
- [22] ドライバーズジョブ. "大型トラック (10t トラック) のサイズ/荷台寸法/幅/長

- さ/高さ/大きさがまるわかり ". https://driversjob.jp/contents/trucks/largetrucks/k08000#google\_vignette. (参照 2024-02-04).
- [23] 西宮ガレージボスコ. "運転席 1 人の 1 人乗りの van モデル". https://www.bosco-tuktuk.com/model/1127.html#:~:text=%E3%82%B5%E3%82%A4%E3%82%BA%E3%80%80%E5%85%A8%E9%95%B7%20%C3%97%20%E5%85%A8%E5%B9%85,%C3%97%20%E9%AB%98%E3%81%95%202499mm%C3%971300mm%C3%971820mm. (参照2024-02-04).
- [24] 長濱章仁, 和田隆広, 柳澤大地, 西成活裕. 特定車種の群れに関する統計的検証. 計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会講演論文集. 計測自動制御学会, 2020.
- [25] 土屋淳二. Re パークの 『群集と公衆』 論にみる集合行動論の視座. 年報社会学論集, Vol. 1993, No. 6, pp. 37–48, 1993.
- [26] Robert Ezra Park and Ernest Watson Burgess. *Introduction to the Science of Sociology*, Vol. 1. University of Chicago press, 1924.
- [27] Venkatesan Kanagaraj and Martin Treiber. Self-driven particle model for mixed traffic and other disordered flows. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Vol. 509, pp. 1–11, 2018.
- [28] Michihiro Kuramochi and George Karypis. An efficient algorithm for discovering frequent subgraphs. *IEEE transactions on Knowledge and Data Engineering*, Vol. 16, No. 9, pp. 1038–1051, 2004.
- [29] Kenichi Yoshida and Hiroshi Motoda. Clip: Concept learning from inference patterns. *Artificial Intelligence*, Vol. 75, No. 1, pp. 63–92, 1995.
- [30] Phu Chien Nguyen, Kouzou Ohara, Hiroshi Motoda, and Takashi Washio. Cl-gbi: A novel approach for extracting typical patterns from graph-structured data. In Advances in Knowledge Discovery and Data Mining: 9th Pacific-Asia Conference, PAKDD 2005, Hanoi, Vietnam, May 18-20, 2005. Proceedings 9, pp. 639–649. Springer, 2005.
- [31] Takashi Matsuda, Hiroshi Motoda, Tetsuya Yoshida, and Takashi Washio. Mining patterns from structured data by beam-wise graph-based induction. In Discovery Science: 5th International Conference, DS 2002 Lübeck, Germany, November 24–26, 2002 Proceedings 5, pp. 422–429. Springer, 2002.
- [32] networkX. "tutorial". https://networkx.org/documentation/stable/tutorial.html. (参照 2024-02-04).
- [33] Gordon Frank Newell. A moving bottleneck. Transportation Research Part B:

- Methodological, Vol. 32, No. 8, pp. 531-537, 1998.
- [34] Martin Treiber, Ansgar Hennecke, and Dirk Helbing. Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations. *Physical review E*, Vol. 62, No. 2, p. 1805, 2000.
- [35] Michael James Lighthill and Gerald Beresford Whitham. On kinematic waves ii. a theory of traffic flow on long crowded roads. *Proceedings of the royal society of london. series a. mathematical and physical sciences*, Vol. 229, No. 1178, pp. 317–345, 1955.