

シャトルバスの乗客変動とカオス

静岡大学工学部 長谷 隆、長井亮一

交通輸送システムにおける輸送量の変動について考察する。本稿ではシャトルバスを例に挙げて説明する。ここで提案するモデルはシャトルバスに限らずエレベーターや市電などの循環輸送システムに適用できる。循環バスでは乗客やバスの到着間隔が大きく変動することがたびたび起こる。その原因は以下の二つが考えられる：(1) バス停にやってくる乗客数の変動による場合と (2) バス間隔の変動による場合。ケース (1) の場合は自明であるので、ケース (2) の場合について定式化する。

非線形写像モデル

乗客がバスに乗る始点と乗客が降りる終点の間を M 台のシャトルバスが絶えず往復しているものとする。一台のバス i の最大乗客数を $F_{i,\max}$ とする。始点と終点の間の距離を L とし、バス i の平均速度を V_i とし、その平均速度は一定とする。ただしバス間の平均速度は異なるものとする。またバスは自由に他のバスを追い越すことができるものとする。バス i が始点に到着したとき、バス停に待っている乗客を $W_i(m)$ とする。ここで m はバスの巡回数を表す。

一人の乗客が始点でバスに乗り込むのにかかる時間を γ とし、 m 巡回目にバス i に乗り込む乗客数を $B_i(m)$ とする。このとき乗客がバスに乗るのに必要な時間は $\gamma B_i(m)$ となる。一方、一人の乗客が終点でバスから降りるのにかかる時間を η とすると、終点で乗客が全員降りるのに必要な時間は $\eta B_i(m)$ となる。バスは乗客の乗降時間だけバス停に止まっているものとする。このときバス i が始点から終点を巡って始点に戻る時間は次式で与えられる。

$$t_i(m+1) = t_i(m) + (\gamma + \eta)B_i(m) + \frac{2L}{V_i}. \quad (1)$$

ここで、 $i = 1, 2, 3, \dots, M$ 。 $t_i(m)$ はバス i が m 巡回目に始点に到着する時間を表し、 $2L/V_i$ はバス i が始点から終点を巡って始点に戻る移動時間を表す。

絶えず一定の割合 μ で乗客が始点にやってくるものとする、始点でバスを待つ乗客数 $W_i(m)$ は次式で与えられる。

$$W_i(m) = W_{i'}(m') - B_{i'}(m') + \mu(t_i(m) - t_{i'}(m')) + \xi_i(m). \quad (2)$$

バス i' はバス i が始点に到着する前に到着したバスを表す。右辺第 3 項はバス i' が始点を出発した後に新たにバス停に到着した乗客数を表す。また右辺第 4 項は新たにバス停に到着する乗客数の変動を表すノイズである。このとき m 巡回目にバス i に乗り込む乗客数 $B_i(m)$ は次式で表される。

$$B_i(m) = \min [F_{i,\max}, W_i(m)]. \quad (3)$$

(2)、(3)式はバス停で待つ乗客数がバスのキャパシティを越えた場合には、定員オーバーの乗客は次にやってくるバスを待つことを表現している。

一般化のために時間を特性時間 $2L/V_0$ (V_0 : 代表速度) で割って無次元化をすると次式が得られる。

$$T_i(m+1) = T_i(m) + \Gamma B_i(m) + \frac{V_0}{V_i}, \quad (4)$$

$$W_i(m) = W_i(m') - B_i(m') + \Pi(T_i(m) - T_i(m')) + \xi_i(m), \quad (5)$$

$$B_i(m) = \min [F_{i,\max}, W_i(m)]. \quad (6)$$

ここで、 $T_i(m) \equiv \frac{t_i(m)V_0}{2L}$, $\Gamma \equiv \frac{(\gamma + \eta)V_0}{2L}$, $\Pi \equiv \frac{\mu 2L}{V_0}$.

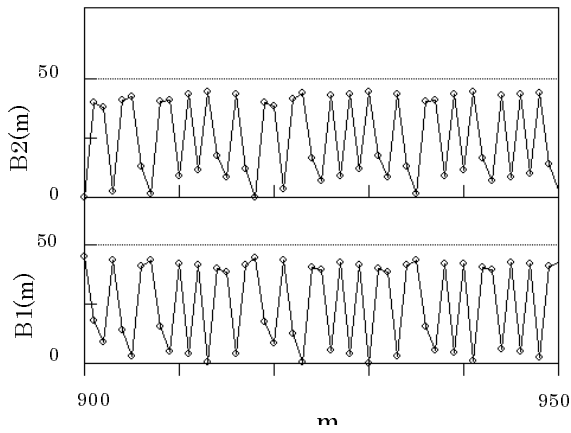
(4)–(6)式がシャトルバスのダイナミクスを表す非線形写像モデルである。

シミュレーション結果

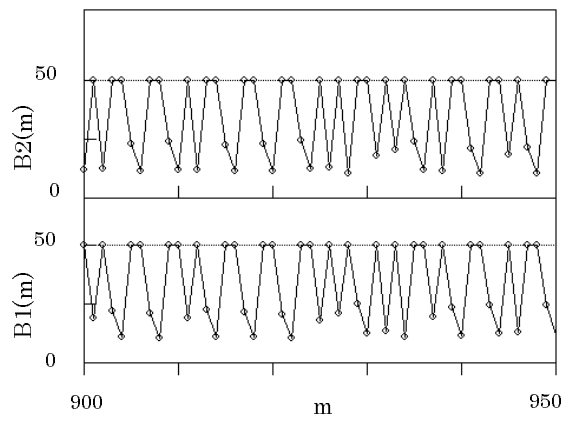
非線形写像(4)–(6)を繰り返し反復するとバスの挙動が計算される。2台のバスに対して得られた結果を以下に示す。図1は巡回数 m に対して乗客数をプロットしたものである。図中の破線はバスの定員50名を示す。(a)はバス停にやってくる乗客数が低い場合、(b)はその乗客数が多い場合である。バスの乗客は不規則に変動しているが、(b)では乗客数は1–2回ごとに満杯になる。図2(a)はバス停にやってくる乗客数のレートに対するバス乗客数をプロットしたものである。(b)はバス停にやってくる乗客数のレートに対するバスの到着時間間隔をプロットしたものである。図の黒い部分がカオス挙動を示す領域である。

図3は図2(a)にノイズを加えた場合である。図4は図2(a)の平均値と標準偏差を表したものである。次にバス1とバス2の速度が異なる場合(バス2の速度がバス1の2/3)を示す。図5は巡回数 m に対して乗客数をプロットしたものである。(a)はバス停にやってくる乗客数が低い場合、(b)はその乗客数が多い場合である。図6(a)はバス停にやってくる乗客数のレートに対するバス1の乗客数を、(b)はバス2の乗客数をプロットしたものである。図6の黒い部分がカオスを示す領域である。バスが満杯になると乗客変動は抑制されてカオスは消失する。図6を図2(a)と比較するとバス間に速度差が存在するとカオス領域が拡大する。すなわちバス間の速度差はカオスを助長することがわかる。

このように2台以上のシャトルバスが始点で乗客を乗せて終点まで乗客を運んで往復する場合、バスの到着時間間隔は不規則となり、バス中の乗客はカオス的な変動を起こすことが示される。シャトルバスのような交通輸送システムは、市電やエレベーターでも類似しており、ここで観察されるカオスは循環輸送システムで一般に観測されるものと期待される。

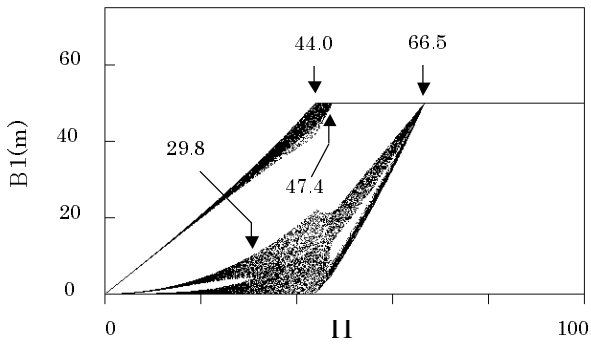


(a)

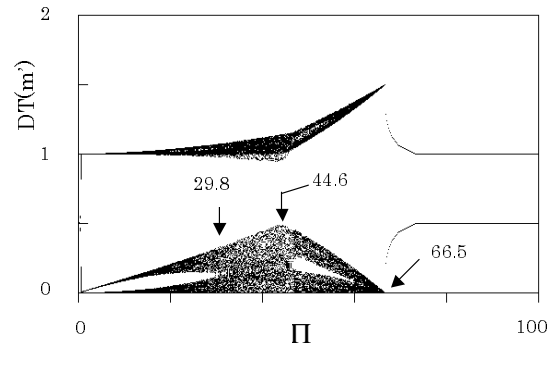


(b)

図 1. 巡回数 m に対して乗客数のプロット。

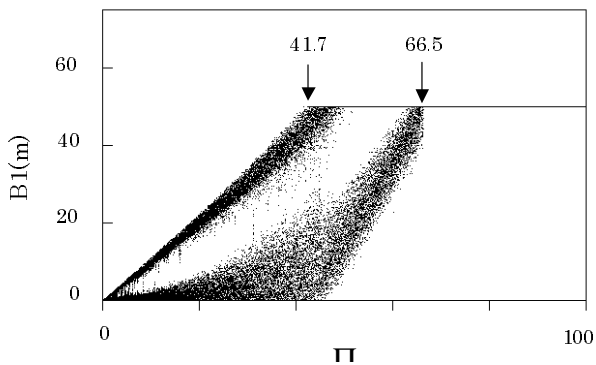


(a)

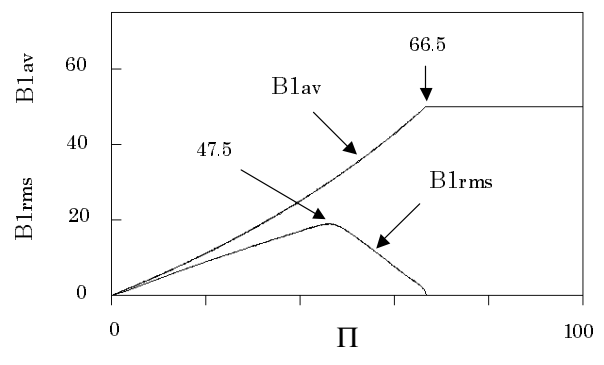


(b)

図 2. (a) バス停にやってくる乗客数のレートに対するバス乗客数のプロット。(b) バス停にやってくる乗客数のレートに対するバスの到着時間間隔のプロット



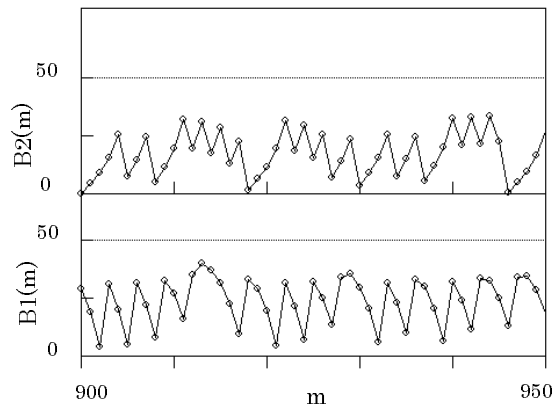
(a)



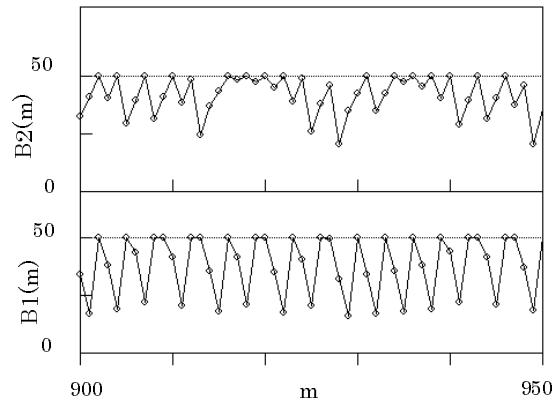
(b)

図 3. ノイズの影響。

図 4. 平均乗客数と標準偏差

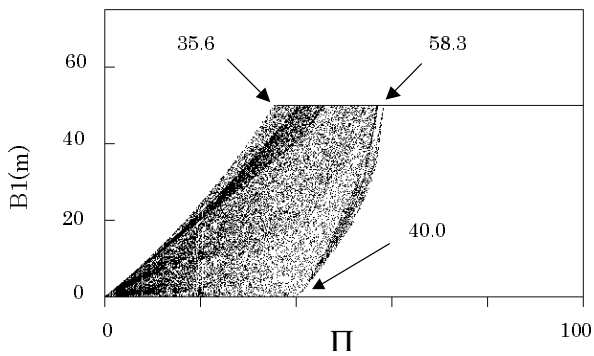


(a)

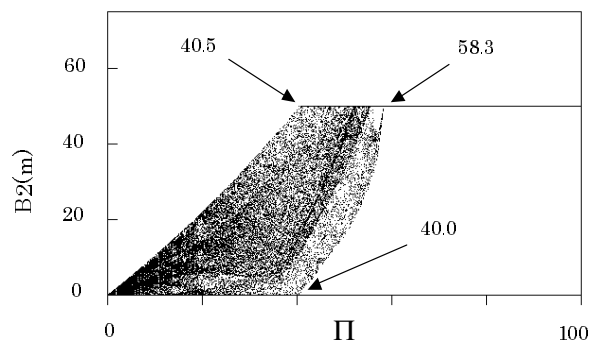


(b)

図5. 巡回数に対する乗客数のプロット。



(a)



(b)

図6. (a)バス停にやってくる乗客数のレートに対するバス1の乗客数のプロット。(b)バス2の乗客数のプロット。

参考文献

- [1] T. Nagatani, Fluctuation of riding passengers induced by chaotic motion of shuttle buses, Phys. Rev. E 68, 036107 (2003).
- [2] T. Nagatani, Complex behavior of elevators in peak traffic, Physica A 326, 556 (2003).
- [3] T. Nagatani, The physics of traffic jams, Rep. Prog. Phys. 65, 1331 (2002).