（ 様式D－２ ）
（ 別　　紙 ）

令和７年度　海外派遣研究員研究報告書〔研究実績〕

令和　７　年　９　月　３０　日

日本大学理事長　　殿
日 本 大 学 学 長　　殿

所　　属　　理工学部（理工学研究所）
資格・氏名　　教授・香取　照臣

令和７年度海外派遣研究員（　短期Ｂ　）の研究実績を，下記のとおり報告いたします。

記

１　区　　分　　短期Ｂ

２　研 究 課 題

列車運行計画の評価法ならびに人工知能技術の適用に関する研究

３　派 遣 期 間　　西暦２０２５年８月１１日　～　２０２５年８月３０日

４　派　遣　先　　ドイツ，○スイス，イタリア

５　研 究 目 的

鉄道は，予め定められた列車運行計画（列車ダイヤ）に基づいて運行されている。この列車ダイヤは利用者の実績や住民の掘り起し，事業者の経営戦略，接続する路線の運行等，様々な要素を考慮して決定されている。また，そうした運行を支えるための車両数，駅構内や駅間の線路配線，信号設備等が整っていなければ実現できない運行もありうる。しばしば実施される「ダイヤ改正」は，新駅開業や新線の使用開始が理由でなく，需給関係の適正化といった理由がほとんどである。

同一の路線において，ある列車の出発時間が１分早い，あるいは遅いという運行が可能なように，運行計画は複数存在しうる。途中駅折り返し列車の運行等，大きく異なる運行も可能であり，特に運転整理（事故や設備故障等の輸送障害によりダイヤが乱れた場合に，元の計画ダイヤに戻していく過渡的な運行計画）案の作成においては，複数の運行計画の優劣を短時間で判断する必要がある。もちろん，輸送障害が発生していない平常時の運行計画も，ダイヤ改正に先立ち複数案を立案し，比較評価した上での決定が必要である。

このようなことから，コンピュータを用いた列車運行計画の自動作成とその評価方法を研究している。列車運行計画の評価は従前からなされており，（１）利用者の総人キロ，（２）利用者から見た待ち時間を含めた平均速度，（３）利用者から見た実効混雑度，（４）トレインアワー，（５）カーアワーにより評価することが提唱されてお

り，それぞれ意味のあるものである。しかし，乗客の流動をモデル化して扱うことはその必要性は認められるものの，現在でもたやすくはない。また，多数決的に乗客の多い区間や乗降人数の多い駅間に重きが置かれることにもなり，乗客数の少ない線区末端や閑散線区は列車運行自体が不要，すなわち廃線という結論になってしまう。

従って，列車運行計画の評価として，以下を満足する評価方法の実現を目指している。

・OD（任意の駅間の利用者数）は用いない
・運行計画と線路配線だけから評価値を算出できる
・利便性，単純性，頑健性の３要素に分類して扱う
・比較的シンプルな要素と統計量のみを用いる
・物理的に意味のある評価とする
・評価項目は独立したものであるが，これらを統合した定量的な評価値としても表現する

海外における列車運行計画の評価は，我が国より設備的な余裕が大きいという事情のためか，運行計画の評価というよりは運行計画を作成するための設備面から最小運転時隔や線路容量を求めることが中心のようである。しかし，運転整理案の自動作成においては，やはり何らかの評価関数が用いられているはずである。

このようなことから，海外の鉄道，特に乗換駅での多方面への接続を重視したドイツとスイスの運行計画作成とその評価を実地に調査し，運行計画評価の研究に活かす。イタリアにおいては，シミュレーションに用いるモデル路線に適した規模や運行形態の路線を調査し，多様な路線網での運行計画のあり方の検討に役立てたい。

また，近年の発展と普及が著しい人工知能技術についても，運行計画の作成や評価の分野において，どのような考え方でどのような使われ方がなされているのかを実地調査し，今後の研究活動に活かしたいと考えている。

（ 様式D－２ ）

６　研　究　概　要

①　研究の方法

列車ダイヤが特に緻密に組まれているとされるドイツ（DB）と，乗換時の列車の接続を劇的に改善したとされるスイス（SBB）の状況を実地視察する。また，これらの運行計画の作成に携わっている人物から直接話を伺い，今後の研究の進展に活かす。さらには，本邦の計画ダイヤの作成にも反映できるようにする。

（１）市内交通の運行計画とその評価

海外（ドイツやスイス）の市内交通は，郊外電車，トラム，バス等異なる交通機関相互においても乗換や乗継をスムーズにする利便性を重視した運行計画（ダイヤ，時刻表）が立案されている。このため，この市内交通の運行計画を担当している機関において，計画立案の業務フロー，どの段階で何に留意して計画を策定するのか，策定した計画の部分的な手直しを行うための評価項目や考え方（段階によって異なることが予想される）について，担当者からのインタビューを通して明らかにする。

（２）列車運行シミュレータにおけるダイヤ作成とその評価

列車運行シミュレータには様々なものがあるが，軌道や信号設備，車両形式別の運行する列車のパーツを組み合わせて運行計画（列車ダイヤ）を作成できるタイプのものを対象とする。このシミュレータにおいて，運行密度をパラメータとして入力することで，時間当たりの運行本数の異なる列車ダイヤが作成される。このため，シミュレータの構築エンジニアからインタビューを通じて，密度変化，特に高密度化の際に問題となってくる制約を明らかにして，列車ダイヤ評価の最小運転時隔をどのように決定すべきかを明らかにする。

（３）列車運行計画への人工知能技術の適用

近年，人工知能（AI）技術の目覚ましい発達に伴い，鉄道分野でもこの技術を活用する潮流がある。しかし，人工知能には大量の学習データが必要である。条件を同じくする大量のデータが取得できる分野には人工知能の適用は容易だが，列車ダイヤのように対象地域や線区によって，条件が異なる対象には適用が難しい場合もある。

このようなことから，列車運行計画への人工知能適用はどのような考え方で，どのように充分なデータを収集して学習させようとしているのかを，車両，信号，運行管理等の各分野での取り組み状況を整理し，適用にあたっての共通の考え方，あるいは適用には向かないケースを明らかにする。

②渡航先での活動内容

（１）研究に関する意見交換

＜ヘッセン州庁＞

ヴィースバーデン（ドイツ）のヘッセン州庁の経済・エネルギー・交通・住宅部において交通政策を担当している，Dr.Thilo Muthmann 氏を訪問した。当方からは研究内容のプレゼンテーションを行い，先方からは現在取り組んでいるプロジェクトについて説明を受け，意見交換を行った。

Dr.Muthmann 氏のプロジェクトは，設備に関するプロジェクトで主にベネフィット・コスト面での２５％の削減を目標としている。多方面をカバーするいくつもの要素の取り組みで構成されるが，当方で関心のある列車ダイヤの評価法については，シミュレーションに依るコスト面からの検討が中心であり，AI は活用されていないとのことだった。

当方の研究に関しては，以下の意見交換を行った。

(a)運転整理案の作成

・運用を変えないこと

・日本では路線長にもよるが，全線で列車を停めた方が運転整理しやすいという考え方が一般的であること

(b)行動認識

・認識した結果の利用法

(c)計画ダイヤの評価

・複雑な路線や相互乗り入れへの拡張について

＜sma+社＞

チューリッヒ（スイス）にあり，“Open Track”という統合形鉄道運行シミュレータを提供する Sma+社の Dr.Markus Ullius 氏を訪問した。

まず，Open Track の紹介とデモンストレーションを拝見した。Open Track は３５０社の導入実績があり，導入先は鉄道事業者，メーカー，コンサルタント，大学と多岐にわたる。

路線（線路）情報や時刻表（ダイヤ）情報は鉄道事業者から提供されたもので，インポートして利用する。各種シミュレーションとして，アニメーション表示や speed vs distance のランカーブ表示ができる。出力は，ある時点での在線位置や占有状況，実績による遅延状況等である。計画上のランカーブに対し，どこかに遅延を与えてどうなるかを提示することも可能である。運転整理案の作成機能もあり，遅延を少なくし，早く戻す整理案を作成している。モンテカルロ法と経験則による作成を行っている。

列車ダイヤ（時刻表）の頑健性についても紹介を受け，遅延の回復を目的として，例えば遅延１分以上や○％以上等のパラメータを与えると，シナリオを基に各種シミュレーションができる。ロバスト性の評価の物理量は時間であり，乗客数は考えてい

ない。評価値はＫＰＩとして示され，積分値も算出できる。これらの結果を Open Track にかけてシミュレーションを行い，遅延回復効果を検証する。

AI の利用についてはこれからの課題であり，スジの当たるところの自動検出が出発点とのことである。

当方の研究に関しては，以下の意見交換を行い，大変有意義であった。

(a)運転整理案の作成

・輸送障害前と運転整理終了時のスジのつなぎ方は車種を考慮しているため，元のスジに戻すこと

・日本では路線長にもよるが，全線で列車を停めた方が運転整理しやすいという考え方が一般的であること

(b)行動認識

・BWEM が単語ベクトルであること

・単語と骨格を損失関数に入れての計算方法

・入力と学習には何を用いるのか，出力として得られるものは何か

(c)計画ダイヤの評価

・純粋理論であること

・評価結果の活かし方

・適用路線の拡張

・OD との関係

・単純性の意味として，同じ番線からの発車で次々に行先が変わるのは乗客からすると複雑であること

（２）実地調査

＜BOB 鉄道＞

ベルナーオーバーランド地方（スイス）のインターラーケンオスト―ラウターブルネン・グリンデルワルト間を結ぶ Berner Oberland Bahn（BOB 鉄道）の運行状況を調査した。途中駅で分岐する Y 字型の路線構成で，途中駅での分割併合が前提である。

乗客の多くが高地への観光（登山）客であるため，途中駅の利用者は少ない状況である。昨今はゴンドラや登山電車の乗車時間が予約されるようになり，乗客数を推定できるため，それに応じて臨時列車を運行しているようである。そうした乗客流動（OD）を抜きにしても，当方の研究においてモデル路線に適した規模・路線配置と運行形態であり，大変参考になる存在であった。

＜フィレンツェのトラム＞

フィレンツェ（イタリア）のトラム（路面電車）は開業が 2010 年と比較的新しく，2019 年には中央駅から空港へ延伸され，さらに 2025 年にも延伸された。路線網はχ型ながら，実地調査したところ特殊な運行系統もあり，当方の研究モデル路線とするのはそのままでは困難であると感じた。

（ 様式D－２ ）

（３）見学先で印象に残ったもの

＜ドイツ博物館＞（ミュンヘン（ドイツ））

様々な高さの音を重ね合わせて波形と音を一緒に示すシンセサイザーの原理，点字によるアルファベットのコード化，モデル化したエニグマ暗号の体験等が印象的で，今後の学生指導の参考になった。

＜ガリレオ博物館＞（フィレンツェ（イタリア））

パスカルの歯車式加算器とライプニッツの歯車式加算器が所蔵されており，コンピュータの歴史をたどる上で興味深いこの博物館では，スマートフォンのアプリケーションを駆使していた。展示品の写真とイタリア語での説明パネルや，さらに「使い方」等の質問を生成 AI に送り，その場で回答を得るという方法で理解を深め，ICT 機器と生成 AI 技術の進歩を身をもって体感する機会にもなった。

７　研究結果・成果

出発前に計画していた研究内容が，先方の事情等で少々対応が変わった部分はあるが，項目ごとに研究結果・成果，今後の展望を以下にまとめる。

（１）市内交通の運行計画とその評価

ヨーロッパでは，総合的な交通体系という考え方が浸透しており，鉄道のみ，バスのみといった個別の運行計画ではなく，始めから全てを統括した運行計画を立案している。例えば，スイスの BAHN2000 に始まる運行計画は，国内に複数ある拠点駅に毎時〇〇分に列車やバスを集めて相互の乗換の利便性を実現し，順次発車していくというものである。よって，運行計画の策定は，鉄道の長距離列車からトップダウン式に作成されている。市内交通を担うバスや路面電車はこの下層に位置し，単独での運行計画は考えられない。これを実現するために，設備インフラの大胆な改善投資（トンネルを掘る等）も行われていることに驚嘆した。

これらのことから，評価項目はまず，乗客の利便性（平均旅行時間，損失時間）を優先し，実現のためのコストは下位に位置付けられていることが理解できる。しかし，定量的な取り扱いが容易なのはコスト面でもあり，プロジェクトの性質によって使い分けられているものと思われる。

市内交通は比較的規模がコンパクトであることから，フィレンツェのトラム（路面電車）を今後の適用路線モデルの候補として視察したが，路線網はχ型ながら中央の共通部分（中央駅）はΔ配線になっており，特殊な運行系統もあった。これらのことから，モデル路線とするにはそのままでは複雑であり，何らかの工夫が必要と判断した。

一方，BOB 鉄道の運行状況は途中駅で分岐する Y 字型の線路配線で，途中で分割併合が前提だが，モデル路線とするのに適した規模，路線配置と運行形態であると感じられた。また，接続する輸送機関（ゴンドラや登山電車）の乗車時間が予約指定されていることから，乗客数の推定が可能であり，そうした乗客流動（OD）を考慮する発展も期待できる。

（２）列車運行シミュレータにおけるダイヤ作成とその評価

ヘッセン州のプロジェクトの説明を受け，評価は主にシミュレーションを用いたコスト面から検討しているとのことであった。やはりコストは無視できずに，何らかの考慮・組込みが必要であると感じた。

Open Track には運転整理案の作成機能もあり，遅延を少なくし，早く計画ダイヤに戻す整理案を作成しているとのこと。作成する運転整理案はモンテカルロ法と経験則によるものである。時間の最適化は諸条件を変更しながら繰り返す方式で，評価項目は基本的には遅延の最小化と短時間での回復収束を用いているが，運行密度の異なる日本とスイスでは，そのまま導入するにはそぐわないケースもあると思われる。

ロバスト性の評価の物理量は時間であり，乗客数は考えていない。評価値はＫＰＩを用いており，理想的には０だが実際にはそうはならないとのこと。自列車の遅れと波及した遅れも評価の項目である。

（３）列車運行計画への人工知能技術の適用

意見交換した先においては，現在のところシミュレーションに依るコスト面の検討や，ボトルネックとなる点に着目した解決策が中心で，人工知能技術の適用についてはこれからの検討課題という印象を受けた。しかし，着目すべきボトルネックが明らかになっているのであれば，適用にはそれほどの苦労はないと思われる。現状での（流行中の）人工知能技術を適用するためには，多数の学習データが必要であり，適用にはむしろその収集が課題となると思われる。また，マイクロシミュレーションである必要がある。

以　　上