

# インドネシア地方中規模都市における アンコットの实走行燃料消費に関する研究

澤田 進太郎<sup>1</sup>・室町 泰徳<sup>2</sup>

<sup>1</sup>非会員 東京工業大学大学院 総合理工学研究科 人間環境システム専攻  
(〒226-8502 横浜市緑区長津田町4259 G3-5)

E-mail: sawada.s.ac@m.titech.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 東京工業大学環境・社会理工学院土木・環境工学系  
(〒226-8502 横浜市緑区長津田町4259 G3-5)

E-mail: muromachi.y.aa@m.titech.ac.jp

本研究は、インドネシアの地方中規模都市マラン市の地域化して発展した道路公共交通アンコットについて現地観測調査を行い、その結果から燃料消費量の推計を試みたものであり、アンコットの効率化を目的とした基礎的検討を行っている。

本研究では、現地観測調査から得られた燃料消費量データと車両走行データを用いて、車両の熱機関モデルを考慮した重回帰分析を行った。分析の結果から、アンコットの实走行燃料消費量にはアイドリングと走行距離が大きく影響し、加速量の影響が小さいことが示唆された。

**Key Words :** Fuel consumption, Paratransit, Angkot, Indonesia, Medium-sized city

## 1. 序論

東南アジアの一部の地方都市においては、地域化して発展した都市内道路公共交通（パラトランジット）が重要な役割を担っている。東南アジアでは今後も経済発展と人口増加により交通需要が増加すること、地球温暖化の主要因であるCO<sub>2</sub>の排出量に占める交通部門の割合が高いことなどを考えれば、このような地域化して発展した道路公共交通の効率化が望まれる。東南アジアの大都市の一部では鉄道などの公共交通が整備されつつあるが、多くの地方都市においては鉄道を整備するほど交通需要が存在せず、公共交通の整備を行う上で、既存の道路公共交通を発展させる方が現実的な場合もある。このような地域化して発展した道路公共交通に関しては、賃金歩合制の運転手が乗客獲得のために非効率な運転をするなど、CO<sub>2</sub>の排出量の視点からは大いに改善の余地がある。しかし、現地観測調査に基づいてその実走行燃料消費の実態を明らかにした研究は非常に少なくなっている。

本研究は、インドネシアの地方中規模都市マラン市の地域化して発展した道路公共交通アンコットについて現地観測調査を行い、その結果から燃料消費量の推計を試みたものであり、アンコットの効率化を目的とした基礎

的研究と位置づけられる。

## 2. 既往研究

Phunらは東南アジアにおいてパラトランジットの形態をとる公共交通の既往研究をまとめている<sup>1)</sup>。また、パラトランジットに関する既往研究としては、交通システムにおける特性についてはJoewonoらの研究<sup>2)</sup>など、市場特性についてはNewazらの研究<sup>3)</sup>など、フィーダーサービスとしての役割についてはLooらの研究<sup>4)</sup>などがある。また、運賃についてはNugrohoらの研究<sup>5)</sup>、持続可能性についてはOkamuraらの研究<sup>6)</sup>などがあり、サービスの質についてはWeningtyasらの研究<sup>7)</sup>などがある。しかしながら、道路公共交通の効率化の視点から、現地観測調査に基づいてパラトランジットの燃費消費の実態を検討した研究例は非常に少ない。

## 3. 研究の目的

本研究では、地域化して発展した道路公共交通の一例としてアンコットを対象に、その燃料消費量、および実走行について現地観測調査を行った。その結果を基に、

燃料消費量に影響を与える要因を検討した。具体的には、単位時間の燃料消費量を被説明変数、車両のエネルギー使用に影響を与えると考えられるアイドリング燃費、単位時間の移動距離、単位時間の加速度、乗車人数などを説明変数とする重回帰分析を行い、その結果について考察を行った。

さらに重回帰分析の結果を燃料消費量モデルとし、アンコットの運行における燃料消費量を推計して実測値との比較、および燃料消費量への各要因の寄与割合の試算を試みている。

#### 4. 観測調査概要

##### (1) 観測調査の場所と日程

調査対象都市はインドネシア・東ジャワ州の地方都市マラン市である。マラン市の主な公共交通は鉄道とバスとアンコットであるが、鉄道とバスは主に都市間の長距離移動の用に供するものであり、都市内の主な公共交通はアンコットのみである。マラン市には市内の主要道路を走る22のアンコット路線がある。

2015年12月8日・10日・11日・14日・15日・17日・18日の7日間、一日に2台、計14台の車両について燃費調査を行った。観測開始はいずれも午前6時前後であり、観測終了は12時～17時頃である(表1)。

##### (2) 燃料消費量の計測

燃料消費量については、燃料(ガソリン)が満タンの状態から運行し、次の給油時に給油した量(レシートに記された給油量)を燃料消費量として扱う。調査員は観測の開始直後に車両の燃料を満タンにするよう運転手に依頼する。その後車両を平常通りに運行してもらい、約1時間おきにガソリンスタンドにおいて再び燃料を満タンにしてもらう。この際の時刻を記録し、前回の給油の時刻からの経過時間を燃料消費時間とする。この手続きを1台の車両につき6回繰り返す。その後、運転手に30分程度のアイドリング停車を行ってもらった後、再び燃料を満タンにしてもらう(7回目の給油)。最後の給油はアイドリング停車でどの程度燃料が消費されるのかをより明示的に分析するために行った。

14台の観測について各7回の給油を行ったことから、

98回の燃料消費量データを得ることができた。

##### (3) 車両の実走行の観測

観測対象車両に調査員がGPS端末を持ち乗車する。このGPS端末により1秒ごとに車両の位置についての緯度経度情報を得ている。

##### (4) 走行中の車両情報の記録

さらに調査員は1分おきに調査員自身と運転手を含めた車両の乗車人数等を大人・子供・大きな荷物の3分類により記録するよう求めた。同じく1分おきに車両のエンジンがかかっているかどうかを記録している。

#### 5. 観測調査結果

##### (1) 取得データ

観測調査から取得したデータは以下のものである。

- 車両の燃料消費量および燃料消費時間(98回分)
- 車両位置の緯度・経度の数値(1秒ごと)
- 車両の乗車人数(1分ごと)
- エンジンの起動の有無(1分ごと)

##### (2) データの処理

観測調査から取得したデータから1秒ごとの移動距離、速度、加速度を算出する。ステップ(1秒)ごとに車両は直線で移動しているものとみなし、Hubenyの公式(1)を用いて移動距離を算出する。

$$x_n = \sqrt{(d_{y,n}G)^2 + (d_{x,n}H \cos \mu_{y,n})^2} \quad (1)$$

ここに

$x_n$ : ステップ n の移動距離 [m]

$p_n$ : ステップ n の経度 [rad]

$q_n$ : ステップ n の緯度 [rad]

$d_{p,n} = p_n - p_{n-1}$ : ステップ n の経度の差 [rad]

$d_{q,n} = q_n - q_{n-1}$ : ステップ n の緯度の差 [rad]

$\mu_{q,n} = \frac{q_n + q_{n-1}}{2}$ : ステップ n の緯度の平均値 [rad]

$e = \sqrt{\frac{a^2 - b^2}{a^2}}$ : 第一離心率

$G = \frac{a(1 - e^2)}{W_n^3}$ : 子午線曲率半径 [m]

$H = \frac{a}{W_n}$ : 子午線曲率半径 [m]

$W_n = \sqrt{1 - e^2 \sin^2 \mu_{q,n}}$

$a = 6377397$ : 赤道半径 (Bessel 楕円体) [m]

$b = 6356079$ : 極半径 (Bessel 楕円体) [m]

この距離をステップの時間で除したものをそのステップの速度、前ステップの速度との差分を移動時間で除したものをそのステップの加速度として扱う。

$t_n (=1)$ : ステップ n の時間 [s]

$v_n = x_n / t_n$ : ステップ n の速度 [m/s]

$\alpha_n = (v_n - v_{n-1}) / t_n$ : ステップ n の加速度 [m/s<sup>2</sup>]

車両の乗車人数は1分ごとの記録であるため、60秒間

同じ値を1秒ごとの乗車人数として反映する。またエンジンの起動の有無についても、60秒間同じ状態であるとして、1秒ごとのエンジン起動状態として反映する。

- $N_{n,adult}$  : ステップ  $n$  の大人乗車人数 [人]
- $N_{n,child}$  : ステップ  $n$  の子供乗車人数 [人]
- $N_{n,baggage}$  : ステップ  $n$  の大きな荷物の個数 [個]

### (3) 重回帰分析の概要

以上の観測調査データを基に重回帰分析を行う。自動車の単位時間の燃料消費に関する熱機関モデルによる理論式は式(2)である<sup>9,10</sup>。

$$f_t = f_{idle} + \frac{(\mu + \sin\theta)Mg}{\epsilon\eta H} v + \frac{\kappa}{\epsilon\eta H} v^3 + \frac{M + M'}{\epsilon\eta H} \alpha v \quad (2)$$

ここに

- $f_t$  : 単位時間の燃料消費量 [cc/s]
- $f_{idle}$  : アイドリング消費 [cc/s]
- $v$  : 速度 [m/s]
- $\alpha$  : 加速度 [ $m/s^2$ ]
- $M$  : 車両重量
- $M' (= 0.1M)$  : 加速時回転部分相当質量
- $\kappa (= 0.5)$  : 空気抵抗パラメータ [kg/m]
- $\mu (= 0.015)$  : 路面転がり抵抗係数
- $\sin\theta (= 0 \text{ とする})$  : 路面勾配
- $\eta (= 0.9)$  : 総伝達効率
- $\epsilon (= 0.3)$  : 正味熱効率
- $H = 3.4 \times 10^4$  : ガソリンの熱量換算係数 [j/cc]
- $g = 10$  : 重力加速度 [ $kg \cdot m/s^2$ ]

式(2)は左辺が単位時間の燃料消費量である。右辺第一項はエンジン起動時のアイドリング燃料消費量であり、エンジンを起動しているだけで走行の有無に関わらず消費する燃料のことを指す。第二項は路面抵抗に対し車両を動かすために必要な燃料である。第三項は空気抵抗に対して車両を動かすために必要な燃料であり、高速走行時に影響が大きくなる項である。第四項は車両を加速するために必要な燃料であり、車両が加速する場合にのみ定義される。

この式(2)を変形し、観測調査データから得られる燃料消費量を被説明変数、各項に対応する走行特性を説明変数として、式(3)に基づく重回帰分析を行う。なお、アンコットは高速で走行しないため、式(2)の右辺第三項については式(3)から除外した。

$$f_t = C + X_1V + X_2A \quad (3)$$

ここに

- $C$  : 定数項
- $V: Mv$  : 路面抵抗に関する説明変数 [ $kg \cdot m/s$ ]
- $A: 1.1M\alpha v$  : 加速に関する説明変数 [ $kg \cdot m^2/s^3$ ]

この式(3)の被説明変数と説明変数を後述の手順に従って98回の実走行観測調査について算出する。

なお、本研究では被説明変数が大きいものと小さいものから5%ずつ、つまり大小5個ずつ計10個のサンプルを除外して重回帰分析を行う。これは燃料消費量の計測が手作業であるため誤差が生じやすいと考えられるため、

外れ値が分析に含まれることを回避するためである。よってサンプル数は98から10を除いた88回、変数変数は3個の重回帰分析となる。

### (4) 被説明変数・説明変数の算定の方法

各実走行の観測について(1)、(2)で述べたように燃料消費量、燃料消費時間、1秒ごとの移動距離・速度・加速度・乗車人数・エンジン起動の有無の情報が得られている。以上のデータを基にして式(3)の被説明変数および説明変数を式(4)のように算出する。

被説明変数の単位時間の燃料消費量 $f_t$ については燃料消費量 $Q$ をエンジン起動時間 $T_{on}$ で除したものとす。また、説明変数を算出するにあたっては車両重量を定義する必要があるため文献<sup>11</sup>を参考に車両重量を1600kg、インドネシア人の男女の平均体重から大人の重量を55kg、子供の重量を20kg、大きな荷物の重量を調査員から5kgと設定してステップ(1秒)ごとの車体重量 $M_n$ を算出する。各ステップの車体重量と速度の積の時間平均を路面抵抗に関する燃料消費の説明変数 $V$ とし、加速したステップの車体重量と加速度と速度の積の時間平均を加速に関する燃料消費の説明変数 $A$ とする。なお $V$ 、 $A$ のいずれも時間平均を算出する際に除数とする時間はエンジン起動時間 $T_{on}$ としている。

$$\left. \begin{aligned} f_t &= Q/T_{on} \\ V &= \left( \sum_{n=1}^m M_n \cdot v_n \right) / T_{on} \\ A &= 1.1 \left( \sum_{n=1}^m \delta_n \cdot M_n \cdot \alpha_n \cdot v_n \right) / T_{on} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

ここに

- $Q$  : 燃料消費量 [cc]
- $M_n = 1600 + 55 \cdot N_{n,adult} + 20 \cdot N_{n,child} + 5 \cdot N_{n,baggage}$   
: ステップ  $n$  の車体重量 [kg]
- $\delta_n : v_n - v_{n-1}$  が正なら1、負なら0となる変数
- $m$  : その観測回のステップ総数 (秒数)
- $T_{on} = T_{total} - T_{off}$  : エンジン起動時間 [s]
- $T_{total}$  : 燃料消費時間 [s]
- $T_{off}$  : 非エンジン起動時間 [s]

説明変数 $V$ および $A$ は車両重量・速度・加速度を因数にもつため、重回帰分析から得られる係数の符号は正になると予想できる。これらの手法から算出した被説明変数、および説明変数の相関は図1のとおりであり、各説明変数は被説明変数に対して正の相関を示している。バラつきが大きいが、これは先述のとおり計測の方法による誤差によるものであると考えられる。

### (5) 重回帰分析の結果

重回帰分析の結果を表2に示す。このうち熱機関モデルから得られる値とは式(2)における右辺第二項の

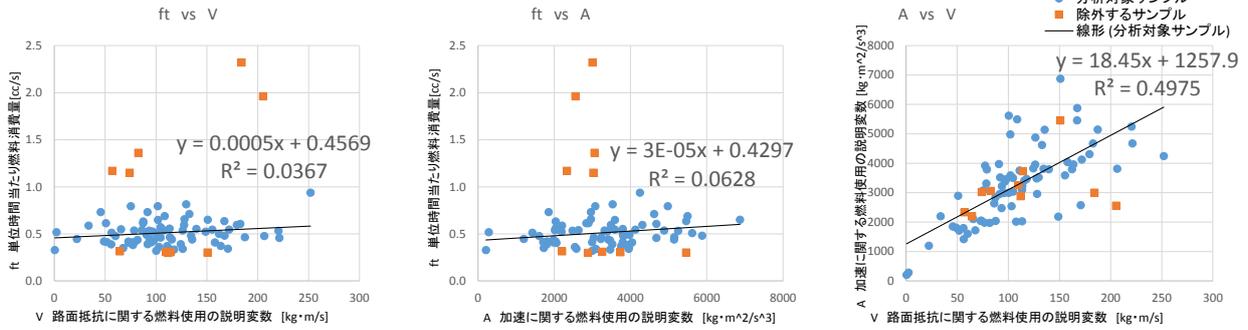


図1 各変数の相関

表2 重回帰分析の結果

係数	説明変数			熱機関モデルから得られる値	重回帰分析の結果			重相関 R	重決定 R <sup>2</sup>	補正 R <sup>2</sup>	標準誤差	観測数	
	符号	内容	次元		係数	t値	標準誤差						
C	-	-	定数項	(cc/s)	( <i>f<sub>idle</sub></i> )	0.3101	6.816	0.04550	0.382	0.146	0.126	0.139	88
X1	V	Mv	路面抵抗の説明変数	kg・m/s	0.0000163	0.0000218	2.337	0.00000932					
X2	A	1.1Ma v	加速の説明変数	kg・m <sup>2</sup> /s <sup>3</sup>	0.0000545	0.0000146	1.055	0.00001380					

$(\mu + \sin\theta)g/\varepsilon\eta H$ 、右辺第四項の $1/\varepsilon\eta H$ を算出した値である。これらは係数 $X_1$ および $X_2$ について熱機関モデルの理論から反映されると期待される値である。また式(2)の $C$ と式(3)の $f_{idle}$ はともに定数項としての性質を持つため、 $C$ に対応する値を $f_{idle}$ としている。

t値について、路面抵抗に関する説明変数 $V$ は5%の有意水準を満たしている。 $V$ は車体重量 $M$ と速度 $v$ の乗算値の平均であるが、乗車数は最も多くて大人10人程度であり満員時と乗車人数2人（運転手と調査員）の場合とを比べると1.3倍程度である。よって $V$ に大きな影響を与えるのは速度 $v$ であり、速度（単位時間の移動距離）が大きい場合に単位時間の燃料消費量が多くなるという直感の予想とも合致する結果となった。また既往研究<sup>9)</sup>では単位時間の燃料消費量と定速走行時の車両速度の間にはおおむね線形関係があると述べられており、それとも合致している。一方で加速に関する説明変数 $A$ は有意水準を満たしていないが、符号は予想と一致している。また、両係数とも熱機関モデルから得られる値と比較して大きな差はない結果となった。

## 6. 燃料消費量の試算

### (1) 燃料消費量推計モデル

式(3)および重回帰分析の結果から単位時間の燃料消費量 $f_t$ を推計するモデル式(5)を仮定し、これにエンジン起動時間 $T_{on}$ を乗じた式(6)によって燃料消費量 $Q$ を推計した。

$$f_t = 0.310 + 0.0000218V + 0.0000746A \quad (5)$$

$$Q = f_t \cdot T_{on} = (0.310 + 0.0000218V + 0.0000746A)T_{on} \quad (6)$$

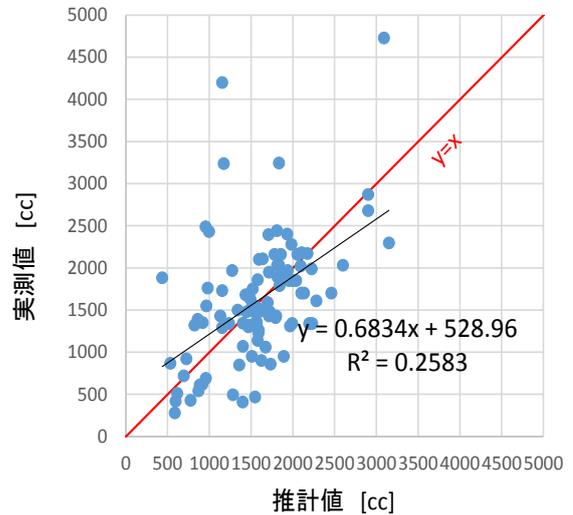


図2 燃料消費量の実測値と式(5)による推計値の比較

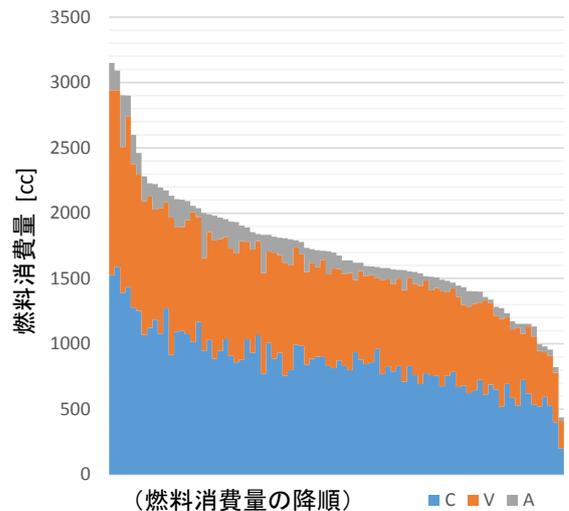


図3 燃料消費量Qの内訳（7回目の給油以外）

## (2) モデルの検証

これにより推計した燃料消費量と燃料消費量の実測値とを比較したものが図2である。バラつきが大きく、決定係数も小さいが、両者には正の相関が見られる。

## (3) 燃料消費量推計に基づく分析

推計した燃料消費量の内訳を図3に示す。これは式(6)の各項 $0.310T_{on}$ 、 $0.0000218VT_{on}$ 、 $0.0000746AT_{on}$ が燃料消費量 $Q$ に寄与する割合を示している。また通常の運行について考察を行う必要があるため、7回目の給油については含まれていない。これを見るとアイドリング消費 $CT_{on}$ および走行距離 $VT_{on}$ は燃料消費に大きな影響を与えるが、加速量 $AT_{on}$ の影響は小さい。

## 7. 結論と今後の課題・展望

本研究では、インドネシアの地方中規模都市マラン市の地域化して発展した道路公共交通アンコットについて現地観測調査を行い、その結果から燃料消費量の推計を試みた。その結果、アイドリング消費および走行距離が燃料消費量に大きな影響を与えており、加速量はあまり大きな影響を及ぼさないことが示唆された。

今後はモデルの精度の向上のための検討を行う必要がある。また、他の路線のアンコットの実走行データに対して燃料消費量推計モデルを適用して燃料消費量の実態を推定して、燃料消費の内訳等を詳細に分析し、具体的なアンコットの効率化手段を検討する必要がある。

なお、本研究は東芝-東京工業大学共同研究「スマートな都市インフラを構築するための複合ソリューションの研究開発」の一部として実施し、多大な支援を頂いている。関係各位に深く謝意を表します。

## 参考文献

- 1) Veng Kheang PHUN, Tetsuo YAI (2016), State of the Art of Paratransit Literatures in Asian Developing Countries, Asian Transport Studies, Vol.4, pp.57-77
- 2) Joewono, T.B., Kuota, H. (2005). The characteristics of paratransit and non-motorized transport in Bandung, Indonesia. Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, 6, pp. 262-277.
- 3) Newaz, M.S., Rahman, M.A., Hossain, Q.S., Ali, S.A. (2014). A paratransit maintenance cost-allocation model for Khulna metropolitan city, Bangladesh. Proceeding at 3rd World Conference on Applied Sciences, Engineering & Technology, Kathmandu, Nepal, September 27-29, 2014.
- 4) Loo, B.P.Y. (2007). The role of paratransit: Some reflections based on the experience of residents' coach services in Hong Kong. Transportation, 34, pp. 471-486.
- 5) Nugroho, S.B., Chikaraishi, M., Fujiwara, A., Zhang, J., Li, G. (2012). Exploring variation of trip fares by taxi-like paratransits services in Jakarta city: A multilevel analysis. Proceeding of the 91st Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington D.C., USA, January 22-26, 2012.
- 6) Okamura, T., Kaneko, Y., Nakamura, F., Wang, R. (2013). Passengers' attitudes to the service items of Jeepneys in metro Manila by different lifestyles. Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, 10, pp. 1384-1395.
- 7) Weningtyas, W., Fujiwara, A., Zhang, J. (2013). Does improved level of paratransit service improve drivers' quality of life? Journal of Eastern Asia Society for Transportation Studies, 10, pp. 1367-1383.
- 8) Fujiwara, A., Zhang, J. (2013). Sustainable transport studies in Asia. Springer Japan.
- 9) 大口 敬 (2000), 道路交通における燃料消費量 (CO2 排出量) の推定とその削減量評価手法の考察 (運輸システムの高度化による CO2 排出抑制に関する研究第二章), 日本交通政策研究会 日交研シリーズ A-286
- 10) 大口 敬 (1999), 道路交通における燃料消費量推定方法に関する考察, 土木計画学研究・公演集 No.22(2)
- 11) 社団法人自動車工業振興会, 自動車ガイドブック・1999~2000

## FUEL COMSUMPTION SURVEY OF ANGKOT OF LOCAL MEDIUM-SIZED CITY IN INDONESIA

Shintaro SAWADA and Yasunori MUROMACHI

This research investigated fuel consumption of Angkot in Malang city, one of the local medium-sized cities in Indonesia, which is a kind of 'paratransit' road-based public transportation based on fuel consumption survey. It is important to shed light on the mechanism of fuel consumption of paratransit because some of medium-sized cities in South East Asian countries are dependent on paratransit as a major form of public transportation.

From the fuel consumption survey for Angkot, we estimated a fuel consumption model by conducting multiple regression analysis with reference to heat engine model. The estimated model suggested that while the amount of acceralation did not contribute to fuel consumption much, the amount of idling and running distance contributed to fuel consumption considerably.