

運転特性を考慮したバス運転手の配置換えによる燃料費削減手法の提案

Proposed method of reducing fuel costs by reassigning bus drivers

三浦 陸[†] 水谷 后宏^{‡,§}

Miura Riku Mizutani Kimihiro

1. はじめに

現在、バス事業者は環境対策や運行の効率化、燃料費の高騰による経営の悪化といった問題を抱え、全国の事業者のうち7割以上が赤字経営を行っている [1]。経営改善を図るため、バス事業者の多くが運行状況を含むビッグデータ (運行データ) の収集および活用を行う取り組みを活性化しているが、現状、十分に活用できていない。先行研究では、当該ビッグデータ解析を通して、タクシーのように特定のルートを持たないバスの運用形態 (オンデマンドバス) をとることで、利便性を向上させる研究がある [2]。しかし、配車用のアプリ開発など大きなコストがかかるだけでなく、バス事業の支出において、人件費を除いて最も大きい燃料費の削減ができていないことから、事業者がこれらの方法を用いて経営を改善することは厳しいと予想される。本研究では運転手の運転特性分析を行い、それに基づく燃料費削減運転手配置手法を提案する。各ドライバーの燃料費を直接調査することは困難であるため、先行研究にて燃料費と深い関係がある走行抵抗計算の値を利用する [3]。各ドライバーの走行抵抗値を用いて、バス会社における燃料費改善に適したルートへの運転手の配置を目指す。

本研究では通信プロトコルの一種である Message Queuing Telemetry Transport (以下 MQTT [4]) を用いてバスの運行データを収集した。収集したデータを用いて運転手ごとの特性を求め、配置替えを行い燃料消費量に大きな影響を与える走行抵抗の削減を目指す。そのために、まず運行データの受信方法と取得したデータから走行抵抗を測定する方法について述べる。続いて求めた走行抵抗からどのように最適化したかについて述べ、最後に結果と今後の考察を述べる。

2. 研究内容

本研究の実験で使用した表 1 を含む 64 項目について、1 日あたり 45 万件のデータを MQTT を用いて受信し

た。分析時点までに 5 ヶ月分の運行データを MySQL で保存している。

表 1: 実験で使用したバスの運行データ

項目	内容
car_id	バスの識別番号
human	運転手の識別番号
car_root	バスの運行ルート番号
temperature	気温
date	データ送信時の日付
time	データ送信時の時間
lat	バスの緯度
lng	バスの経度
pressure	気圧
kmh	車速

2.1 走行抵抗の計算について

バスの走行時の走行抵抗は化石燃料による発熱によって生まれることから、走行抵抗を求めることでバスの消費燃料を推定できる [5]。バスの走行抵抗 T は、加速抵抗 (T_{ac})、転がり抵抗 (T_r)、勾配抵抗 (T_g)、空気抵抗 (T_a) を用いて以下の式 (1) で求めることができる [3]。

$$T = T_{ac} + T_r + T_g + T_a \quad (1)$$

加速抵抗 T_{ac} は、車の加速によってかかる抵抗である。バスの重量を W [ton], 加速度を α [m/s^2], σ を回転部分質量相当係数 (本研究では JIS で規定されている 5%) とすると式 (2) で表せる。

$$T_{ac} = 1000 \times W \times (1 + \sigma) \times \alpha \quad (2)$$

転がり抵抗 T_r はタイヤの変形によるエネルギー損失により起こる抵抗であり、バスの重量を W [ton], 重力加速度を g [m/s^2], μ_r を転がり抵抗係数 (本来地面の状態により変化するが今回は 1% とする) とすると、以下の式 (3) で表せる。

$$T_r = 1000 \times g \times W \times \mu_r \quad (3)$$

勾配抵抗 T_g は車が坂道を登る際に発生する抵抗である。バスの重量を W [ton], 重力加速後 g [m/s^2], 斜面の勾配を θ とすると以下の式 (4) で表せる。

[†] 近畿大学大学院総合理工学研究科, Graduate School of Science and Engineering, Kindai University

[‡] 近畿大学情報学部, Faculty of Informatics (KDIX), Kindai University

[§] 近畿大学情報学研究所, Cyber Informatics Research Institute, Kindai University

$$T_g = 1000 \times g \times W \times \sin \theta \quad (4)$$

今回は勾配情報を受け取れなかったので全てフラットな道を走行したと仮定して $\theta = 0$ として計算した。

空気抵抗 T_a は車体表面と空気の摩擦によって発生する抵抗である。バスの前面面積を $A[m^2]$ 、空気密度を $\rho[kg/m^3]$ 、空気抵抗係数を C_d 、バスの空気に対する相対速度（空気は止まっているものと仮定）を $V[m.s^2]$ とすると、以下の式 (5) で表せる。

$$T_a = \frac{\rho}{2} \times C_d \times A \times V^2 \quad (5)$$

各ドライバの走行特性の詳細を知るため、 T を直線、左カーブ、右カーブの3つに分類し、それぞれ T_s, T_l, T_r と定義した。

2.2 走行抵抗の予測について

配置換えによる最適化を行うには、担当ルート以外での走行抵抗を予測する。適切なドライバー配置を実現するため、直線、右カーブ、左カーブの比率を詳細に示す経路特性を考慮する。ここでドライバー i が運転するルート j の走行抵抗を以下の式 6 に示す。

$$T_{i,s} \cdot S_j + T_{i,l} \cdot L_j + T_{i,r} \cdot R_j. \quad (6)$$

ここで、 S_j, L_j, R_j は、経路 j における直線、左カーブ、右カーブの比率を示す。また、 $T_{i,*}$ はドライバー i の各方向の走行抵抗を示す。

2.3 最適化アルゴリズム

3.3 章で述べたように直進における運転手の運転特性と走行抵抗には関係がある。本論文では式 6 を用いて以下の式 7 を最小化する。

$$F = \min \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} T_{i,s} \cdot S_j + T_{i,l} \cdot L_j + T_{i,r} \cdot R_j. \quad (7)$$

ここで、 F は全ドライバーを全経路に配置したときの全経路の走行抵抗の最小値である。しかし、すべての組み合わせを試すことは NP 困難であるため、今回は貪欲法を用いて最適化を行った。今回はルート全体の平均走行抵抗に与える影響が一番大きい直線時に注目し最適化を行う。

2.4 バスの進行方向の検出について

走行抵抗は運転手の運転技量による差異が予想できるが、進行方向によっても変化することが予測される。そこでバスの進行方向を計測した。

進行方向を調べたい瞬間の座標を (α_x, α_y) 、一つ前に受信した座標を (β_x, β_y) 、一つ後に受信した座標を (γ_x, γ_y) として

$$A = (\beta_x - \alpha_x, \beta_y - \alpha_y)$$

$$B = (\beta_x - \gamma_x, \beta_y - \gamma_y)$$

とすると、進行方向は式 (8) で求められる。

$$\theta = \text{atan2}(A \times B, A \cdot B) \quad (8)$$

θ が $10 < \theta < 180$ の場合、右方向へ、 θ が $-180 < \theta < -10$ の場合、左方向へ、 θ が $-10 \leq \theta \leq 10$ の場合、直進しているとする。なお、座標データはおおよそ 0.5 秒間隔で受信する。

2.5 バスの運行ルートについて

受信した運行データは 6 ルートあり、それぞれ配置されている運転手の数が違う。それぞれのルートに配置された運転手数を表 2 に示す。

表 2: 各ルートの配置人数

ルート番号	人数
21	22
126	23
51	38
1265	1
123	2

3. データの解析

受け取った運行データを元に各路線、運転手ごとに走行抵抗を求め、運転手の配置換えで消費燃料に大きな影響を及ぼす走行抵抗を減らすための解析を行う。なお、以降のデータは全て 2021 年 7 月 18 日～2021 年 7 月 31 日のデータを用いて算出した。

3.1 各ルートの進行方向の割合

表 3 に各ルートの進行方向の割合（少数第 4 位を切り捨てているので 100 を切る場合がある）を示す。

表 3: 各ルートの進行方向の割合

ルート番号	直進の割合 (%)	右カーブの割合 (%)	左カーブの割合 (%)
21	83.340	8.472	8.187
126	81.228	9.411	9.360
51	72.810	13.681	13.508
1265	85.974	7.113	6.912
123	76.242	11.887	11.869

3.2 各ルートの走行抵抗について

走行抵抗の計算には上記で示した式(1)~(5)を使用した。この式を用いて計算した結果を各ルートごとの走行抵抗の平均を表4に示す。

表 4: 各ルート・各進行方向の走行抵抗の平均

ルート番号	直進 (N)	右カーブ (N)	左カーブ (N)
21	1394.490	1725.062	1725.688
126	749.278	1267.524	1270.902
51	520.821	1202.667	1203.412
1265	752.524	1325.101	1334.967
123	565.627	1368.494	1373.462

表4が示す通り、走行抵抗の平均に大きな差が見られた。そこで各進行方向の標準偏差を調べると、直進では313.39、右カーブでは182.37、左カーブでは181.46となり特に直進で大きな差が生まれている。直進で分散が大きくなっている原因としてルート毎の交通量や信号の数の差と考えられる。

そこで、各進行方向の割合と走行抵抗の平均の相関を調べたそれぞれの相関は直進方向で0.604、右カーブで-0.451、左カーブで-0.480となることがわかった。このことから左・右カーブよりも直線の方が出現回数の影響を受けることがわかった。

3.3 各運転手の走行抵抗

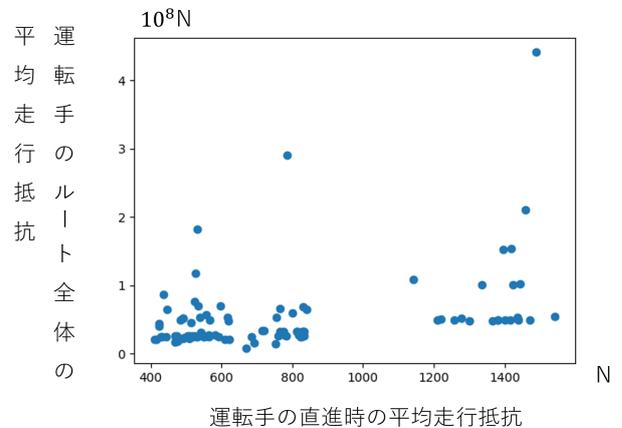
次に各運転手ごとの走行抵抗の平均を表5に、同じルートを走った全運転手の平均との割合を表6に示す。各進行方向の走行抵抗の割合のうち、最も全体の走行抵抗に影響を与えている要因を調べるため、各ルートでの運転手の平均走行抵抗と全体の平均走行抵抗で相関を取った(図1a~1c)。相関係数は直進で0.400、右カーブで0.380、左カーブで0.376であり、どの進行方向でもやや相関がある。これらの結果から各進行方向の走行抵抗は出現回数に大きく影響を受けるが、個人の運転特性により多少のばらつきがあることがわかった。特に直進時は左・右カーブに比べて差があることがわかった。

また、既存研究[3]を考慮すると、消費燃料特性は本走行抵抗と因果関係があることから、直進時の平均走行抵抗をもとに運転手の配置の最適化により、消費燃料を抑えたバス運転手の配置が可能になるといえる。

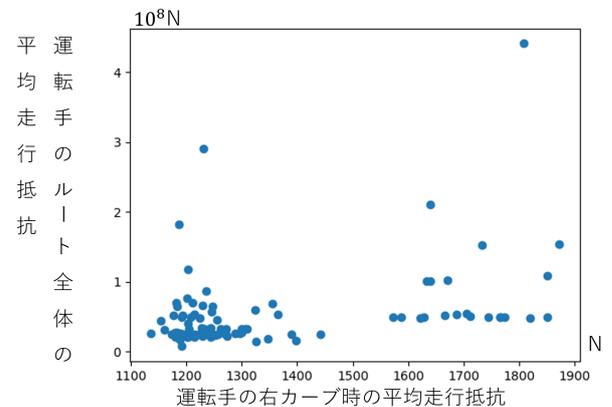
今回は直線での走行抵抗が小さい運転手を直進が多いルートに配置した。その結果、走行抵抗が3.319%削減された。

4. 結論・今後の課題

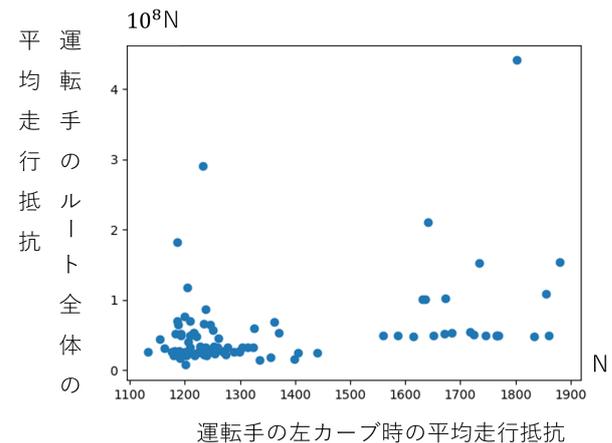
本研究では運転手の配置換えによる燃料費の削減を目指し、運行データから各進行方向ごとに走行抵抗を求め



(a) 各運転手の直進の平均走行抵抗とルート全体の走行抵抗



(b) 各運転手の右カーブの平均走行抵抗とルート全体の走行抵抗



(c) 各運転手の左カーブの平均走行抵抗とルート全体の走行抵抗

図 1: 各運転手の直進、右、左カーブの平均走行抵抗とルート全体の走行抵抗

表 5: ルート 51 における各運転手の走行抵抗の平均 (抜粋)

運転手	直進時の 平均走行抵抗 (N)	右カーブ時の 平均走行抵抗 (N)	左カーブ時の 平均走行抵抗 (N)
124	596.291	1182.436	1185.788
262	530.557	1186.530	1185.879
390	537.750	1214.240	1215.897
57	523.719	1201.360	1199.931
206	508.098	1202.788	1205.481

表 6: ルート 51 における全運転手の走行抵抗の平均と比較した場合の効率

運転手	直進 での効率 (%)	右カーブ での効率 (%)	左カーブ での効率 (%)
124	114.490	98.317	98.535
262	101.869	98.658	98.543
390	103.250	100.962	101.037
57	100.556	99.891	99.710
206	97.557	100.010	100.171

た。どの進行方向でも出現回数により走行抵抗が増減することが確認されたが、運転特性によっても走行抵抗が変動することがわかった。特に直進時に最も運転特性の影響を受けることから直進時に注目し最適化を行った。直進時に最も走行抵抗が少なくなるような配置換えを行うと 3.319%走行抵抗が削減されることが測定できた。

今後はより正確な他ルートでの走行抵抗の予測 [6] や遺伝的アルゴリズムを用いたより強力な最適化 [7] を行うことで、走行抵抗の削減を検討することが課題である。

参考文献

- [1] 2020 年度版 (令和 2 年度) 日本のバス事業 60 : <https://www.mlit.go.jp/common/001190066.pdf> 2022/06/29 参照.
- [2] 木田 雄也, 堀 磨伊也, 高野 茂, "オンデマンドバスにおける運用コスト削減のための乗車リクエスト予測", 第 82 回全国大会講演論文集, 2020 巻, 1 号, pp.351-352, 2020.
- [3] 下山 鑛一, "自動車の走行抵抗と燃料消費量に関する実験", 日本機械学会論文集, 4 巻, 15 号, pp.128-137, 2008.
- [4] MQTT : <http://mqtt.org/> 2022/06/29 参照

- [5] 村野 昭人, 鈴木 武, "コンテナヤードを走行するトレーラーの燃料消費量推計モデルの構築", 海洋開発論文集, 20 巻, pp.1133-1138, 2004.
- [6] 水嶋 教文, 山口 恭平, 川野 大輔, 鈴木 央一, 石井 素, "ディーゼル重量車における過渡運転時の燃料消費率予測手法の研究", 自動車技術会論文集, 47 巻, 2 号, pp.331-337, 2016.
- [7] 坂口 琢哉, "地域型遺伝的アルゴリズムを用いたナーススケジューリング", 情報処理学会研究報告, 2007 巻, 128 号, pp.247-250, 2007.