

---

## 「つながり」から見る航空システム — 航空ネットワークの構造と遅延伝播 —

東京科学大学 環境・社会理工学院 融合理工学系  
杉下佳辰

### はじめに

空港と空港を結ぶ路線、そこを行き交う航空機、移動する乗客や貨物。これらは複雑な「つながり」の中で機能しています。私はこれまで、ネットワーク科学という学問領域に関心を持って研究を進めてきました。ネットワーク科学とは、ものごとの「つながり」に着目し、その構造や振る舞いを数理的に理解しようとする学問です。『研究の窓』第4回となる本稿では、このような視点から航空システムを捉え、航空ネットワークの構造や時間的变化、そして遅延伝播に関する研究についてご紹介します。

### 航空システムをネットワークとして捉える

航空システムは、空港を「点（ノード）」、路線を「線（リンク）」とするネットワークとして表現できます。例えば、図1は2024年1月1日の世界の航空ネットワークを可視化したものです。このネットワークのノード数は3,727、リンク数は21,784です。この巨大なネットワークを見ると、航空輸送がいかに多くの空港や路線によって構成されているかが分かります。しかし、単に図を眺めるだけではシステムの特徴を十分に理解することはできません。そこで、さまざまな手法を用いて分析し、航空システムの構造的な特徴やその振る舞いを明らかにしていきます。

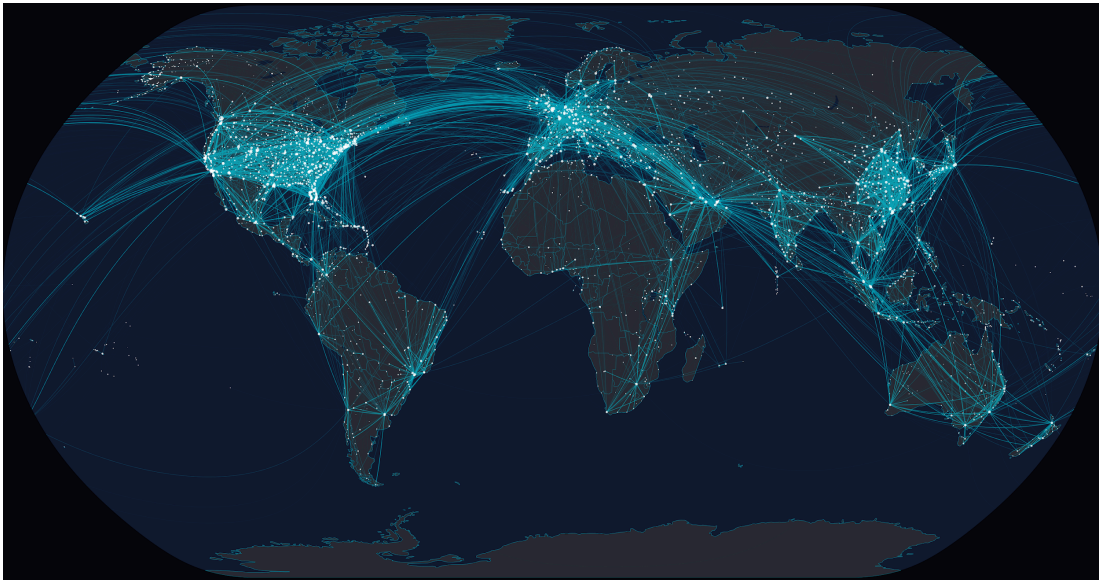


図1 2024年1月1日の世界の航空ネットワーク:OAG運航実績データを基に作成  
航空ネットワークは時間とともに変化する

航空ネットワークの重要な特徴のひとつとして、「時間とともに変化する」とが挙げられます。一日の中でも時々刻々と変化していますし、より長い時間スケールで見れば、新しい路線の開設や撤退などによって長期的にも変化しています。

---

このような動的システムを理解するために、私たちはテンポラル・ネットワークという理論的枠組みを用いて、アメリカの航空会社4社の約30年間にわたるネットワーク構造の変化を分析しました<sup>1</sup>。図2はその分析結果の一部を示したものです。この図は、異なる月におけるネットワーク同士の構造的な非類似度を表しています。2つのネットワークにおいて重複する路線の割合が小さいほど、非類似度は大きくなります。対角成分は同一ネットワーク同士の比較であるため非類似度はゼロとなり、色が明るいほどネットワーク構造が大きく異なることを意味します。

この非類似度行列を分析することで、航空ネットワーク構造の時間的変化を明らかにすることができます。例えば、アメリカン航空では格子状のパターンが確認されますが、これは季節的な周期変動を反映していると考えられます。ユナイテッド航空では2012年頃を境に明確なブロック構造が現れており、これはコンチネンタル航空との合併によるネットワークの急激な変化を示唆しています。サウスウエスト航空に特に顕著な帯状のパターンは、ネットワーク構造が頻繁に変化していることを示唆しています。このように、テンポラル・ネットワークの枠組みを導入することで、航空ネットワークのダイナミックな変化を捉えることが可能となります。

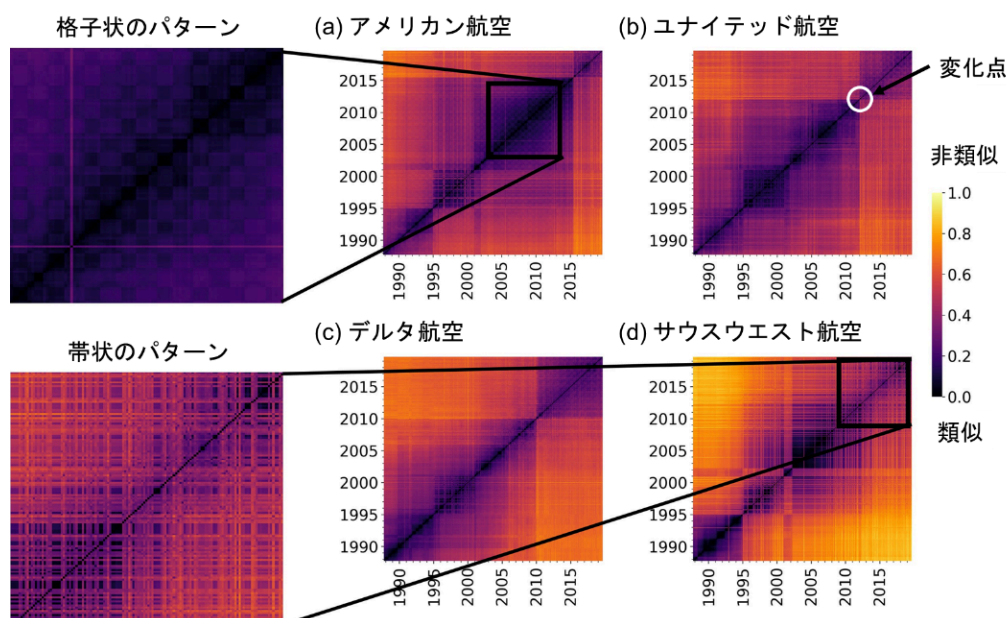


図2 アメリカの航空会社4社の非類似度を表す行列（1987年～2019年）

### 複雑なシステムの中で広がる遅延

ここまで、航空ネットワークの構造的な複雑性とその時間変化について説明してきました。このような複雑なシステムで発生する重要な問題のひとつが遅延です。航空機の遅れは、天候、空港の混雑、機材トラブルなどさまざまな要因によって発生します。しかし問題は、それが一つのフライトだけで終わらないことです。航空機は一日に複数のフライトを運航し、乗客は複数のフライトを乗り継ぎます。また空港の運用能力にも限界があります。そのため、ある場所で発生した遅れが別の空港やフライトへと広がる場合があります。これが遅延伝播です。しかし、遅延がどのように広がるのかという問題は非常に複雑であり、十分に解明されていません。そこで私たちは、航空ネットワークにおける遅延伝播の研究に取り組んできました。以下では、その中から3つの研究を紹介します。

<sup>1</sup> Sugishita, K., Masuda, N. (2021). Recurrence in the evolution of air transport networks. *Scientific Reports*, 11(1), 5514.

### 航空遅延研究① — 遅延伝播の構造分析

私たちの最初の研究では、日本の航空システムにおける遅延伝播の構造に焦点を当てて分析しました<sup>2</sup>。具体的には、2019年の一年間を対象として、航空ネットワークと遅延因果ネットワークと呼ばれる2種類のネットワークを構築しました(図3)。前者はノードが空港、リンクが直行便を表す、図1でも示したような通常の航空ネットワークです。一方で後者は、ノードが空港、リンクが遅延伝播(ある種の)因果関係を表しています。ここで用いたのがグレンジャー因果性という統計的手法です。これは、ある時系列の過去の情報が、別の時系列の将来の値の予測精度を有意に向上させるかどうかを検証する方法であり、時間的な先行関係に基づく遅延伝播の方向性を推定しています。このため、遅延因果のリンクは直行便の有無に依らずに張られます。また、ハブ空港であっても遅延因果のリンクの数が多くなるとは限りません。

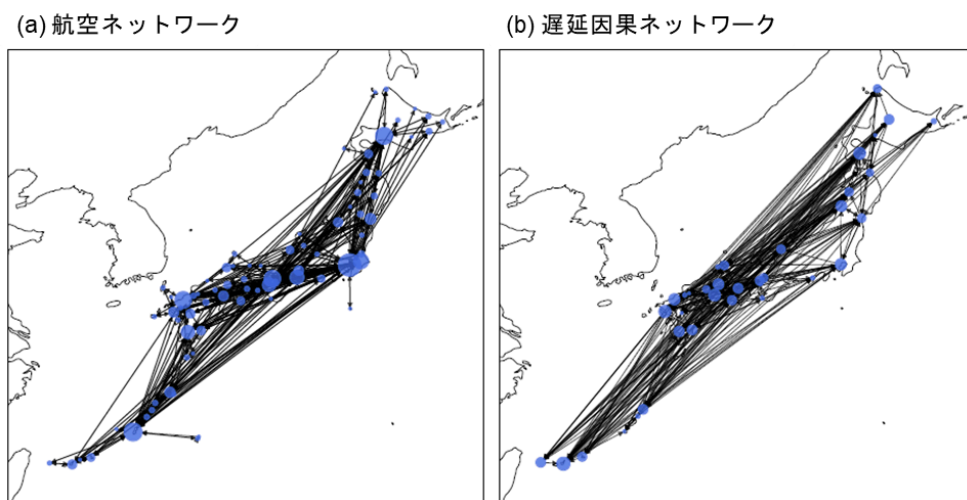


図3 2019年1月1日における(a)航空ネットワークと(b)遅延因果ネットワーク

図3のような2種類のネットワークを1日ごとに2019年の一年間にわたって構築・分析した結果、遅延伝播のパターンは複数のグループに分類できることがわかりました。また、遅延伝播はランダムに拡散するのではなく、特定の方向に沿って連鎖的に広がる傾向が確認されました。さらに、ANAとJALでは航空ネットワークの構造は比較的類似しているにもかかわらず、遅延伝播のパターンには顕著な違いが見られました。この結果は、遅延伝播が単なる路線構造だけでは説明できず、運航オペレーションやスケジューリング戦略といった要因も大きく影響している可能性を示唆しています。

### 航空遅延研究② — 遅延伝播のメカニズム

研究①では遅延伝播の構造を明らかにしました。しかし、その背後にあるメカニズムについてはわかりません。そこで次に問うべきは「なぜその構造になるのか」ということです。この問いに答えるため、私たちはエージェントベースモデルを用いたシミュレーターを開発しました。このモデルでは各航空機を個別のエージェントとして扱い、運航過程で遅延がどのように発生し、どのように伝播していくのかを表現します。モデルには、遅延伝播の主な要因として①機体の連続的な使用、②乗客の乗り継ぎ待ち、③空港の混雑、④確率的外乱、⑤飛行時間の変動の5つを組み込んでいます。

<sup>2</sup> Sugishita, K., Arisawa, K., Hanaoka, S. (2024). Delay propagation patterns in Japan's domestic air transport network. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 27, 101235.

ここでは機体の連続的な使用による遅延伝播について説明します。航空機は一日に複数のフライトを運航します。図4はある機体のスケジュールを表しています。図中のサービスタイムとは、次のフライトに向けた準備に必要な時間を表しています。つまり、乗客の乗り降り、燃料の補給、清掃等がこの時間に含まれます。この状況でフライト*i*が遅延したとします。この遅延が小さければ、図中のバッファ（余裕時間）で吸収できるため、次のフライト（*i* + 1番目のフライト）は遅延せずに済みます。しかし、遅延が大きくなると、バッファでは吸収しきれず、次の便も遅延してしまいます。これが機体の連続的な使用による遅延伝播です。

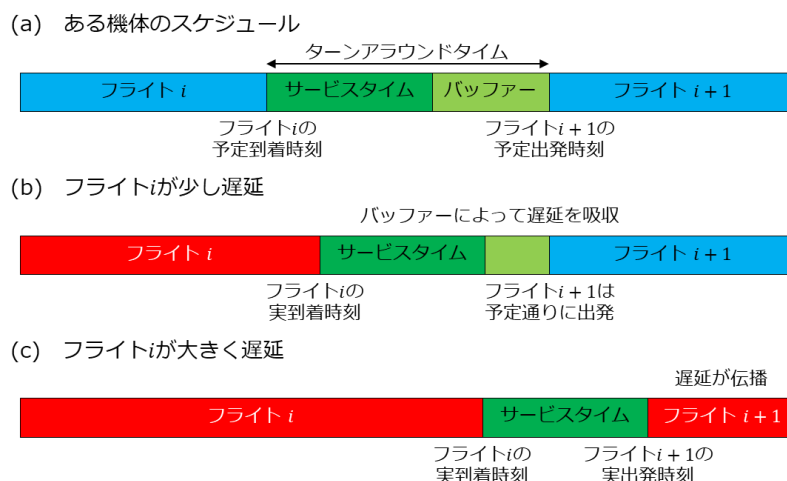


図4 機体の連続的な使用による遅延の伝播

私たちは開発した遅延伝播モデルを、2024年の日本の航空システムに適用しました。その結果、モデルは現実の遅延伝播のパターンを比較的よく再現できることが確認されました。具体的には、遅延がほとんど発生しない日から大きな遅延が広がる日まで、さまざまな状況において、遅延がどの時間帯にどの程度広がるかというネットワーク全体の振る舞いを再現できることが示されました。さらに、遅延伝播の要因を分析すると、機体の連続的な使用が遅延伝播の構造的な骨格を形成し、その上で空港の混雑や確率的な外乱が遅延を増幅する主な役割を果たしていることが示唆されました（図5）。

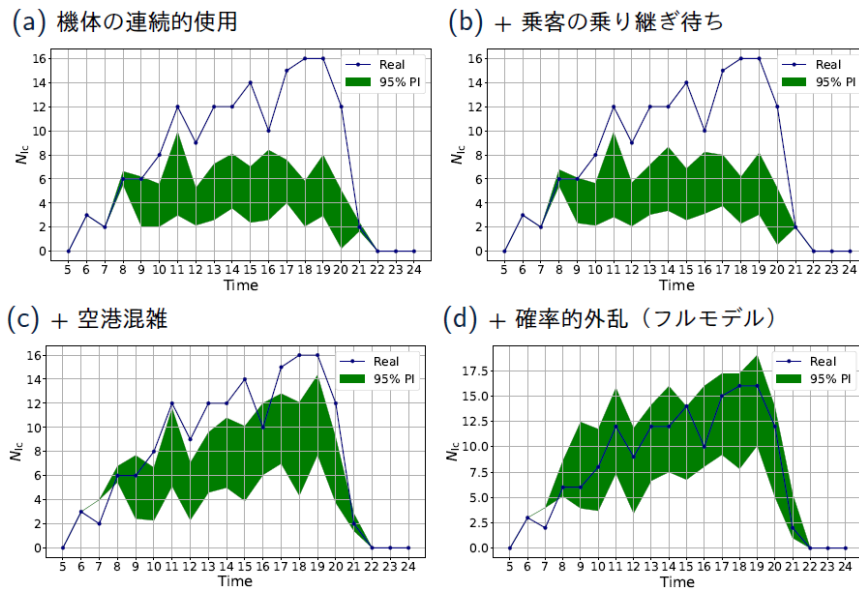


図5 遅延伝播モデルの適用結果（2024年6月24日）：横軸は時間、縦軸は遅延に巻き込まれている空港の数、青線が実際の遅延伝播、緑の領域がモデルの出力結果を表す。

### 航空遅延研究③ — 遅延軽減策

遅延伝播のメカニズムが理解できると、次に重要になるのは「どのように遅延を抑えるか」という問題です。現在、株式会社JAL航空みらいラボとの共同研究として、実際の運航データを分析しながら、効果的な遅延軽減策に関する研究を進めています。

航空会社は、遅延が発生した場合、機材の入れ替え、予備機材の投入、欠航といった運航の判断を行います。例えば、図6の赤い機材が遅延している場合、同一機材を使用

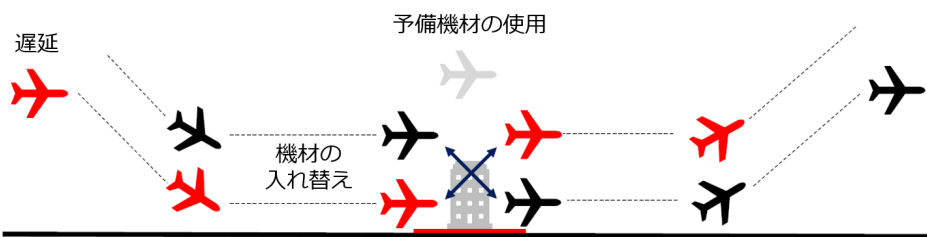


図6 機材の入れ替えと予備機材の使用による遅延軽減

する次の便にも遅延が伝播する可能性があります。このような状況で、もし黒い機材が利用可能であれば、両機材の担当便を入れ替えて遅延の伝播を防ぐことができる可能性があります。同様に、予備機材を投入して遅延を軽減できる場合もあります。

本研究では、数理最適化モデルを用いて、遅延や運航に伴うコストを考慮しながら、遅延軽減策の効果を分析しました。その結果、遅延の規模によって機材の入れ替えによる効果が変わることが明らかになりました（図7(a)）。また、運航終了時に各機材が翌日の計画どおりに運用できる状態に戻るという制約を考慮しないと、回復効果を過大に評価する可能性も示されました。さらに、モデルの出力結果

が実際の運航に近いことを確認した上で、羽田空港以外での機材の入れ替えが有効である可能性も示唆されました（図7(b)）。これらの結果は、遅延発生時の対応をより体系的に理解する手がかりとなり、航空会社の運航管理における意思決定の高度化に寄与することが期待されます。

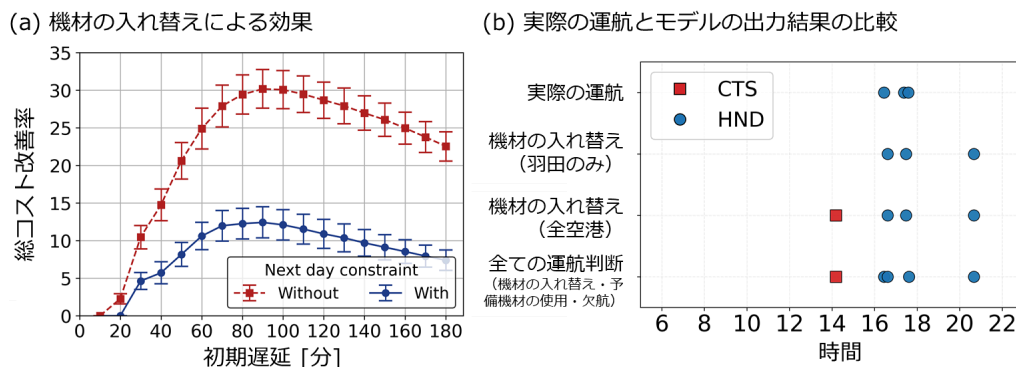


図7 (a)機材の入れ替えによる効果と(b)実際の運航とモデルの出力結果の比較：(a) 総コスト改善率は機材の入れ替えをしない場合を基準とする。青い線は翌日のスケジュールとの整合性を制約として入れた場合、赤い線は入れない場合を示す。(b)各プロットは機材の入れ替えの実施を表す（CTS：新千歳空港、HND：羽田空港）。

#### おわりに

本稿では、航空システムを「つながり」の観点から捉え、航空ネットワークの構造や時間的变化、そして遅延伝播の研究について紹介しました。航空システムは、さまざまな主体が相互に関係しながら成り立つ複雑なシステムです。その振る舞いを理解するためには、個々のフライトだけを見るのではなく、システム全体の構造や相互作用に目を向けることが重要になります。

近年、航空データの整備や計算能力の向上により、航空ネットワークを対象とした研究は大きく進展しています。遅延の発生や伝播の仕組みを明らかにすることは、航空システムの安定性や効率性を高めるうえで重要な課題です。今後も科学的なアプローチによる実務的な課題の解決を目指し、産学双方に価値を創出するような研究に取り組んでいきたいと考えています。