

令和 6 年 6 月 25 日現在

機関番号：12608

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2019～2023

課題番号：19K23531

研究課題名（和文）多層ネットワーク解析に基づく交通システムのリスクマネジメント

研究課題名（英文）Risk management of transportation systems based on multilayer network analysis

研究代表者

杉下 佳辰 (Sugishita, Kashin)

東京工業大学・環境・社会理工学院・助教

研究者番号：70845263

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、ネットワーク科学において急速に研究が進展している多層ネットワークに関する最新の知見を、交通システムへと応用するアプローチを取り、異常事象に対する交通ネットワークマネジメントの新たな理論基盤を構築することを目的とする。主な研究成果としては、(1) 交通工学とネットワーク科学における脆弱性研究の引用ネットワーク解析、(2) テンポラル・ネットワークの発展パターン解析手法の提案と米国主要航空会社への適用、(3) コロナ禍における米国航空会社のネットワーク構造変化の解析、(4) 航空ネットワークにおける空港閉鎖の影響評価、(5) 航空連合の効率性・頑健性評価を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の学術的意義は、多層ネットワークやテンポラル・ネットワークを含むネットワーク科学の最先端理論を交通システムのリスクマネジメントへと応用した点にある。特に、航空ネットワークの時系列的な構造変化を定量的に分析し、長期的な成長だけでなく、パンデミック時の短期的な変動に関する新たな知見を得た。また、ある空港が閉鎖した場合の航空ネットワーク全体への影響を分析する新たな手法も開発した。これらの成果は、自然災害やパンデミックなどの非常時における効果的な航空ネットワークマネジメントを考える理論基盤を提供しており、社会的意義も大きいと考える。

研究成果の概要（英文）：This study aims to establish a new theoretical foundation for managing transportation networks in response to emergent situations by applying the latest insights from rapidly advancing research on multilayer networks in network science to transportation systems. The main research outcomes include: (1) a citation network analysis of vulnerability studies in transportation and network science, (2) proposing a new method for analyzing evolution patterns in temporal networks and its application to four major US airlines, (3) an analysis of changes in the network structure of US airlines during the COVID-19 pandemic, (4) an impact assessment of airport closures on air transport networks, and (5) an evaluation of the efficiency and robustness of airline alliances.

研究分野：ネットワーク科学、交通工学

キーワード：脆弱性 航空システム ネットワーク科学 多層ネットワーク テンポラル・ネットワーク

様式 C-19、F-19-1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

多層性を有するネットワークシステムにおいては、ひとつのシステムで発生した障害は別のシステムにまで波及する危険性がある。本研究では、近年、ネットワーク科学において急速に研究が進展している多層ネットワークに関する最新の知見を、交通システムへと応用するアプローチを取り、異常事象に対する交通ネットワークマネジメントの新たな理論基盤を構築することを目的とする。

2. 研究の目的

(1) 近年、交通工学とネットワーク科学の両分野におけるネットワークの脆弱性に関する研究が急速に進展している。両分野は密接に関連しているにもかかわらず、その全体構造は依然として明確ではない。本研究では、両分野の既存研究の全体像を、包括的かつ客観的に明確化することを目的とする。

(2) 各航空会社のネットワークは、社会経済的事象や企業戦略を反映して、時間的に変化している。本研究では、このような時間的にネットワーク構造が変化するシステムの発展パターンを定量的に解析する新たなフレームワークを提案する。また、提案手法を適用することで、アメリカの大手航空会社4社（アメリカン、ユナイテッド、デルタ、サウスウエスト）のネットワークの時系列的な構造変化を定量的に明らかにする。

(3) COVID-19パンデミックは航空業界に深刻な影響を与えた。このような緊急事態においては、航空政策がネットワークの接続性を担保しつつ、航空会社間の競争を維持することが重要である。本研究では、2019年1月から2021年12月までの17の米国国内航空会社のネットワークの日々の動態を明らかにすることを目的とする。

(4) ある空港が閉鎖した場合に代替して利用される空港を特定し、重み付き航空ネットワークにおけるバックアップ特性を分析するためのフレームワークを提案する。また、提案手法の有用性を明らかにするために、既存の重み付けのないネットワーク分析手法との比較も行う。

(5) 航空連合は、航空会社が加盟・脱退しながら複雑に変化する。本研究では、三大航空連合（スターアライアンス、スカイチーム、ワンワールド）における効率性と脆弱性の時間的推移を明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 交通工学とネットワーク科学の両分野における脆弱性研究について、引用ネットワーク解析を行った。まず、オンライン出版データベースであるWeb of Scienceから出版記録を収集し、ノードとエッジがそれぞれ出版物と引用関係を表す引用ネットワークを構築した。次に、705ノードと4,584エッジから構成される巨大弱連結成分を抽出し、これを分析した。この巨大弱連結成分に対して、コミュニティ検出、メインパス分析を含むネットワーク解析を行った。

(2) 本研究では、離散時間における再帰性（recurrence）の観点から、テンポラル・ネットワークの発展パターンを分析するための新たなフレームワークを提案する。再帰性とは、ネットワーク構造が過去と比較的近い状態に戻ることを意味する。提案した手法を、1987年から2019年までの米国の主要航空会社4社に適用した。

(3) (2)で提案した手法を適用した。さらに、リンク予測手法を適用することで、ネットワークの回復過程を分析した。

(4) ある空港の閉鎖が航空ネットワーク全体に与える影響を定量的に評価するフレームワークを提案した。具体的には、ある空港の閉鎖に伴う迂回トラフィックを処理する空港を特定し、その関係性に基づいて有向重み付きネットワークを構築・分析した。

(5) 本研究では、各航空連合のネットワーク効率性と脆弱性の変化を評価した。また、航空会社が脱退した場合に航空連合全体に及ぼす影響についても評価を行った。

4. 研究成果

(1) コミュニティ検出によって、主要な研究領域を明らかにした（図1参照）。検出された主要な研究領域には、多層ネットワークも含まれていた。次に、メインパス分析を適用することで、検出されたコミュニティ内における、主要な研究の発展を明らかにした。さらに、交通工学とネットワーク科学の両分野間の非対称な引用パターンを定量的に明らかにした。これは、両分野間の相互理解が依然として不足していることを示唆している。これらの成果を査読付き学術雑誌Public Transportで発表した。

(2) 提案手法を米国主要航空会社4社に適用した結果、各社のネットワークは、自己相関、周期性の強さ、これらの量の変化において異なることが明らかになった。また、個々の航空会社のネットワーク構造は、時折急激に変化することも判明した。このようなネットワークの急激な変化は、航空業界と密接に関連するように思われる社会経済的事象よりも、各社のハブ空港における運用の変化を反映していた（図2参照）。また、サウスウエスト航空のユニークな発展パターンも明らかとなった。なお、提案手法は、航空連合の発展や自然災害・感染症への対応を明らかに

するのに有用であると期待されるだけでなく、社会的、生物学的、およびその他のネットワークの進化を特徴付けることにも適用可能である。この成果を査読付き学術雑誌Scientific Reportsで発表した。

(3) ノードとエッジの数は2021年7月頃にはパンデミック前の水準に戻ったものの、そのネットワーク構造は依然としてパンデミック前と大きく異なることがわかった。また、ネットワークの構造変化は、航空会社ごとに大きく異なった(図3参照)。フルサービスキャリアはネットワーク構造の変更柔軟性がなく、収益損失が大きかったのに対し、ほとんどの地域航空会社は完全に新しい構造に移行し、収益損失を抑えることができた可能性がある。格安航空会社は航空会社間で顕著な違いがあり、国家緊急事態宣言直後にネットワーク構造を劇的に変更していた。最後に、回復過程を分析した結果、ネットワークの中でより中心に位置し、共通の隣接空港が多い空港を結ぶ便や、接続数の多い空港を結ぶ便が、ほとんどの航空会社で早期に回復する傾向があることもわかった。これらの成果を査読付き学術雑誌Journal of Air Transport Managementで発表した。

(4) 航空ネットワークにおいて、ある空港が閉鎖した場合に代替して利用される空港を特定し、航空ネットワーク全体の頑健性を評価した。2012年~2021年における日本の国内航空網に対して提案手法を適用した。その結果、空港の代替関係における異質性と一方向性を明らかにした。これは、リンクの重みを考慮しない従来手法では明らかにできない性質であり、新たな知見が得られたと言える。また、空港のバックアップ特性から上述の期間は、3つの期間に大きく分けられることもわかった。これらの成果を2023年7月に開催された航空に関する国際会議であるATRS 2023で発表を行った。また、論文を学術雑誌へと投稿し、現在査読中である。

(5) COVID-19パンデミック前において、三大航空連合はいずれもネットワーク効率性を増加させていた。また、スターアライアンスはより頑健なネットワーク構造へと変化していた。アメリカの航空会社の脱退の影響は減少傾向にある一方、トルコ航空とカタール航空が脱退した場合の影響は増加傾向にあることもわかった。

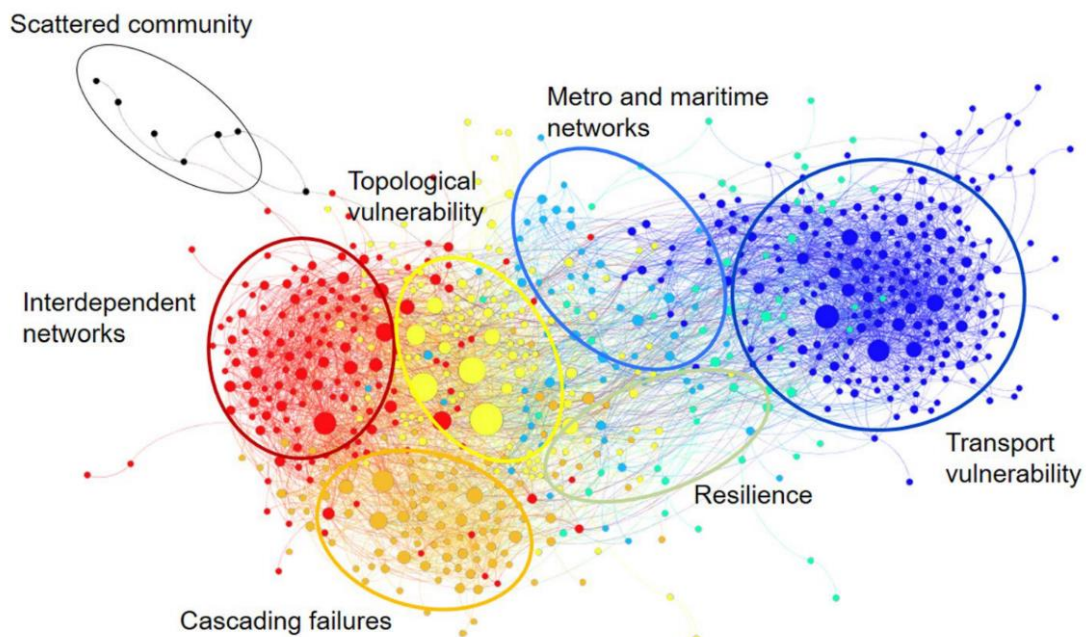
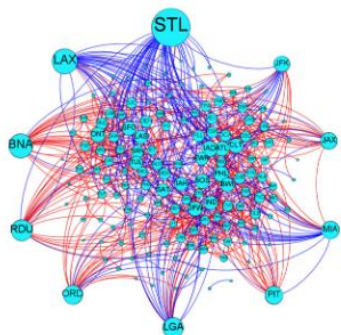
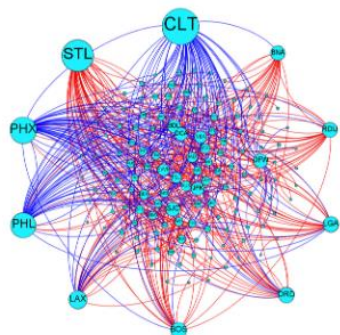


図1: 引用ネットワークとコミュニティ構造

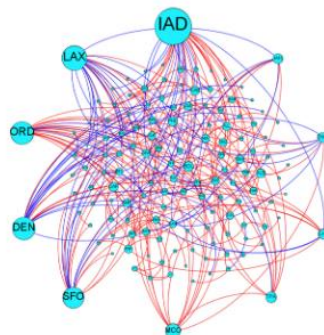
(a) American, state 1 → 2



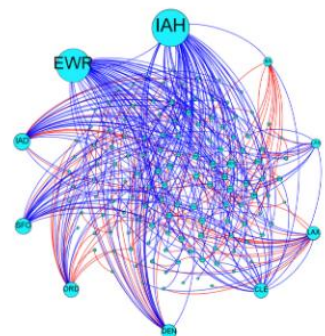
(b) American, state 2 → 3



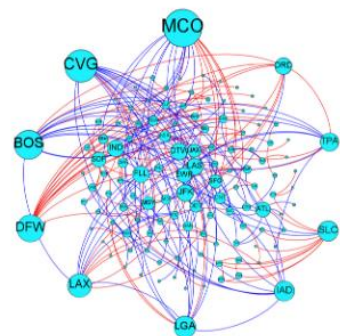
(c) United, state 1 → 2



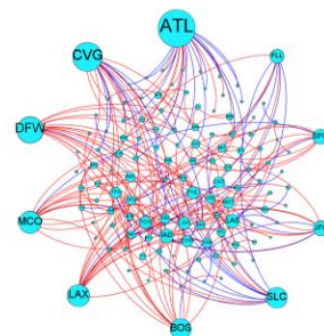
(d) United, state 2 → 3



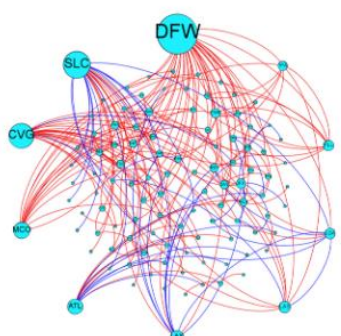
(e) Delta, state 1 → 2



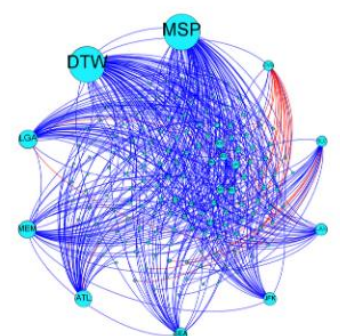
(f) Delta, state 2 → 3



(g) Delta, state 3 → 4



(h) Delta, state 4 → 5



(i) Southwest, state 1 → 2

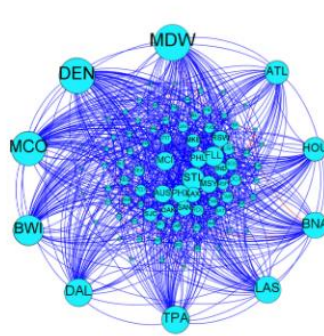


図 2 : 米国主要航空会社 4 社のネットワークの状態変化と新規・撤退路線

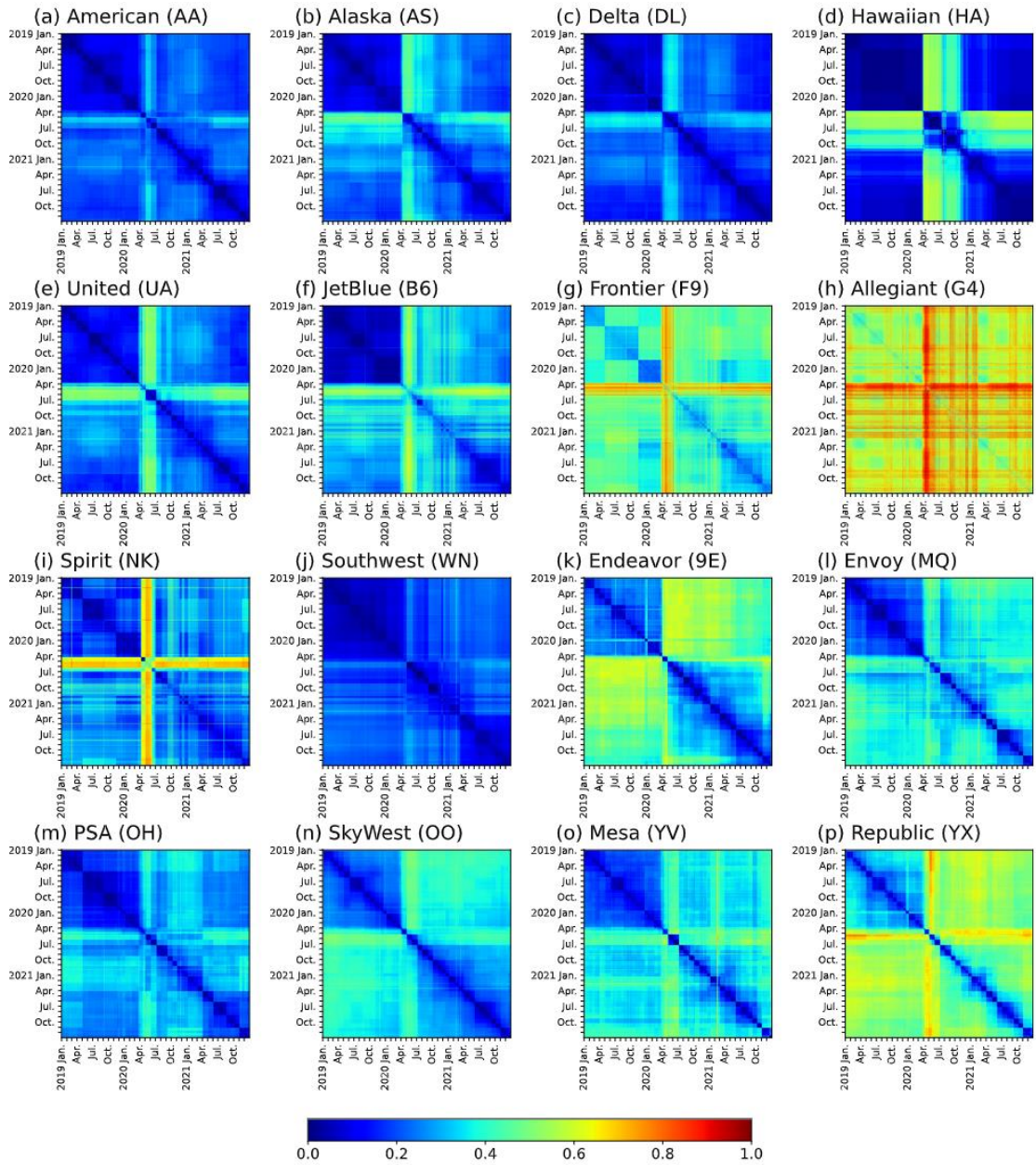


図 3 : コロナ禍における米国航空会社のネットワークの変化

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Sugishita Kashin, Abdel-Mottaleb Noha, Zhang Qiong, Masuda Naoki	4. 巻 477
2. 論文標題 A growth model for water distribution networks with loops	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1098/rspa.2021.0528	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 Sugishita Kashin, Porter Mason A., Beguerisse-Diaz Mariano, Masuda Naoki	4. 巻 3
2. 論文標題 Opinion dynamics on tie-decay networks	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevResearch.3.023249	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 Sugishita Kashin, Masuda Naoki	4. 巻 11
2. 論文標題 Recurrence in the evolution of air transport networks	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 5514
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-021-84337-z	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 Sugishita Kashin, Asakura Yasuo	4. 巻 13
2. 論文標題 Vulnerability studies in the fields of transportation and complex networks: a citation network analysis	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Public Transport	6. 最初と最後の頁 1~34
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s12469-020-00247-9	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Sugishita Kashin、Mizutani Hiroki、Hanaoka Shinya	4. 巻 114
2. 論文標題 Disruption and recovery of the US domestic airline networks during the COVID-19 pandemic	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Journal of Air Transport Management	6. 最初と最後の頁 102504 ~ 102504
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jairtraman.2023.102504	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計12件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 11件)

1. 発表者名 Kashin Sugishita, Hiroki Mizutani, and Shinya Hanaoka
2. 発表標題 Disruption and recovery of the US domestic airline networks during the COVID-19 pandemic
3. 学会等名 25th ATRS World Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Noha Abdel-Mottaleb, Qiong Zhang, Kashin Sugishita, and Naoki Masuda
2. 発表標題 Can Bio-Inspired network design improve the performance of water distribution networks (WDNs)?
3. 学会等名 World Environmental and Water Resources Congress (2021 EWRI Congress) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kashin Sugishita
2. 発表標題 Citation network analysis of vulnerability studies in the fields of transportation and complex networks
3. 学会等名 Science of Innovation and Success Workshop (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kashin Sugishita and Naoki Masuda
2. 発表標題 Structural evolution of US airline networks
3. 学会等名 NetSci 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kashin Sugishita, Noha Abdel-Mottaleb, Qiong Zhang, and Naoki Masuda
2. 発表標題 A growth model for water distribution networks with loops
3. 学会等名 Conference on Complex Systems (CCS 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Noha Abdel-Mottaleb, Kashin Sugishita, Naoki Masuda, and Qiong Zhang
2. 発表標題 Bio-inspired water distribution network design
3. 学会等名 Fourth Northeast Regional Conference on Complex Systems (NERCCS 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kashin Sugishita
2. 発表標題 Recurrence in the evolution of air transport networks
3. 学会等名 The 5th Japan-US Science Forum in Boston (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 杉下佳辰
2. 発表標題 航空ネットワーク構造の時系列変化
3. 学会等名 ネットワーク科学セミナー2020 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Sugishita, K., Porter, M. A., Beguerisse-Diaz, M., Masuda, N.
2. 発表標題 Opinion dynamics in tie-decay temporal networks
3. 学会等名 Third Northeast Regional Conference on Complex Systems (NERCCS 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Sugishita, K., Porter, M. A., Beguerisse-Diaz, M., Masuda, N.
2. 発表標題 Opinion dynamics in tie-decay networks
3. 学会等名 NetSci-X 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Sugishita, K., Asakura, Y.
2. 発表標題 Citation network analysis of vulnerability studies in the fields of transportation and complex networks
3. 学会等名 The 22nd Euro Working Group on Transportation Meeting (EWGT 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Woratat Leelaworaset, Kashin Sugishita, Shinya Hanaoka
2. 発表標題 Identifying alternative airports in weighted air transport networks
3. 学会等名 26th ATRS World Conference (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

Kashin Sugishita Web Page https://www.kashinsugishita.com/
--

6. 研究組織		
氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------