

豊橋鉄道における風水害による運行障害 特性と運休確率算定に関する研究

豊田将也¹・下山雄大²・加藤茂¹

A Study on the Characteristics of Operation Disruption and the Suspension Probability by Typhoon for Toyohashi Railroad

Masaya TOYODA¹, Yudai SHIMOYAMA² and Shigeru KATO¹

Abstract

In this study, we calculated the probability of planned suspension for Toyohashi Railroad by analyzing past operational disruptions on the Atsumi Line and streetcars, coupled with typhoon data. Results were used to develop a formula for the probability of planned service suspensions 24 hours in advance when a typhoon struck. Regression analysis showed a 61.3% accuracy for rainfall warning criteria and 78.5% for wind speed. Suspension criteria accuracy was 58.2% for rainfall and 75.8% for wind speed. However, rainfall exhibited significant variability, suggesting the insufficiency of the two parameters in capturing the phenomenon. Future improvements may involve adding new parameters, such as storm radius, for a more accurate estimation equation.

キーワード：計画運休, 地域鉄道, 台風, ロジスティック回帰分析

Key words: planned suspension, regional railway, typhoon, logistic regression analysis

1. はじめに

近年、我が国において大雨や暴風に伴う交通インフラへの障害が多数発生している。その中でも我が国の交通基盤を担う鉄道では、一度の運行障害による住民生活への影響が非常に大きい。鉄道の運行基準は基本的に各社が個々の条件を設定し、対応することになっている。そのため、各鉄道会社が鉄道の安全運行を実施するためには、まず原因となる外力条件を整理し、そして過去の運行障

害記録や地域性（例えば平均して風が強い、雨が強まりやすい区間がある等）も考慮した基準の設定・ルール作りが求められている。

取り組みの一環として代表されるものとして、風水害の発生が予測された場合に、事前に運休計画を発表する取り組み（以降、計画運休）がある。この計画運休に対するあり方については、いくつか研究報告がある^{例えば1,2)}。河原(2020)では鉄道における防災・減災対策がハード面ソフト面双方

¹ 豊橋技術科学大学建築・都市システム学系
Toyohashi University of Technology, Architecture and
Civil Engineering

² 独立行政法人鉄道建設・運輸施設整備支援機構
Japan Railway Construction, Transport and Technology
Agency

の観点から記載されており、運転規制や計画運休の導入、その取りまとめが記述されている¹⁾。国土交通省鉄道局は2018年以降、計画運休の取り組みを積極的に進めている³⁾。また海外での事例としては香港での計画運休事例がある。香港では香港気象台が台風の接近に応じた情報を提供し、市民に注意を促し、注意レベルに応じて香港鉄路をはじめとする各交通機関が対応するという取り決めがある⁴⁾。計画運休の実施が効果を発揮した事例として2018年の台風21号による南海電鉄の事例があげられる⁵⁾。当時は25年ぶりに非常に強い勢力で上陸した台風21号の接近に伴い、南海電鉄では9月4日の12時から計画運休を実施した。その直後の13時には、台風に伴う強風により飛来物が南海電鉄尾崎駅のホームの架線を切断し、駅舎を全焼させる火災が起きた。また、その40分後には暴風の影響を受けたタンカーが空港線の関西空港連絡橋に衝突する事故が発生した。しかし、周辺鉄道各社では、計画運休が実施されたことにより旅客の被害は0となった。また東京大学と県立広島大学による2019年台風15号の計画運休に関する調査(2019)によると⁶⁾、計画運休情報はSNS等の普及により、気象庁の注意喚起(警報・注意報等)に相当する認知度の高さとなっており、人々の防災行動を促す要因となっていることが報告されている。したがって、鉄道が計画運休を実施することで、早期帰宅の促進、不要不急の外出抑止など社会全体の安全を確保する役割も果たすことが明らかとなっている。加えて、台風通過後においても計画運休はスムーズな運転再開に繋がるというメリットも挙げられる。

本来、詳細な運行障害報告書は公開される情報ではないが、著者らが所属する豊橋技術科学大学は2022年10月25日より愛知県豊橋市の地域鉄道である豊橋鉄道株式会社(以降、豊鉄)と包括連携協定を締結しており、その一環で運行障害報告書の提供を受けた。豊鉄においても過去の運休事例に関する解析やそれに伴う最適な計画運休の在り方に関する取り組みが喫緊の課題となっている。豊鉄では、JRや大手私鉄とは異なり、契約している気象会社からの気象情報に基づく運休決定プ

ロセスではなく、一般公開されている気象情報と沿線を確認した社員間の連携により運休の必要性を判断している。気象会社との契約は非常に高価となることから、新たな契約は現実的ではない。したがって一般的な気象予報(台風予報等)から地域特性や災害リスクを考慮した計画運休指標および運休確率の算定が求められている。

本研究では、豊鉄から提供を受けた過去19年分の運行障害記録⁷⁾を解析し、豊鉄の運行に影響を与える気象特性について明らかにする。また気象庁再予報データを元に運行障害基準超過の24時間前における計画運休確率の推定式を構築することを目的とする。

2. 解析手法

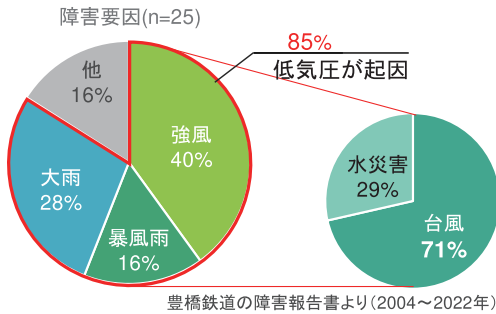
2.1 対象路線と過去の運行障害記録の解析

本研究では、愛知県豊橋市の新豊橋駅から三河田原駅間を運行する渥美線と(図1)、豊橋市内を走る路面電車(市電)を対象路線とする。まず豊鉄から提供を受けた2004年4月-2023年3月までの期間(対象期間)における運行障害の実態について解析した。具体的には、路線の運行障害基準と照合し^{8,9)}、過去の運行障害の発生要因や時期を解析した。運行障害事例については、事前解析時点で台風起因による運行障害が大半を占めて



図1 豊橋鉄道渥美線の路線図(黒太線)。国土地理院地図より引用

(a) 渥美線



(b) 市電

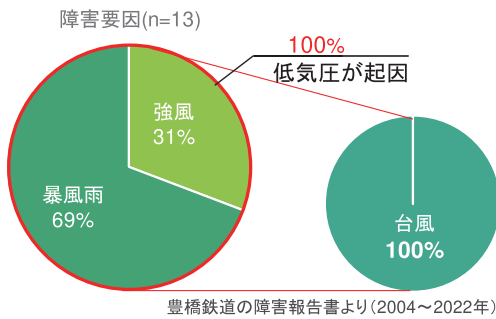


図2 (a) 渥美線と (b) 市電の運行障害事例の内訳

いたため(図2), 台風経路や強度も合わせて解析した。運行障害は, 警戒と停止基準があり, 警戒では時間雨量25 mm 以上, または風速20 m/s 以上, 停止では時間雨量45 mm 以上, または風速25 m/s 以上とされている。ここで警戒とは「今後運休する可能性があるものとして運転士に注意を促す」基準である。したがって本論文では, 警戒基準と停止基準の2つに着目して議論する。また雨量に関しては積算降水量も条件に含まれているが, 台風襲来時において, 積算降水量に起因する運行障害は, 時間雨量による障害よりも回数が少ない。そこで本研究では時間雨量に着目して解析を行った。一方で本手法は積算降水量による障害可能性について, 十分に考慮できていないことを付記する。

2.2 気象庁のGPVを用いた解析

続いて, 運休確率算定を目的とした気象データの解析を実施した。確率算定のためには膨大な台

表1 本研究で使用した気象庁GPVの概要

| 気象庁全球アンサンブル予報システム再予報GPVデータ | |
|----------------------------|---|
| モデル名 | GEPS2003 |
| 気象解析期間 | 2004-2019 |
| 初期値 | 初期値: 6/15, 6/30, 7/15 (各年) 7/31, 8/15, 8/31 9/15, 9/30, 10/15 (12:00UTC) |
| アンサンブルメンバー数 | 各初期値に13メンバーずつ |
| 予報時間 | 地上面0~816時間 (3時間毎) |
| 水平解像度 | 0.5625° |
| データ領域 | 北西端: 50.0625N, 119.8125E 南東端: 19.6875N, 150.1875E |
| 物理量 | 海面更正気圧 (Pa), 積算降水量 (mm/day), 東西風速 (m/s), 南北風速 (m/s) |

風事例が必要となる。一方で豊鉄の運行障害となり得る台風事例は, 1年間に1事例程度であるため, 過去事例のみの解析では十分な事例数を確保することができない。そこで本研究では, 気象庁による「全球アンサンブル予報システム再予報GPV (高分解能)」(以降, 気象庁GPV)を用いて10), 事例数の確保を試みた。本データは各月の15日と月末の2日を初期値として2週間先までの予報計算結果が含まれている。ここで再予報とは過去のある期間における予報計算を意味している。今回使用したデータには1981年1月から2019年12月までの39年間分のデータが存在しているが, 本研究では豊鉄の運行障害報告書が存在する2004年から2019年までを対象とする(気象解析期間)。また愛知県において台風の接近・上陸が多い6月から10月の期間を解析期間とする(表1)。各初期値で微小な摂動を持たせて作成したアンサンブルメンバーが13ケース存在するため, 膨大な数の台風予報事例を確保することが可能となる。データ内の多数の物理量のうち, 地表面のデータである海面更生気圧 (hPa), 降水量 (mm/day), 東西風速 (m/s), 南北風速 (m/s) を使用した。尚, 降水量については, 3時間毎に出力されているため, この値を時間雨量に換算し, 風速値については, 風速の大きさ(方向を考慮しない風速の絶対値)を用いて議論する。気象庁GPVの解析フローは2段階に分かれており, Phase 1では頻度数の

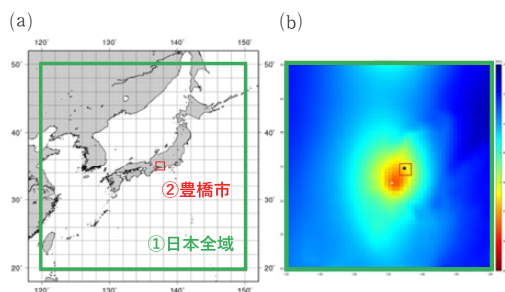


図3 (a) 気象庁 GPV の解析対象範囲および
(b) データ抽出のイメージ図
(b) の白点は台風中心位置, 黒点は豊橋
駅を示す

解析, Phase 2 は, 回帰分析による運休確率の算定である。Phase 1 では日本全域と豊橋市での規制基準値を超過する事例数や影響時間を算出し, 日本周辺に接近する台風が豊橋市で基準を超過する確率を求める(図3)。さらに事例数当たりの影響時間を算出し要因による違い(雨起因または風起因)も求めた。Phase 2 は, 得られた傾向を元に, 24時間前時点での台風の特徵量から運休確率を算出することを目的としたロジスティック回帰分析を行った(以降, 回帰分析)。豊橋駅を基準に, 解析時刻における台風(中心気圧1000 hPa未滿および最大風速15 m/s以上の擾乱)が豊橋駅に接近(中心が豊橋駅から300 km 圏内を通過), かつ豊橋市内での運行障害基準値を超過する事例に着目し, 豊橋市内への接近24時間前の物理量を用いて確率を算出した。ここで「24時間前」という設定については, 国土交通省による計画運休・運転再開時における情報提供タイムラインのモデルケースから抜粋している¹¹⁾。回帰分析に使用した推定式は以下の通りであり, 最小二乗近似を用いた非線形モデルを用いて式の係数を決定した。

$$\begin{cases} Z = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 \\ P = \frac{1}{1 + e^{-Z}} \end{cases} \quad (1)$$

ここで, P : 運休の発生有無(確率), x_1 : 台風中心と豊橋駅までの距離(直線距離) [km], x_2 : 台風中心気圧 [hPa] である。これらの情報はいずれも24時間前時点で, 気象庁 HP や一般の天気予

報からも容易に入手可能な情報である。また運休の基準については, $0 < P < 0.5$ の数値で運休無し, $0.5 \leq P$ の数値で運休有りと判定した。本研究では式の適用を擾乱接近の24時間前と設定したが, 実際の子報ではどのタイミングが24時間前に相当するかの判断が難しい。そのため, どの時点を「接近」と判断するかについては, 別途詳細な検討が必要といえる。

3. 解析結果

3.1 渥美線における運行障害事例について

まず渥美線における分析結果について議論する。渥美線では, 対象期間における運行障害は計25回あり, 年平均で1.3回発生している。そのうち, 強風が10件, 暴風雨が4件, 大雨が7件, 地震が2件, その他が2件である(図4a)。要因については, 報告書に明記される現象名で記載している。低気圧に起因するものが全体の約85%となっており, 特に台風起因が全体の60%を占めていることが明らかとなった。また運行障害要因別の影響本数と影響時間の関係を調べたところ(図4b), 風起因による現象毎の累積影響時間は約74時間, 雨起因によるものは約13.5時間であった。また両者が重なる暴風雨では約36.5時間であった。影響本数についても, 強風, 暴風雨, 大雨の順に影響本数が多くなっている(Leakageは漏電)。現象毎では, 強風による運行障害影響が大きい傾向にあるが, 事例数を考慮すると1回あたりの影響時間および本数は暴風雨で最も大きいことが明らかとなった。

続いて運行障害の主要な要因となっている台風について確認すると, 対象期間に豊橋駅に接近(300 km 以内)した台風は計65事例あり, 実際に運行障害に至ったのは15事例であった(図5)。したがって, 接近する台風の約5個に1個の割合で運行障害が発生しているとみなせる。また運行障害の要因については, 15事例中14事例が強風による運行障害, 1個は大雨による運行障害であった。図5より, 風起因による運行障害は台風の勢力が比較的強く, かつ豊橋駅に近い地点を通過する事例ほど運休しやすい傾向が見て取れる。一方

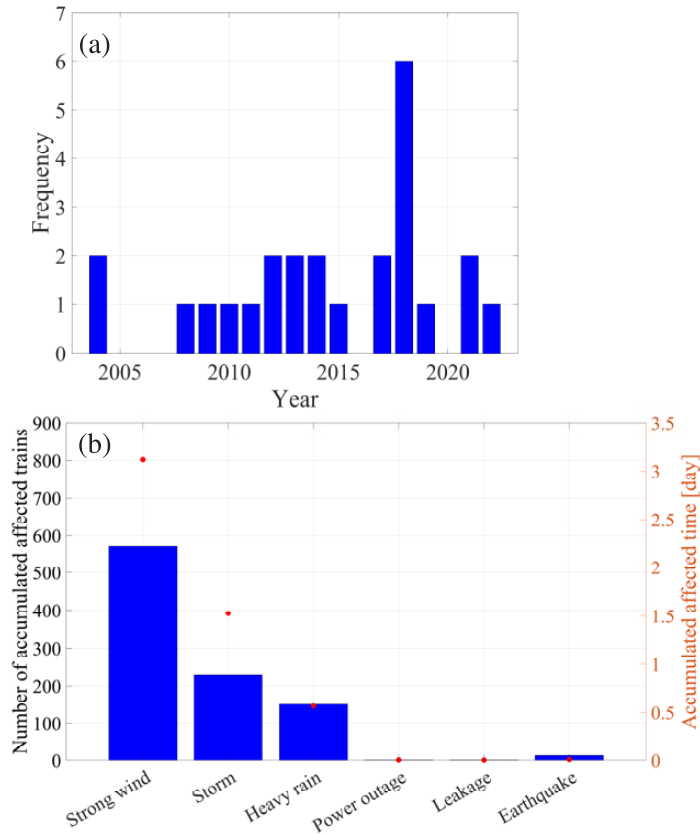


図 4 渥美線における (a) 年度毎の運行障害事例数および (b) 要因別の累積影響本数 (棒グラフ) と累積影響時間 (プロット) (Leakage は漏電を示す)

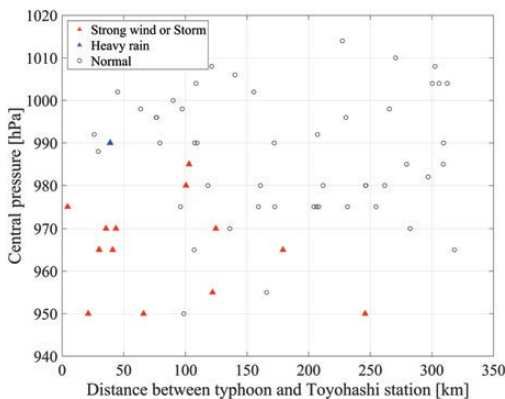


図 5 渥美線における最接近時の台風中心から豊橋駅までの距離と中心気圧の関係図
赤三角：強風および暴風雨による運休をもたらした台風事例、青三角：大雨による運休をもたらした台風事例

で雨起因の運行障害となった台風1318号は最接近時の中心気圧は990 hPaであった。

3.2 市電における運行障害事例について

続いて渥美線と同様に市電の運行障害に関して議論する。対象期間における運行障害は計13回あり、年平均では0.7回発生している (図 6 a)。そのうち強風が4件、暴風雨が9件であった。また全て台風襲来時に運行障害が発生していた。運行障害要因別の影響本数と影響時間の関係では (図 6 b)、強風による累積影響時間は約23.5時間、暴風雨では約61.5時間であった。また渥美線と同様に1回あたりの影響が最も大きいのは暴風雨による運行障害であった。

運行障害をもたらした台風事例について確認す

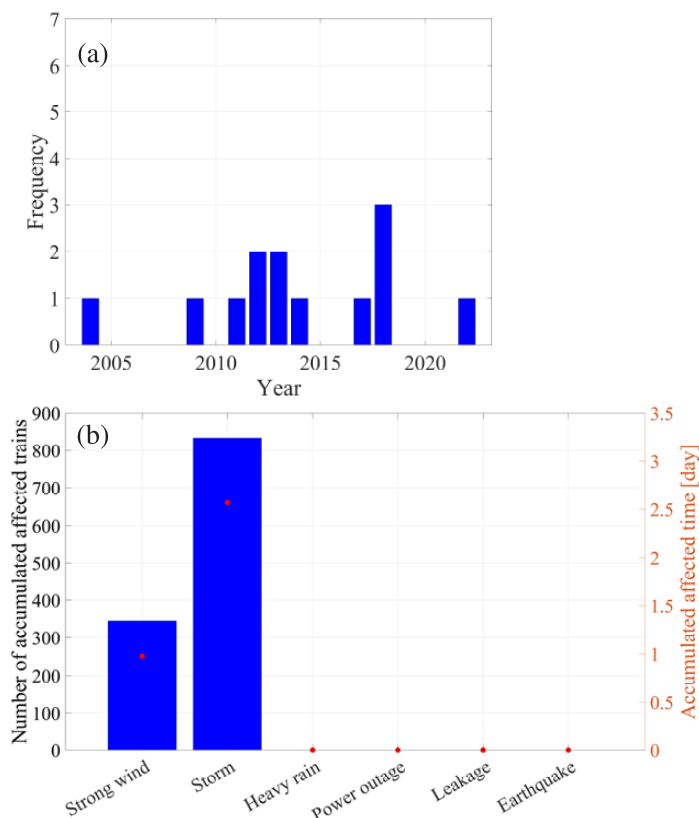


図6 市電における (a) 年度毎の運行障害事例数および (b) 要因別の累積影響本数 (棒グラフ) と累積影響時間 (プロット)

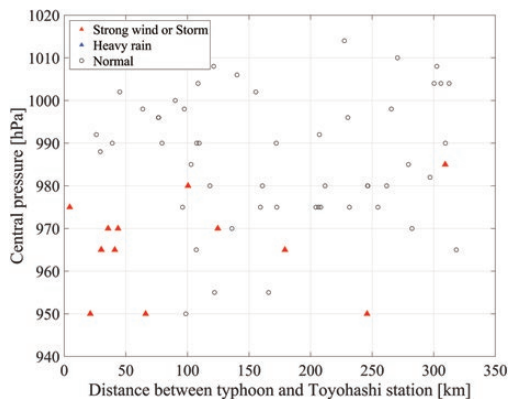


図7 市電における台風中心から豊橋駅までの距離と中心気圧の関係図
赤三角：強風および暴風雨による運休をもたらした台風事例

る。接近した65事例中13事例が運行障害を引き起こしていることから、台風が接近した場合、渥美線と同様の割合 (20%) で運行障害が発生している。また13事例中、渥美線の運行障害に含まれない事例は2事例確認された (台風1408号, 1919号)。全ての事例が風起因による運行障害をもたらしていることから (図7), 渥美線の結果と合わせて豊鉄の管轄内では風起因による運行障害が主要因となっている。

3.3 気象データ解析による雨起因および風起因の運行障害発生数の違いについて

本題である気象庁 GPV の解析結果に関する議論の前に、使用した気象庁 GPV の再現性について、運行障害基準を超過した台風事例数で確認した。豊鉄による運行障害報告書で記録されている

運休事例16個の再現性を気象庁 GPV で確認したところ、全ての事例で少なくとも1つ以上のアンサンブルメンバーが運休基準を超過する結果となった。また観測では、当該期間(2004-2019年)で発生した台風306個中、16個で運休(雨・風の両方で約5.3%)となった。一方で気象庁 GPV では、日本域で確認された台風6304個中、豊橋市で豊鉄の運休基準を上回った事例は203個であり、運休確率は3.2%であった。したがって、解像度や時間間隔の粗さに起因して、過小評価する傾向にあるものの、運休基準を超過する事例については観測された個数を表現できており、事例数や確率の算定は可能であると判断した。

続いて気象庁 GPV を用いて、雨量および風速の基準から図3に示した範囲において、日本全域と豊橋市で警戒基準および停止基準を超過した事例をそれぞれ求めた(表2最上段)。まず雨量基準に着目した解析では、気象解析期間全体において、日本全域(日本の範囲内のどこか1か所以上で警戒基準を超過した場合にカウント)の平均警戒基準超過事例数は31.3個、豊橋市では3.8個(日本全域の12.1%)であった。また豊橋市での停止基準超過事例数は0.6個(日本全域での2.0%)であった。したがって、無作為に特定の2週間を選定した場合、13アンサンブルメンバー中、日本全域に警戒基準(25 mm/h)を超える雨量をもたらす事例は約31個襲来し、そのうち約4個は豊橋市においても警戒基準を超過する事例であり、さらに約1個は停止基準(45 mm/h)を超過する事例であるといえる。

雨量と同様に風速基準に着目した解析結果についても議論する。気象解析期間全体において、日本全域の警戒基準超過事例数は28.4個、豊橋市では3.4個(日本全域の10.7%)であった。豊橋市での停止基準超過事例数は0.8個(日本全域での3.5%)であった。また平均事例数では日本全域および豊橋での基準超過事例に雨起因および風起因の間に有意な差は確認されなかった(有意水準5%, 片側検定)。

表2 気象庁 GPV による雨起因および風起因による運行基準超過に関する平均事例数、平均発生確率、平均障害継続時間の結果

| | | 日本全域 警戒基準超過 | 豊橋 警戒基準超過 | 豊橋 停止基準超過 |
|-----|----------|----------------|--------------|--------------|
| 雨起因 | 事例数 | 31.3 | 3.8 | 0.6 |
| | 発生確率 (%) | - | 12.1 | 2.0 |
| | 障害時間 (h) | 26.6 | 5.6 | 1.6 |
| 風起因 | 事例数 | 28.4 | 3.4 | 0.8 |
| | 発生確率 (%) | - | 11.9 | 2.7 |
| | 障害時間 (h) | 40.0 | 7.7 | 3.2 |

3.4 台風による単位運行障害時間について

続いて台風1事例あたりで発生する単位運行障害時間に着目する(表2最下段)。日本全域での警戒基準を超過する際には、雨起因では26.6時間、風起因では40.0時間と風起因の方が13.4時間長く影響する結果となった。豊橋市の警戒基準を超過する際には雨起因が5.6時間、風起因では7.7時間で風起因の方が2.1時間長く影響する結果となった。豊橋市で停止基準を超過するケースでは雨起因が1.6時間、風起因は3.2時間となり、風起因の方が1.6時間長く影響する結果となった。したがって、一つの事例が影響をもたらす単位運行障害時間においては、風起因による警戒基準超過時間及び停止基準超過時間が雨起因よりも長いことがわかった。また、雨起因および風起因による単位運行障害影響時間の差についてウィルコクソンの順位和検定で確認した(有意水準5%, 片側検定)。日本全域の警戒基準について、雨起因と風起因では有意な差があり、雨量の単位運行障害影響時間の中央値が風速の単位運行障害影響時間の中央値より小さいことがわかった。一方で豊橋の警戒基準、停止基準は、ともに有意差はなく、雨量と風速の単位運行障害影響時間の中央値に差はないことがわかった。日本全域では台風のピーク時付近もエリア内に含まれており、比較的台風がゆっくり進むため、影響時間が長くなる傾向にある。一方で豊橋市の範囲は日本全域の範囲に比べて非常に小さく、また減衰期に相当し、台風の移動速度

も大きいことから、雨事例および風事例のどちらも短時間で通過している。結果として雨量と風速による影響時間の差は、豊橋ではいずれの事例による影響時間も短くなり、有意な差ではないと判断されたものと考えられる。

3.5 年々変動および季節間の運行障害事例について

最後に気象庁 GPV の気象解析期間において、年毎の事例数および季節間の事例数の傾向について分析した(図8, 図9)。まず年毎の事例数では、日本全域における警戒基準超過の事例数は(図8)、雨起因および風起因でともに30回程度で年毎の増減は見られなかった。また豊橋市における警戒基準超過の事例数は4回程度、停止基準超過の事例数は1回程度となっており、こちらも雨起因および風起因でともに明瞭な増減傾向はみられなかった。したがって、雨量と風速は年度ごとの事例数は変わらず、一定の数で運行障害事例が発生しているといえる。

続いて季節間の違いについて確認する(図9)。気象庁 GPV では9種類の初期値(6月15日~10月15日)に応じたデータが存在している。夏~秋の季節間(区間)において、事例数にどのような違いがあるかを明らかにする。日本全域における警戒超過の事例数は、雨量は6月15日の最高39回

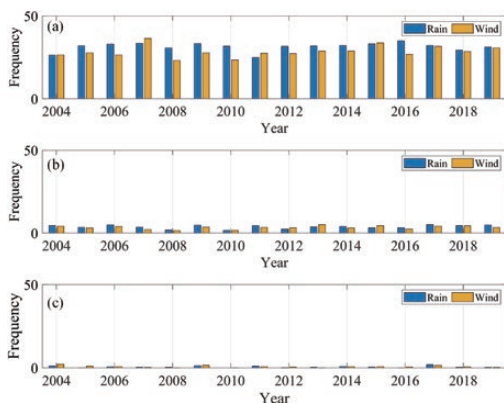


図8 気象庁 GPV による年度毎の (a) 日本全域警戒基準超過、(b) 豊橋警戒基準超過、および (c) 豊橋停止基準超過に関する平均事例数(全初期値の平均)

から10月15日の最低26回と減少傾向を辿っている。一方、風速は6月15日の17回から7月15日の11回までは減少傾向だが、それ以降は10月15日の48回まで増加傾向である。したがって、6月15日から8月15日にかけては雨量による基準超過事例が多く、8月31日から10月15日にかけては風速による超過事例が多くなっていることがわかる。風速による季節間(6月から8月15日を前半、8月31日から10月を後半と定義)の事例数の差をウィルコクソンの順位和検定で確認した。その結果、前半と後半で風速による日本全域の警戒基準超過に関する事例数は有意な差があることが明らかとなった(有意水準5%, 両側検定)。したがって季節間による事例数の差があるといえ、風起因による運行障害は夏の終わりから秋にかけて有意に多いことが明らかとなった。すなわち前半は梅雨時期に伴う前線性の低気圧または雨台風による雨量が多くなり、後半は風台風の接近・上陸により風速が多くなると考えられる。豊橋市における警戒超過の事例数は、雨量においては2回のピークがあり6月15日の6.2回と9月30日の5.1回であった。風速は日本全域と同様の分布を示し、6月15日の1.4回から7月15日の0.7回までに比べて、後半では10月15日の7.2回まで増加傾向を示した。また、豊橋市の警戒基準超過の風速による季節ごと事例数の差についてもウィルコクソンの順位和検定で

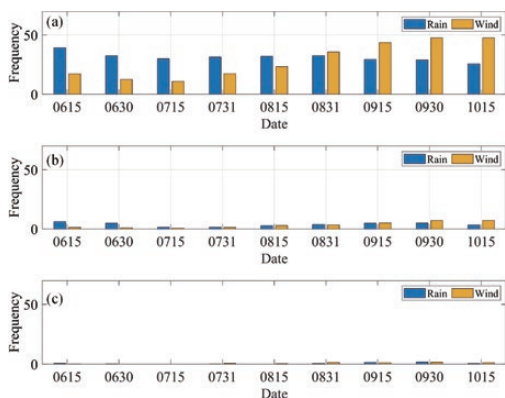


図9 気象庁 GPV による初期値毎の (a) 日本全域警戒基準超過、(b) 豊橋警戒基準超過、および (c) 豊橋停止基準超過に関する平均事例数(各年度の平均)

確認した。豊橋市の警戒基準超過事例について、前半と後半では有意な差が確認された。したがって、8月15日頃を境界として風起因による障害の起こりやすさが増大するといえる。豊橋市の停止超過の事例数は雨量と風速の双方とも同じ分布を取り、ピークは9月30日の雨量1.8回、風速1.7回であった。こちらは雨起因と風起因で有意な差は見られなかった。

4. ロジスティック回帰分析による運休予測

本研究では、実務場での運休予測の実施に対応すべく、気象庁 GPV 内において、豊橋市で基準を超過する最初の時刻の24時間前情報を用いてロジスティック回帰により作成した予測モデルを24時間後に基準を超過する確率を予測する式として提案する。ここで予測式の定義により、予測対象時刻よりも後に急激に雨・風が強まり、豊鉄の運行基準を超過するような事例については、予測を外す可能性が高くなる。これは本研究の推定式における適用限界であり、今後より高分解能なデータを用いて、高頻度に推定式を構築することで解消できるものと期待される。一般的な台風予報において公開されている情報は、台風位置、中心気圧、最大風速、移動速度(方向)、暴風域半径、強風域半径である。本研究ではこれらの物理量の中から(算出できるものも含む)、1つまたは2つを選択し、ロジスティック回帰分析(係数は一般化最小二乗法により算出)により推定式を構築した。その中で最もの中率が高かった式を以下に示す。尚、雨量に関する式は警戒基準超過事例341個、停止基準超過事例146個を使用し、風速に関する式は警戒基準超過事例246個、停止基準超過事例132個を用いて式を構築している。ここでは、日本全域と豊橋市においてともに a) 雨量警戒基準を超過した事例、b) 雨量停止基準を超過した事例、c) 風速警戒基準を超過した事例、d) 風速停止基準を超過した事例の4パターンを考える。これらの条件に該当する事例数を確認し、a)-d) のそれぞれの条件で、構築した式的中率・空振り率・見逃し率を算出する(各条件で総事例

数が異なる)。

$$\begin{cases} Z = 65.142 - 0.067x_1 + 0.001x_2 \\ P = \frac{1}{1 + e^{-Z}} \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} Z = 191.88 - 0.195x_1 + 0.001x_2 \\ P = \frac{1}{1 + e^{-Z}} \end{cases} \quad (3)$$

推定式(2)は雨量、推定式(3)は風速による警戒基準超過確率の算定式である。上記の式において、 Z は目的変数であり、ここでは警戒確率を意味する。警戒確率は0から1の数値で算出され、0.5未満で警戒基準超過無、0.5以上で警戒基準超過有となる。また x_1 は対象となる台風の中心気圧[hPa]、 x_2 は豊橋駅と台風中心の距離[km]である。まず台風接近時において警戒基準の超過確率(以降、運休確率)を求めた(図10)。ここでは、24時間前の情報を用いて、算出した推定結果と台風が実際に豊橋市エリアにおいてもたらした結果を比較して妥当性を検討する。推定結果は的中と見逃し、空振りの3つのケースを設定する。的中とは2つあり、運休的中と通常運行的中を合わせたものである。運休的中は推定式による推定値が0.5を超えていて、かつ24時間後の豊橋市での基準超過している場合を指し、通常運行的中は推定値が0.5未満でかつ24時間後の豊橋市においても警戒基準を超過しないことを意味する。見逃しは推定値が0.5を未満で24時間後の豊橋市において基準を超過する場合を意味する。空振りとは推定値は0.5を超えているが、24時間後の豊橋市においてが基準を超過しない場合である。表3に警戒基準における回帰分析結果を示す。雨量(全事例数が341個)における回帰分析の結果は、的中個数は209個(事例数の61.3%)、見逃し個数は79個(事例数の23.2%)、空振り個数は53個(事例数の15.5%)であった。風速(事例数が246個)における回帰分析の結果は、的中個数は193個(事例数の78.5%)、見逃し個数は22個(8.9%)、空振り個数は31個(12.6%)であった。

続いて、停止基準超過確率に関する算定式につ

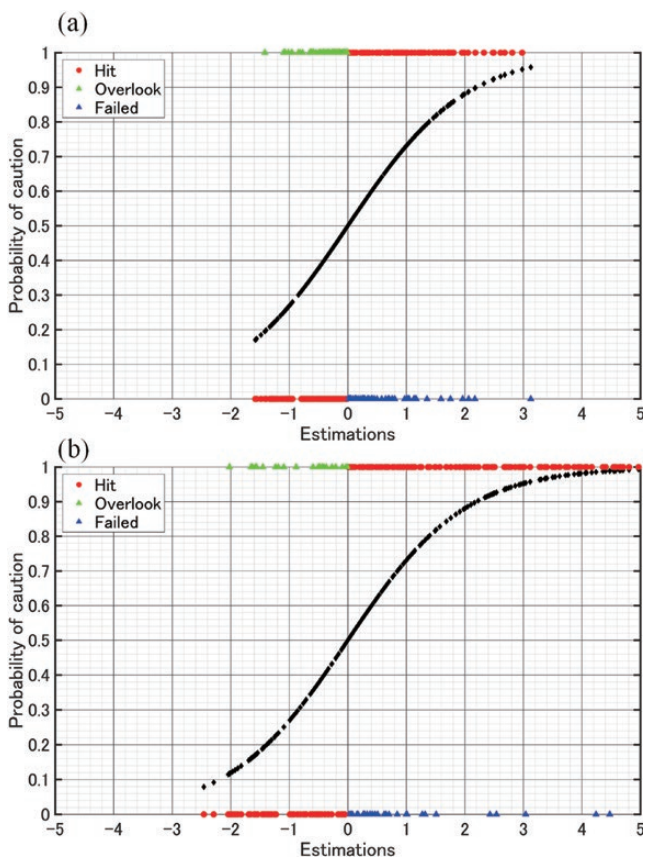


図10 ロジスティック回帰分析による (a) 雨起因と (b) 風起因の推定結果と警戒基準超過確率

表3 ロジスティック回帰分析による24時間前の値を使用して推定した警戒基準超過事例に関する検証結果

| Caution | | 的中 | 見逃 | 空振 | 計 |
|---------|----------|------|------|------|-----|
| 雨起因 | 事例数 | 209 | 53 | 79 | 341 |
| | 発生確率 (%) | 61.3 | 15.5 | 23.2 | |
| 風起因 | 事例数 | 193 | 22 | 31 | 246 |
| | 発生確率 (%) | 78.5 | 8.9 | 12.6 | |

表4 ロジスティック回帰分析による24時間前の値を使用して推定した停止基準超過事例に関する検証結果

| Caution | | 的中 | 見逃 | 空振 | 計 |
|---------|----------|------|------|------|-----|
| 雨起因 | 事例数 | 85 | 55 | 6 | 146 |
| | 発生確率 (%) | 58.2 | 37.7 | 4.1 | |
| 風起因 | 事例数 | 100 | 10 | 22 | 132 |
| | 発生確率 (%) | 75.8 | 7.6 | 16.6 | |

いて、以下に示す。

$$\begin{cases} Z = -0.275 - 0.001x_1 + 0.001x_2 \\ P = \frac{1}{1 + e^{-Z}} \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} Z = 68.206 - 0.075x_1 + 0.005x_2 \\ P = \frac{1}{1 + e^{-Z}} \end{cases} \quad (5)$$

式の構成要素は警戒基準超過の場合と同様である。尚、解析については警戒基準と同様に的中と見逃し、空振りの3つのケースを設定する。表4に停止基準における回帰分析結果を示す(図11)。雨量(事例数が146個)における回帰分析の結果は、的中個数は85個(事例数の58.2%)、見逃し個数は55個(事例数の37.7%)、空振り個数は6個(事例数の4.1%)であった。風速(事例数が132個)にお

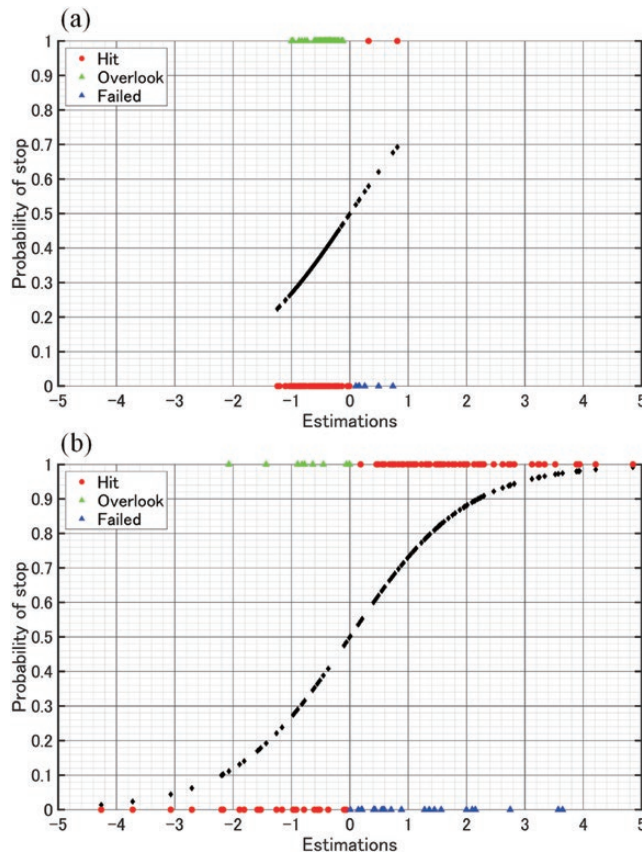


図11 ロジスティック回帰分析による (a) 雨起因と (b) 風起因の推定結果と停止基準超過確率

ける回帰分析の結果は、的中個数は100個（事例数の75.7%）、見逃し個数は10個（7.6%）、空振り個数は22個（16.7%）であった。

警戒基準での雨量の的中率は61.3%、風速では78.5%であった。また停止基準での雨量の的中率は58.2%、風速では75.8%であった。したがって、風起因の警戒・運休予測は比較的予測がしやすく（当たりやすく）、より実用的といえる。本研究では全方位からの台風を含んで解析していたが（西南問わず）、中心気圧の他に豊橋市からの方位角（方角）を変数に入れることで特定の経路を通る台風についてより現実的な予測が可能になると期待される。また、本研究では説明変数に中心気圧と距離を用いたが、これらに加えて暴風域や強風域を変数に含めることで低気圧（特に台風）の範囲を考慮することができる。これらの情報を運休

予測推定式に入れることで今後はより精度を向上させた予測が可能になると考えられる。

5. 結論

本研究では豊橋鉄道（渥美線、市電）の過去の運行障害情報と、影響をもたらした台風に関してデータを整理、解析することで、最適な計画運休の在り方について評価することを目的とした。さらに、解析結果から24時間前における計画運休確率の算定式を構築し、これを用いて台風襲来時の計画運休確率を算出した。本研究で得られた主な知見は以下の通りである。

- 1) 豊鉄の管轄内では過去の運行障害報告書において、風水害による運行障害が大半を占めており、特に台風による風に起因する障害（強風、暴風）が多い傾向にある。

- 2) 気象庁 GPV を用いた膨大な台風事例による解析の結果、雨起因と風起因によるそれぞれの運行障害事例数には有意な差はないことが明らかとなった。一方で、季節との関係では、風起因による運行障害は8月後半～10月において有意に多いことが明らかとなった。これは梅雨時期による大雨事例と台風シーズンによる強風事例による影響を受けていると考えられる。
- 3) 24時間前の気象情報を用いた運休確率算定式を構築し、精度検証を行った。その結果、風起因の警戒・運休予測は比較的予測がしやすく、実用的な式の構築に成功した。

本研究では、推定式の構築および評価において、豊橋市で警戒または停止基準を超過する事例を対象とした。一方で、実務場での利用時には、より早い段階での式の運用が必要となる。そのため、「台風が豊橋市から300 km 以内を通過時」等の条件から式の構築および評価をして、高度化することが求められる。また本研究では4つの運行障害条件に4種類の式を構築した。一方で「警戒基準」と「停止基準」の式を統一化することで、より簡便で効率的な運用が期待できる。今後は上記の課題に加え、式の説明変数に他の要素（方位角や各種風速半径等）を追加することで、構築した式の精度を改善することができると考えられる。

謝辞

貴重な運行障害情報をご提供いただいた豊橋鉄道株式会社様にこの場を借りて御礼申し上げます。

引用文献

- 1) 河原吉秀：自然災害と鉄道，国際交通安全学会誌，45巻，pp.88-99，2020.
- 2) 青山俊樹・他：都市防災ハンドブック，NTS，714p.，2023.
- 3) 国土交通省：鉄道の計画運休の実施についての取りまとめ，2p.，2019.
- 4) 東洋経済 ONLINE：香港の「計画運休」は、ここまで徹底している，2018.（2024/6/5閲覧 <https://toyokeizai.net/articles/-/242762>）
- 5) 佐々木泰史：大型台風接近に備えた当社の計画運休，運転協会誌，Vol.62，No.5，pp.17-20，2020.
- 6) 県立広島大学防災社会システムデザインプロジェクト研究センター及び東京大学大学院工学系研究科廣井研究室：令和元年台風15号における計画運休に関する調査（プレスリリース），10p.，2019.
- 7) 豊橋鉄道株式会社：輸送障害報告書（2004年～2023年6月迄）
- 8) 豊橋鉄道株式会社：平成25年3月13日鉄達甲第28号
- 9) 豊橋鉄道株式会社：平成25年12月27日鉄達甲第8号
- 10) 気象庁：全球アンサンブル予報システム再予報 GPV（高分解能全球域），<http://www.jmbnc.or.jp/jp/offline/hd0110.html>，参照2024-02-27.
- 11) 国土交通省：計画運休・運転再開時における情報提供タイムラインのモデルケース，https://www.mlit.go.jp/report/press/tetsudo02_hh_000111.html，参照2024-02-27.

（投稿受理：2024年3月29日
訂正稿受理：2024年6月21日）

要 旨

本研究では、愛知県東三河地方の地域鉄道である豊橋鉄道における運行障害発生確率を算定することを目的に、過去の渥美線と市電における運行障害と台風データを組み合わせて解析した。さらにその解析結果を用いて、豊橋市に台風が襲来する前24時間時点において計画運休確率を算出するための推定式を構築した。構築した推定式は、雨起因による警戒基準超過確率の精度は61.3%、風起因による警戒基準超過確率の精度78.5%であった。また運休基準超過確率の精度は雨起因で58.2%、風起因で75.7%であった。雨起因による運行障害に対しては、推定結果に大きなばらつきがあり、使用したパラメータのみでは現象を捉えるのに不十分であることが示唆された。今後は暴風域半径などの新たなパラメータを追加することで、より精度の高い推定式の構築が可能になると考えられる。