

米国のハブ空港における着陸・離陸挙動の解析

伊藤 秀剛¹, 西成 活裕²

¹ 東京大学 工学系研究科 航空宇宙工学専攻

² 東京大学 先端科学技術研究センター

概要

本論文では、米国のハブ空港における飛行機の発着挙動の解析を行った。米国の飛行機の発着挙動は等間隔ではなく、集中と過疎を繰り返す構造を持っている。この時、連続する二回の着陸（離陸）の間隔を考えると、この着陸（離陸）間隔の確率分布がべき分布であらわされることがわかる。これは、人間行動や自然現象にみられるもので、バースト性と呼ばれる。また、飛行機発着挙動のバースト性は、普遍的にべき分布の指数が $\alpha = 2.5$ になる。この現象が空港網のスケールフリー性や乗り継ぎを促進する必要性から生まれていることを示し、バースト性を再現するモデルを提案した。さらに、バースト性が実際に発着の遅れや乗り継ぎへ与える影響を考察した。

Analysis of arrival and departure behavior in U.S. hub airports

Hidetaka Ito¹, Katsuhiko Nishinari²

¹ Department of Aeronautics and Astronautics, School of Engineering, The University of Tokyo

² Research Center for Advanced Science and Technology, The University of Tokyo

Abstract

We analyze arrival and departure behavior in U.S. hub airports. U.S. aircraft's arrival (departure) behavior is heterogeneous. We study a probability distribution of inter-arrival (departure) times. The distribution of inter-arrival (departure) times in U.S. hub airports universally follows a power-law distribution with an exponent $\alpha = 2.5$. This behavior is called burstiness. We show that this universality originates from airport network's scale-free property and necessity of transit facilitation. The model based on them generates a probability distribution of inter-arrival (departure) times following a power-law with the exponent. Furthermore, we analyze how bursty behavior influence on delays of aircrafts and plane connection.

1 序論

車の交通流と共に、飛行機の交通流が近年注目されている。特に、空港網をネットワークであると考え、そのネットワーク上を飛行機という粒子が輸送されている現象であると考えられる視点により、流れの解析が行われている。空港網を静的ネットワークとして性質を考察した多くの研究が存在し、スケールフリー性（一部のハブ空港に発着が集中していることを示す）や、スモールワールド性（どの空港か

よりも比較的少ない空港を経由するだけで目的の空港に到着できることを示す）を空港網が有していることがわかっている [1]。しかし、ネットワーク上の輸送現象の観点からは研究が進んでいない状態である。

一方、ネットワークの個々のノードに注目し、イベントの挙動を分析する手法も近年行われている。その中で特に関心を持たれている現象がバースト性である。バースト性の有無を判断するためには、イベント間隔時間分布を用いる。これは、統計的にイベントの集中度合いを評価するために使われる。こ

ここで、本論文においてイベントは飛行機の離陸や着陸一回に相当する。離陸と着陸は分けて考えるため、イベントが離陸に相当する場合もあれば、着陸に相当する場合もある。これを統合して、イベントと呼ぶこととする。イベント間隔時間分布について説明を行う。連続する二回のイベントを考える。そのイベントの発生時間の差がイベント間隔時間である。連続する二回のイベントは、イベントの総数を N とすれば、 $N - 1$ の組み合わせが存在するため、この数だけイベント間隔時間の値を得られる。そして、これらの値とその発生回数を確率分布としてプロットを行いイベント間隔時間分布を得る。この分布が指数分布になっていれば、イベントの発生はポアソン過程であると言え、この分布がべき分布になっていれば、バースト性があると判断できる。バースト性とは、イベントの集中を意味しており、ランダムに発生する現象よりはるかにイベントの発生が偏っていることを示すもので、二つのイベント間隔の確率分布がカットオフが付いたべき分布

$$p(\tau) = e^{-\frac{\tau}{\tau_0}} \tau^{-\alpha} \quad (1)$$

であらわされることによって表現される [2]。この性質は、人間行動（電話の発信など）や自然現象（地震の発生間隔）などに共通する普遍的現象である。ここで本論文では、このような性質が飛行機の交通流にも存在しているのかどうか、実際の発着挙動のデータを解析することによって示す。また、この性質とネットワークそのものとの関係や、飛行機の遅延といった実務上重要な要素にこの性質がどのように影響するかについて解析を行う。

2 米国ハブ空港における離着陸挙動のバースト性

2014年1月における米国運輸統計局の発着パフォーマンスデータ [3] を用いて、米国の主要ハブ空港における発着陸の間隔時間の分布を考える。アトランタ国際空港とロサンゼルス国際空港におけるイベント時間間隔分布が図1である。この二つの国際空港は米国において2014年における搭乗顧客数が最も多い二つの空港である。灰色の実線は指数分布である。これらのイベント時間間隔の分布は、指数分布よりはるかにテールが長い分布となっており、カットオフのある、指数が2.5のべき分布

$$p(\tau) \sim e^{-\frac{\tau}{\tau_0}} \tau^{-2.5} \quad (2)$$

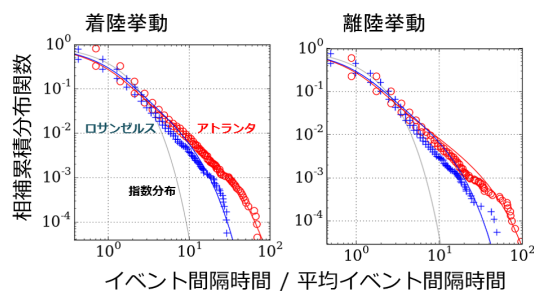


図1: アトランタ国際空港とロサンゼルス国際空港におけるイベント時間間隔分布

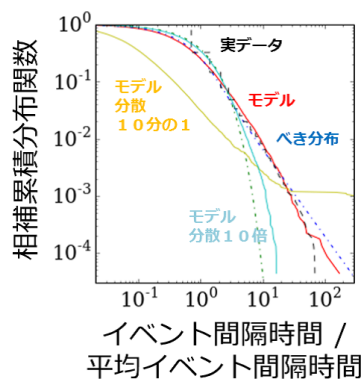


図2: アトランタ国際空港の実データと提案されたモデルのイベント時間間隔分布の比較

を示すことがわかる [4]。このことより、これらの二空港において着陸と離陸の挙動はバースト性を持っていることが示された。また、米国ハブ空港の離着陸挙動のバースト性はこれら主要二空港に限られたものではなく、米国の主要ハブ空港に共通する現象である [4]。

3 米国ハブ空港におけるバースト性の起因

続いて、この米国ハブ空港におけるバースト性が何に起因しているのかを考察する。米国の空港網はスケールフリー性を有している。このスケールフリー性と、航空交通が主要な輸送手段であることから、ある空港から移動できる空港の数を多くする取り組みがなされている。それが、乗り継ぎの利便性の強化である。ある便から乗り継げる便の数を増やすためには、その便の着陸時間から適当な時間内に多くの飛行機が離陸する必要がある。それを可能にしているのが、バースト性を持った離着陸挙動である。

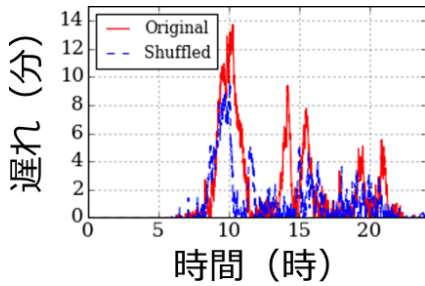


図 3: 渋滞によって発生する遅延の比較

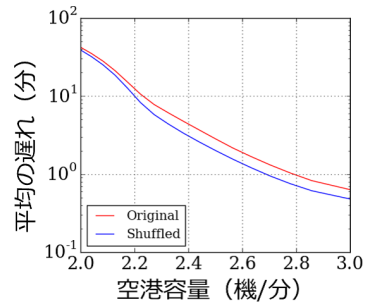


図 4: 渋滞遅延の平均値と空港容量との関係

着陸と離陸を交互に集中させることによって、ある便の着陸から一定時間後の離陸便の数を増やすことができる [4]。

このメカニズムにより、発着時間分布がべき性を持つことを示すため、モデルを提案する。このモデルでは、前章にて言及した発着の集中を示す発着挙動として、あるいくつかの決められた時間に多くの飛行機が一斉に離陸を行い、同様に着陸も複数の決められた時間に行われることとする。この着陸（離陸）の時間を μ_i (i 番目) とおく。この μ_i は実際のデータを基に、着陸（離陸）が集中している時間に設定する。ただし、これはスケジュール上の発着時間であり、実際の発着時間は遅れなどの影響で前後する。この遅れの影響が正規分布に従う $\mathcal{N}(\mu_{delay}, \sigma^2)$ とする。以上より、このモデルでは、ある時間 t に飛行機が着陸（離陸）を行う確率が

$$f(t) = \sum_i \frac{c_i}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-\mu_i)^2}{2\sigma^2}} \quad (3)$$

であると表すことができる。ただし、 $\bar{\mu}_i = \mu_i + \mu_{delay}$ とおいた。

このモデルで得たイベント間隔時間分布を図 2 に示す。このシミュレーションにおいては、米国の便の遅れを分析した論文 [5] を基に、 $\mu_{delay} = -2.73$ 分、 $\sigma = 13.75$ 分であると定めた。黒い実線が実際のアトランタ空港での着陸のデータであり、赤い線がモデルで再現したものである。また、青い線は漸近的に指数 2.5 のべき分布となる関数である。実際のデータとモデルは非常によく一致しており、どちらもカットオフのある指数 2.5 のべき分布となっていることがわかる。このことから、乗り継ぎの利便性を高めるために発着を集中させることを表現したこのモデルが、イベント間隔時間分布が指数 2.5 のべき分布となるという、米国航空交通におけるバースト性を説明するものであるということが示された

[4]。また、着陸が集中する時間、正規分布の平均や分散を変えてもモデルはバースト性を持つ。それは、着陸（離陸）が集中している二つの時間帯の間が、定数項と二次のオーダーの関数の和で表わされる限り、バースト性が現れるからである [4]。ただし、正規分布の分散が大きいと、着陸（離陸）確率が平坦化されることにより、べき分布のカットオフ指数が小さくなっていき、指数分布に近づく。また、正規分布の分散が小さいと、着陸（離陸）が集中している二つの時間帯の間が、指数分布型の減衰となるため、べき指数が 2 に近づく。分散を 10 倍、10 分の 1 にした結果を図 2 に示した。

4 バースト性による影響

以上の結果をふまえ、このバースト性によって飛行機の定時性や乗り継げる便数に対して、どのような影響を与えるのかを考察する。

まず、バースト性による渋滞遅延への影響について考察する。バースト性は発着の集中を意味するため、集中による遅延が発生する。その影響を評価するために、実際のデータを使用した場合と、発着時間をシャッフルした場合で遅延時間を比較する。ここで、実際の飛行機の発着時間のデータはすでに渋滞遅延の影響を含んでいるため使用できない。そのため、今回の考察では飛行機の発着時間をスケジュールでの発着時間に正規分布に従う遅れが生じると仮定して決定した。また、シャッフルの方法については、120 分毎に時間を区切り、その中でランダムな時間をスケジュールの発着時間とすると定めた。これにより、細かい時間での集中（バースト性）は失われるが、深夜に発着量が少ないなどのバースト性に関係しない発着量の性質は保持される。また、空港の発着量に容量を設定し、渋滞遅延の発生は、そ

の容量を超えた場合に渋滞が発生し遅延すると設定した。航空容量を一分あたり $c = 2.5$ 機とした場合の結果を図3に示す。バースト性のあるオリジナルの発着スケジュールであると、特定の時間に大きな遅延が発生することがわかる。これによって、平均的な遅延時間はバースト性のないシャッフルを行った場合と比べて増加することになる。

そこで、平均的な遅延時間と航空容量の関係を図4に示す。この図によると、航空容量が一分あたり $c = 2.5$ 機である時、平均遅延時間はバースト性がある場合に約一分増加し、これは42パーセントの増加に相当する。バースト性がある場合に、バースト性がない場合と同じ平均遅延時間に抑えるためには、航空容量を一分間に0.1機増加させる必要がある。また、天候が悪くなると航空容量が減少する。この時の遅延について考察すると、どのような観点から議論を行うかにより、結果の解釈が異なる。平均遅延時間の差の観点からは、平均の遅れは航空容量の減少に対して指数関数的な増加を見せるため、バースト性がある場合の影響は大きくなると言える。しかしながら、同じ平均遅延時間に抑えるために必要な航空容量の観点からは、バースト性がある場合とない場合における平均遅延時間の比が1に近づくことから、バースト性の影響は小さくなると言える。これは、バースト性による短い周期での飛行機発着の集中よりも、長期間にわたる発着容量の超過による遅延の影響が大きくなるためである。

次に、乗り継ぎできる便数について考察する。ある便を利用して空港に到着した乗客が乗継できる便数は、便の到着から45分から75分間に離陸する便の数ということとする。これ以上短い時間は乗り継ぎに失敗する可能性が高く、逆に乗り継ぎ時間が長いと乗り継ぎが行われなため、この時間を最適な乗り継ぎ時間と設定した。実際に、米国の乗客の乗り継ぎ人数の分析 [6] によると、この乗り継ぎ時間での乗り継ぎ数が多いことがわかり、乗り継ぎに最適であると判断されていることがわかる。図5が乗り継ぎできる便数を表したグラフである。横軸は月初めの便を1として数えて、何便目に空港に到着した便かを表している。この図からわかるとおり、バースト性があると乗り継ぎできる便数が増減する。これは、発着が集中している時間帯の便は乗り継げる便が多いことを示す。この効果によって、乗り継ぎ可能な便の数の平均値は増加することがわかる。

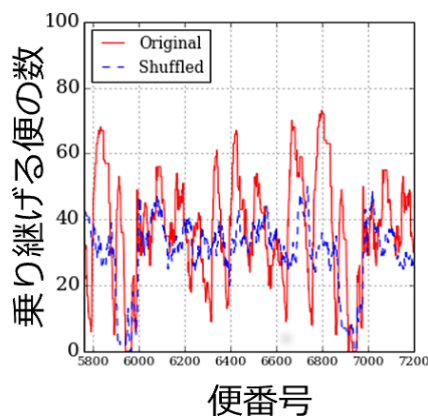


図5: 到着した便から乗り継ぎできる時間内に離陸する便の数

5 結論

本論文では、空港での飛行機の発着挙動にみられるバースト性について、その有無、原因、そして影響について解析した。バースト性により着陸（離陸）間隔時間分布はべき分布であらわされ、この性質は空港網の性質と乗り継ぎの必要性によって生まれていることが、モデルによって再現された。また、バースト性によって遅延時間は増加するが、乗り継ぎ可能な便数は増加していることがわかった。この性質が航空システムにとって有益かどうかはさらなる検証が必要である。これは、今後の課題としていきたい。

参考文献

- [1] Roger Guimera, Stefano Mossa, Adrian Turttschi, and LA Nunes Amaral. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 102(22):7794–7799, 2005.
- [2] Albert-Laszlo Barabási. *Nature (London)*, 435(7039):207–211, 2005.
- [3] Bureau of Transportation Statistics (BTS). <http://www.transtats.bts.gov/>, 2014.
- [4] Hidetaka Ito and Katsuhiko Nishinari. *arXiv preprint arXiv:1508.07862*, 2015.
- [5] Eric R Mueller and Gano B Chatterji. In *AIAA aircraft technology, integration and operations (ATIO) conference*, 2002.
- [6] Cynthia Barnhart, Douglas Fearing, and Vikrant Vaze. *Oper. Res.*, 62(3):580–601, 2014.