

交通研究のフロンティアを支え続ける阪神高速道路

東京工業大学名誉教授・神戸大学名誉教授 朝倉康夫

1. はじめに

理論と観測は科学技術の両輪である。構築された理論が現象を説明できるかどうかを観測データによって検証する一方で、観測された現象が新たな法則性の発見や新たな理論に展開され、科学技術が発展してきた。その意味で、阪神高速道路という実フィールドでの観測や調査なしにわが国の交通工学研究の発展はなかったと言っても過言ではないだろう。以下では、筆者が関わってきた範囲に限定しているが、阪神高速道路が交通研究の最先端領域を支え続けてきた事例をいくつか紹介するとともに、今後への期待を述べることにしたい。

2. 卒業研究を振り返る

筆者が大学を卒業したのは昭和 54 年（1979）である。京都大学の佐佐木綱先生のご指導により「都市高速道路が背後地域に及ぼす経済効果に関する 2, 3 の考察」と題する卒業論文をとりまとめた。これは、昭和 39 年に供用開始されて以降 15 年間に、阪神高速道路のネットワークの拡大が背後地域である大阪府および兵庫県南部地域に及ぼしてきた経済効果を包括的に定量化することを目的とする研究であった。佐佐木先生が委員長をされていた阪神高速道路公団の経済効果に関する委員会で検討されていた内容の一部を卒業研究として分担させていただいたものである。

道路の整備効果は、走行時間短縮、走行経費減少、交通事故減少という道路三便益に代表される直接効果と、それが波及することによって生じる間接効果に分けられる。間接効果は、交通に要する時間短縮による企業の生産性の向上や雇用・所得の増大だけでなく、土地利用の高度化、資産価値の向上、さらには地方財政への効果など多岐にわたる。卒業研究では、このような間接効果の波及プロセスに関わる社会・経済変数間の因果関係を大胆に仮定し、システムダイナミクス（System Dynamics）を適用して動的にシミュレーションした。

システムダイナミクスは、ローマクラブが「成長の限界」（1972）において、地球資源の枯渇と環境汚染への警鐘を鳴らした際に用いられた手法で、その当時は最先端であった。システムを構成する要素間の複雑な因果関係やフィードバック構造をモデル化することにより、システム全体の動態を記述できるという特徴を持つ。個々の要素間の関係性の表現には良い意味での柔軟性があり、モデルの構造が分析者の主観に左右されやすいという問題がないわけではないが、実験や広域的な俯瞰が困難な社会システムのシミュレーションには適しているとされている。局所的な厳密性を追求することには向かないが、システム全体の把握には役に立つともいえる。

初めて着手した交通研究のテーマが多岐にわたる道路の経済効果の計量化であり、その方法論が社会システムを俯瞰するのに適したシステムダイナミクスであったことは、その後の研究者人生に大きな影響があったと思っている。もちろん、卒業研究の当時は、複雑な現象や要因間の因果関係を大胆に仮定することや、大局的な思考の重要性を認識していたわけではないので単なる後付けに過ぎないのであるが。

道路の経済効果の評価は古くて新しい研究テーマでもある。実務的な費用便益評価で計量化の対象とされているのは走行時間短縮他の三便益に限定されており、広範な経済効果のごく一部が評価されているに過ぎない。直接効果のうち計量可能な項目、たとえば時間信頼性でさえも便益評価の対象には含まれていない。間接効果については、空間的応用一般均衡（SCGE）分析の応用による評価が可能であることが知られているものの、実務で広く適用されるレベルにはない。道路整備に関する政府自治体や一般社会の理解を得るには、整備効果を科学的な方法に基づいて解析・評価し丁寧に説明することが必須であり、阪神高速の社内でもそのための継続的な議論を期待したい。

3. ネットワークの更新と進化

卒業論文で用いた現況および将来ネットワークを図 1 に示す。実線で表された供用路線の延長は 100 km 程度であり、現在の路線延長 260 km の 40%程度に過ぎない規模であった。点線は整備中および計画段階の路線であり、大阪松原線（1980 年供用）や大阪西宮線（1981 年供用）も整備中であった。大阪湾岸線は供用中の港大橋や事業中の北港～大浜間を除いて大部分は計画段階であったし、関西国際空港の姿も見えない。また大和川線は、1979 年時点では将来付加される路線としてさえ認識されていなかったようである。【図 1】

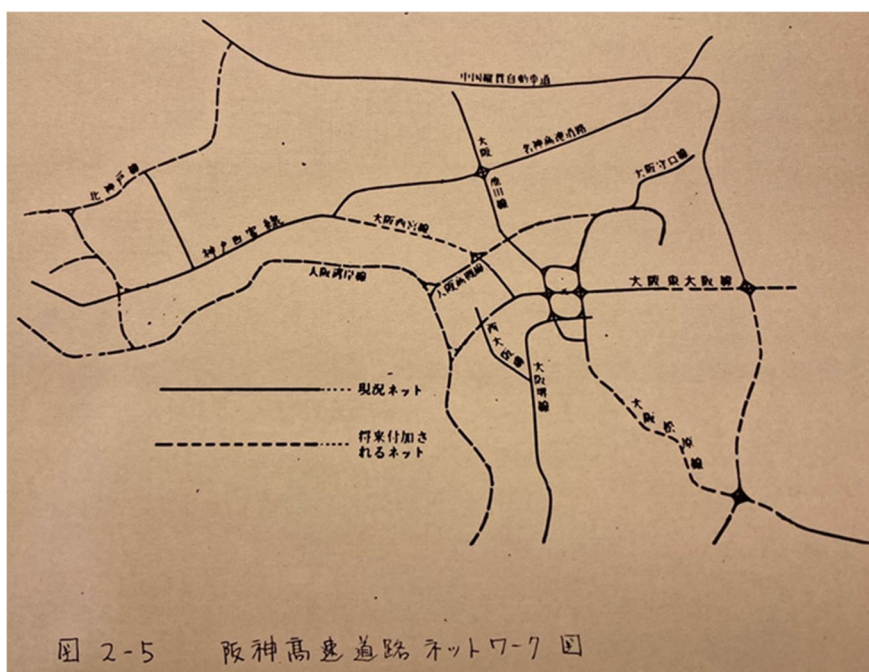


図 1 卒業研究時点（1979）の現況および将来ネットワーク

(1) 湾岸線西伸部事業に関するパブリックインボルブメント

大阪湾岸道路は全長 80 km のうち、りんくうジャンクションから反時計回りに 4 号湾岸線、5 号湾岸線が六甲アイランドまでの 60 km が供用されている。六甲アイランド北から垂水ジャンクションまでのいわゆる湾岸線西伸部約 20 km はようやく工事が着手されたばかりである。

湾岸線西伸部は道路交通計画、とりわけ計画段階の合意形成の面での新たな手法を取り入れて検討が進められた区間である。わが国では 2000 年代に入るまで、社会資本整備計画の構想はもっぱら行政の内部で検討され、市民に情報を提供し市民の意見を計画に反映させる機会はほとんどなかったといえる。湾岸線西伸部の計画は、計画決定プロセスの早い段階から市民が参画する機会（Public Involvement：PI）を確保した事例である。有識者委員会（委員長：大阪市立大学松澤俊雄教授）が設けられ、PI プロセスの透明性、客観性、公正さを確保するとともに、PI プロセスで得られた市民等の意見を踏まえ、道路の必要性や計画の検討にあたって配慮すべき事項等について審議した上で、道路事業者（国）に提言が出された¹⁾。

筆者は神戸大学に着任した直後から交通工学の専門家の立場で委員会に参加する機会を得た。2003 年 11 月から 2005 年 1 月の 14 ヶ月の間に 16 回の委員会が開催され、市民への情報提供、アンケート、ヒアリングを実施して市民の意見を把握した。道路事情や整備効果についての意見把握の結果から、西伸部の効果と期待に関して、市民等と道路事業者（国）の認識が概ね一致していることが委員会で確認できた。さらに、配慮すべき事項として、①自動車専用道路および一般道から西伸部へのアクセスの利便性を確保し交通流を適正化すること、②沿道環境と景観へ配慮すること、③防災対策として災害時の緊急輸送道路としての機能を確保すること、④整備費用の抑制と整備期間の短縮に努めることが提言に反映された。

提言が出されて 20 年後の近畿地方整備局の事業評価監視委員会では、湾岸線西伸部等事業の整備効果として、①混雑緩和、定時性の確保、物流の効率化、②既存幹線道路の渋滞緩和に伴う環境改善、③更新工事や交通事故による通行規制時の代替路の確保、④災害時の交通確保が示されている²⁾。これらはいずれも有識者委員会の提言の内容を継承しているとも言え、計画プロセスに一貫性があることを示している。

なお、有識者委員会提言では委員会から事業主体（国等）への要望事項として、①費用対便益の検証と交通量分散を促す料金体系の検討、②交通円滑化のための交通需要マネジメント、③周辺開発やまちづくりとの連携、④休憩施設の整備や道路情報の提供についても述べている。これらについて事業主体が今後とも誠実に対応されることを期待している。

民営化以降の阪神高速道路株式会社にとって、今後のネットワーク進化に関する事業を進める上で、PI のような市民参加型の計画プロセスをどのように組み込んでいくかについては引き続き議論が必要であろう。西伸部のような大規模事業でなくても、利用者や市民の意見を反映した丁寧な整備・運用を考えるのはもはや自明であるともいえるが、そのプロセ

スを可視化することが重要であるといえる。

(2) 喜連瓜破大規模更新事業に伴う交通影響分析

大阪松原線が供用開始（1980）されたのは筆者が大学院の修士1年の頃であり、当時研究室では井上矩之先生らが松原線の流入制御の研究をされていた。それから50年も経過しない間に喜連瓜破交差点をまたぐ橋梁のたわみが許容範囲を超え、2022年から2024年にかけて架け替え更新工事が実施された。工事に伴い、日交通量6万台を超える車両が利用していた松原線の一部区間が2年6か月にわたり完全通行止めとなった。

阪神高速道路では営業開始から60年以上が経過し、総延長の約5割が開通から40年を超えるとされている。2015年から老朽化による大規模更新工事が始まり、一部区間を短期間通行止めにして工事を実施した経験が喜連瓜破の案件以前から蓄積されていた。また、西日本高速道路の中国道（吹田JCTから中国池田IC）でも2021年から2023年の間に計6回の終日通行止めを伴う更新工事が行われていた。それでも、阪神高速の重要な路線のひとつである松原線の一部を3年にわたって通行止めにするという計画は、交通工学的には無謀とも思えた。

工事に先立って2021年には3回の実施検討会（座長：小林潔司京都大学特任教授）が開催され、筆者も委員として参加する機会を得た。この検討会では、更新事業の概要と施工計画の検討に加えて、交通マネジメントの施策が議論された³⁾。高速道路と一般道の交通流動の状況を踏まえて、通行止めによる交通流動の変化の予測結果が紹介され、交通影響を抑制するための施策が議論された。

この議論の中で筆者は、阪神高速道路の利用者に不便が発生するのは仕方がないし、阪神高速を含む高速道路の利用者にそれが波及しても理解してもらえないが、一般街路の利用者の利便性が損なわれることは最小化すべきであり、まして細街路に迂回交通が侵入して安全性が低下することだけは絶対にあってはならないという趣旨の意見を述べた。幸いにも大和川線等への迂回推奨や街路の信号パラメータの調整等の施策が効果を発揮し、また道路利用者の理解もあって、瓜破交差点周辺での交通渋滞は発生したものの、道路ネットワークの機能マヒという事態は避けられた。最も懸念していた迂回交通による細街路での交通事故の発生は防がれたようであった⁴⁾。

残念ながら、主要な道路区間が長期間にわたって完全通行止めされる際の交通影響を予測するためのネットワーク解析手法として、現時点で確立されたものはない。交通量配分手法等の通常のネットワーク解析は区間（リンク）を追加することによる交通流の変化を解析するためのものであり、リンクを削除することは想定されていない。喜連瓜破の場合でも既存の静的配分手法でリンク削除の影響を解析するしかなく、配分交通量から渋滞長を求めることはやむをえないことであったが、事前予測は実際に生じた渋滞個所や渋滞長と比較的よく整合していた。阪神高速の処理能力・容量と利用者の迂回行動に関する交通技術者の直感と予見能力が優れていたともいえる。

とはいえ、通行止めに伴う需要の変化や迂回行動等について、現状で利用可能なネットワーク解析手法の中に明示的に反映されているとはいえない。松原線の大規模更新工事の際の交通データは、今後、ネットワークから一部のリンクが欠損した際の交通状態の推定手法を構築する上で極めて重要である。たとえば、通行止め前と通行止め中および解除後の ETC プローブ車両の通行軌跡と旅行時間のデータ等を詳細に解析すれば、平常時の移動経路が通行止めによってどのように変化し、また回復したかを知ることができる。その分析を踏まえて、ネットワークの状況変化が交通流に及ぼす動的な影響をより適切にモデル化することができよう。このことは今後計画されている更新事業の際の交通影響予測に活用できるだけでなく、事故や災害等による意図しない通行止めが発生した際の交通対策にも役立つであろう。

4. 最先端の交通行動調査

今でこそスマートフォンに搭載された GPS により目的地までの経路案内をする機能は日常生活で普通のツールとなっているが、1998 年頃は携帯電話の一種である PHS (Personal Handy phone System) で位置特定を行うサービス ((株) ローカスによる) がようやく商用化されたに過ぎなかった。このサービスの存在を阪神高速の渋滞対策委員会等でお世話になっていた長谷川利治先生から教えていただき、羽藤英二先生ら愛媛大学のチームで追跡型のオンライン交通行動調査のシステムを作り上げた⁵⁾。

PHS は周辺の複数の基地局からの電界強度を常に計測しており、電界強度は概ね距離に反比例して低減するため、基地局の位置がわかれば PHS の位置を特定できる。交通行動調査の被験者に 24 時間 PHS を携帯してもらい、その位置を一定の時間頻度で観測すればヒトの動きを追跡できる。パーソントリップ調査のように被験者の記憶と想起によるものではなく、発信器を付けられた野生動物の調査のように被験者の行動を直接観測することができるのである。ただし、得られるデータは時刻と緯度・経度というラベルを持つ 3 次元の点列に過ぎないので、これを交通行動データに変換するには、移動と滞在の判定、トリップの抽出、交通手段の推定、経路の特定などのステップを踏まなければならない、手探りで方法論の開発を行った。

阪神高速には調査費の支援だけでなく、職員の方々に調査の被験者として協力いただき、二週間にわたる行動履歴を観測させていただいた。図 2 はある 1 名の被験者の一日の行動軌跡である。PHS により観測された移動の点列と被験者が別途に報告した行動軌跡を緯度・経度の平面に重ねて描画している。PHS の点列は観測誤差 (50~150m) があるために乱れている部分もあるが、両者はおおむね整合しており、この被験者は朝の通勤経路と夕方の通勤経路が異なることが確認できる【図 2】。この調査と解析は、携帯電話を用いた追跡型の交通行動調査・分析として世界で最初の試みであり、国内外の学会では大きな関心を集めた⁶⁾。ヒトの行動軌跡が可視化されることに対して、とりわけ地理学を専攻する海外研究者に刺激となったようである。

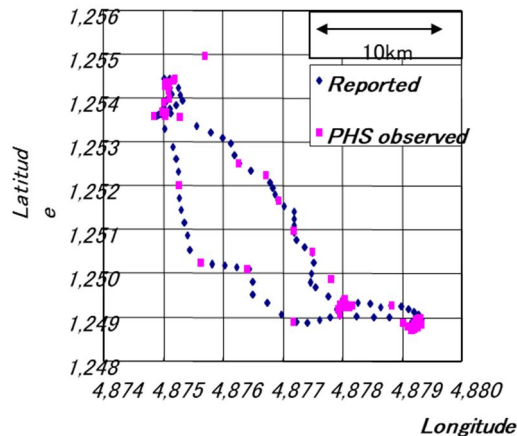


図2 PHSによる移動軌跡の計測事例

PHSは仕組みが単純であり巨大な通信事業者でなくてもハンドリングが可能であるため、その後、様々な調査システムを大学の予算の範囲でゲリラ的に開発することができた。たとえば、自分達で調査のための基地局を密に配置して位置特定精度を上げることや、基地局の位置情報がなくても受信した電界強度のパターンから位置を推定する方法を開発した。また、携帯機器側に電界強度を記録することができるオフライン型の調査機器であるPEAMON (Personal Activity Monitor) を開発し行動調査を実施した。その後、WEBと連動させて被験者自身が交通目的やトリップの起終点などの行動履歴を補足するプローブパーソン調査に展開され、さらには被験者の行動履歴を学習して被験者への質問の負荷を下げる自己学習型の調査手法も開発されている⁷⁾。最初はうるさくいろいろ尋ねてくるが、やがて行動パターンを学習するとおとなしくなって質問なくなるような学習型の調査システムが構築されている。

残念なことに公衆PHSは2020年代にその役目を終えてしまったが、sXGP (shared eXtended Global Platform) と呼ばれる次世代の自営PHSには期待が持てるのではないだろうか。免許不要で少ない基地局で安定した通信が可能であり、スマートフォンにも対応可能ということであれば、研究者が独自のアイデアでまた新たな交通行動調査システムを作ることが可能になるかもしれない。通信事業者からデータを購入して分析するだけでは独創的な研究は生まれない。新たな展開に期待したい。

筆者らが実施してきた追跡型の交通行動調査研究は、位置情報に基づく車速計測への適用を検討する中で生まれてきたものでもあるが、必ずしもそのすべてが阪神高速の計画や管理の実務に直接的に貢献できたわけではない。しかし、個々の移動体の位置情報を正確に把握することに基づくラグランジュ的な情報収集と管理の考え方はその後の交通マネジメントにも反映されている。また、道路利用者の行動を詳細に知るための具体的なツールを道路管理者が持っていることは、様々な交通施策の効果が個々の利用者の行動にどのように反映されているかを理解する上で極めて重要である。交通量や速度・旅行時間といったマク

ロな状態変数による施策の評価に加えて、個々の利用者の行動がどのように変化したかをミクロに知ることはこれからの時代の交通管理に求められている。

5. 新たな交通流データの収集とオープン化

阪神高速道路の日常的な交通流観測は、主に超音波型の車両検知器によるものであり、一定の時間帯毎に観測地点を通過する車両台数と時間占有率を計測し、交通量と平均速度を求めるものである。観測地点を通過する個々の車両の通過時刻も記録しているがこれが交通管制に使われることは希で、定点で全数を把握して集計量や平均値を求めるのが検知器データの特徴である。検知器はネットワーク全体に密に配置され、交通状態をオンラインリアルタイムでモニタリングし、渋滞の検出や交通情報提供に大きく貢献してきた。わが国の都市高速道路のように 500 m 以下の間隔で密に検知器が配置されている国や地域は世界的にも珍しい。

一方、ETC2.0 プローブデータや民間プローブデータ等のプローブカーデータは、GPS 等の計測機器を搭載した車両の位置や速度等を一定の時間（または距離）間隔で計測した時系列の点列データである。プローブカーデータは全数データではないので交通状態のすべてが計測できるわけではないが、旅行速度（または旅行時間）や移動経路のデータとして一定の信頼性がある。現時点では必ずしもリアルタイムの利用には適したものではなく交通管制向きではないが、プローブ車両の混入率やデータ取得間隔に注意して解析すれば道路ネットワーク全体をカバーするデータとしての利用価値は高い。

交通流計測に関する阪神高速道路の新たな試みは、連続する複数の照明柱（約 40 m 間隔）に設置されたカメラ画像から対象区間（約 2 km）を通過する全ての車両の移動軌跡（時間解像度 0.1 秒）を作成する方法の開発と実装である。その仕組みは、車両を画像センシングにより抽出し、Deep Learning により当該カメラの範囲内で個々の車両の軌跡を生成した上で、隣接するカメラ間で軌跡を結合することによって連続した車両軌跡を作成するというものである。

この方法とデータには Zen Traffic Data (ZTD) の呼称が与えられ、既に 11 号池田線、4 号湾岸線、13 号東大阪線を対象としてデータベース化されている。図 3 は 11 号池田線の塚本合流付近 2 km の区間で、1 時間にわたって観測された走行車線と追い越し車線の全車両の時空間軌跡図（タイムスペース図）である。個々の車両の軌跡がそれぞれ一本の線で表され、その勾配は地点速度に対応する。ZTD は交通状態の動的な変動、たとえば衝撃波の伝播を可視化することに成功していることに加え、ミクロな追従挙動・車線変更挙動の解析やデータ同化手法による交通状態推定手法の開発等、交通工学分野の理論の構築と検証にも大きく貢献している。【図 3】

ZTD はデータ作成手法として独創的であるだけでなく、データをオープンにしている点が大きな特徴である。阪神高速に申請すれば国内外を問わず研究者にデータが開示されているのである。これまで阪神高速道路に限らず、わが国では高速道路の交通データが完全に

オープンになった例は極めて少ない。道路管理者等と良好な関係性がなければ、研究者でさえもデータの入手は困難であるというのが普通である。

そのような中であって、最新的手法で作成された高精度の交通データをオープンにするという意思決定をされた阪神高速の関係者を高く評価したい。同種のデータとしては米国のNGSIM（Next Generation Simulation）があり、既に多くの学术论文がNGSIMを利用して発表されている。阪神高速のZTDの質はNGSIMに勝るとも劣らないと思われるので、今後、国内外からのアクセスが増えて世界的な評価が高まることを期待したい。

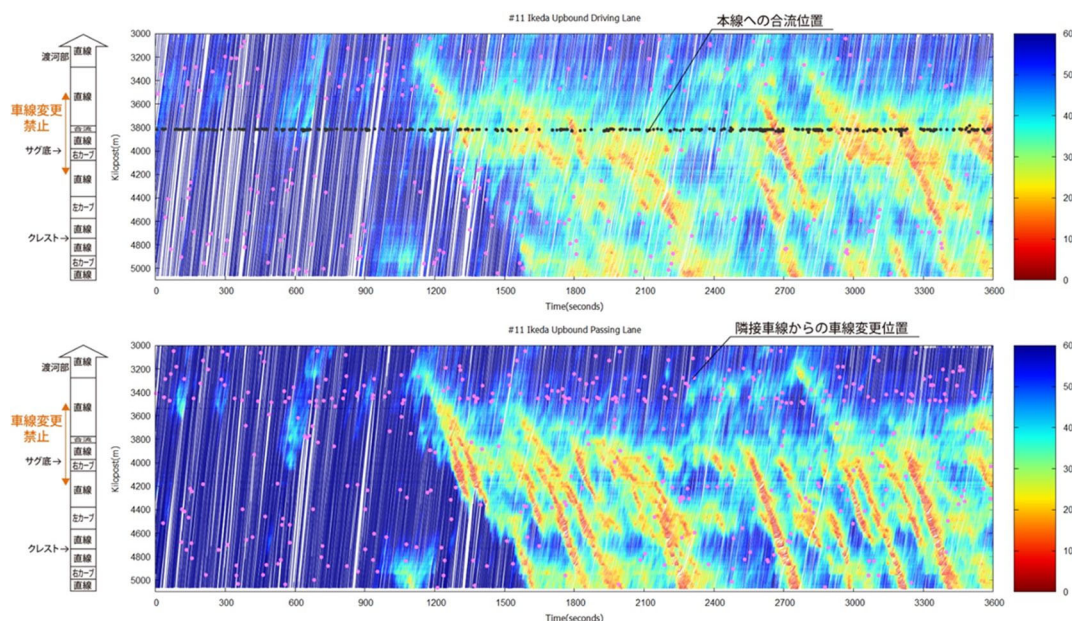


図3 11号池田線塚本合流付近のタイムスペース図
阪神高速 Zen Traffic Data, <https://zen-traffic-data.net/>より

6. おわりに

阪神高速道路は組織として設立以来、長く交通工学研究を支える存在であり続けてきた。大学等の研究に対して常に関心と理解を示され、理論と観測の理想的な関係性が築かれてきたとも言える。限られた紙幅では紹介できなかった他の多くの計測・制御システムを含め、いずれも最先端の工学的知見に基づくものとして世界に誇ってよい。

最近では検知器や定点カメラ画像に加えプローブカーにより収集された車両の動きをデジタル空間に再現し、渋滞緩和や事故防止等の交通流の最適化や新たな交通施策の検証を行うための枠組みとしてデジタルツインに関するシステム開発も進められている。論理重視の従来型シミュレーションから高い解像度を持つ豊富なデータと学習を重視したシステムにシフトしつつあるといえる。この分野は油断するとすぐに周回遅れになる。最先端の情報科学と工学技術には常にアンテナを張り、研究開発への投資を継続されることを望みたい。また、貨物車とタクシー等のサービスカーによるレベル4の自動運転は、それほど遠くない将来に実現するであろう。阪神高速道路でもそれを見据えた交通流の双方向モニタリ

ングと交通管制の対応が急がれる。新たな高速道路サービスと次世代ビジネス分野の開拓にも期待している。

阪神高速道路公団の時代から今に至るまで、阪神高速の技術者・職員の方々や関係の民間コンサルタントの方々にはたいへんお世話になった。個別にお名前を挙げることは控えるが、様々な面で研究を支えていただいたし、一研究者として生きていく中で適切な振舞い方を教えていただいたのも一度や二度ではない。交通工学研究の新たな挑戦を理解いただき寛容に接していただいたことに対し、心から感謝の言葉を述べ本稿のまとめとしたい。

<参考文献・資料>

- 1) 大阪湾岸道路有識者委員会提言（2005年1月26日）
<https://www.kkr.mlit.go.jp/naniwa/prj/17/15rvdn000000gnj-att/teigen.pdf>
- 2) 近畿地方整備局事業評価監視委員会（令和6年度（2024）第3回）資料9-1
<https://www.kkr.mlit.go.jp/plan/ippan/zigyohyoka/20241218jigyohyokaiinkai3.html>
- 3) 阪神高速14号松原線大規模更新工事（喜連瓜破付近橋梁架替え工事）実施検討会
https://www.hanshin-exp.co.jp/company/kigyou/council/kireuriwari_1.html
- 4) 喜連瓜破付近橋梁架替え工事総括とりまとめ（2025年6月23日）
https://www.hanshin-exp.co.jp/company/files/202508_kire_zentai.pdf
- 5) 朝倉康夫，羽藤英二，大藤武彦，田名部淳（2000）PHSによる位置情報を用いた交通行動調査手法. 土木学会論文集, No.653 /IV-48, pp.95-104.
- 6) Asakura, Y. Hato, E. (2004) Tracking survey for individual travel behaviour using mobile communication instruments. Transportation Research Part C, 12 (3-4), 273-291.
- 7) Seo, T, Kusakabe, T., Gotoh, H., Asakura, Y. (2019) Interactive online machine learning approach for activity-travel survey. Transportation Research Part B, 123, 362-373.
- 8) 阪神高速 Zen Traffic Data
<https://zen-traffic-data.net/>